



Éditeur scientifique

Éric Roose

Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens

Contribution à l'agroécologie



Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens

Contribution à l'agroécologie

Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens

Contribution à l'agroécologie

Éditeur scientifique
Éric ROOSE

*Cet ouvrage a bénéficié du soutien
de l'Agence universitaire de la francophonie*

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT
Collection Synthèses

Marseille, 2017

Préparation éditoriale

Yolande Cavallazzi

Sylvie Hart

Mise en page

Desk (53)

Réfection des illustrations

Michelle Saint-Léger

Coordination, fabrication

Catherine Plasse

Sylvie Hart

Maquette de couverture

Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure

Pierre Lopez

Photo de couverture

© IRD/É. Roose – Collines cultivées autour du lac Kivu (Rwanda).

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© **IRD, 2017**

ISBN : 978-2-7099-2277-7

Sommaire

Introduction générale	
Pourquoi un ouvrage collectif ?	13
<i>Éric Roose</i>	
Partie I	
La dégradation de la productivité des sols tropicaux par divers types d'érosion	25
Chapitre 1	
Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion	29
<i>Éric Roose, Zachée Boli, Théodomir Rishirumuhirwa</i>	
Chapitre 2	
Influences du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale.	41
<i>Éric Roose</i>	
Chapitre 3	
Nature et importance de l'érosion catastrophique dans la région du Kivu, Congo (RDC).	53
<i>J. Moeyersons, V. Byizigiro, I. Vandecasteele, D. Nkurunziza, W. Sahani, L. Nahimana, I. Lutumba (†), Ph. Trefois</i>	
Chapitre 4	
Une perspective écologique sur la restauration des sols dégradés .	65
<i>Thomas Francis Shaxson, Éric Roose</i>	
Conclusions de la première partie. La dégradation de la productivité des sols et les types d'érosion	75
<i>Éric Roose</i>	

Partie 2	
La restauration des sols par la gestion des matières organiques et minérales des agrosystèmes	77
Chapitre 5	
Influences de jachères améliorées et pâturées sur le rendement des cultures et les propriétés chimiques de sols ferrallitiques acides dans la région des forêts humides du Sud-Est du Nigéria	83
<i>Félix Ikpe, L. D. Gbaraneh</i>	
Chapitre 6	
Influences de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar)	93
<i>Marie Antoinette Razafindrakoto</i>	
Chapitre 7	
La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central)	103
<i>Hervé Duchaufour</i>	
Chapitre 8	
Effets de jachères agroforestières sur la réhabilitation et la productivité de sols ferrugineux tropicaux des savanes soudaniennes du Nord-Cameroun	117
<i>Jean-Michel Harmand, Clément Forkong Njiti, France Bernhard-Reversat, Robert Oliver, Régis Peltier</i>	
Chapitre 9	
Agriculture sur brûlis de jachères à acacias. Est-ce durable sur les sables du plateau Batéké, en République Démocratique du Congo ?	127
<i>Régis Peltier, Franck Bisiaux, Émilien Dubiez, Jean-Noël Marien, Vincent Freycon</i>	
Chapitre 10	
Influences de l'écobuage sur la restauration de la productivité des sols argileux acides de la vallée du Niari (Congo RDC)	141
<i>Jean de Dieu Nzila</i>	
Chapitre 11	
Importance des charbons de bois dans la restauration de la fertilité des sols tropicaux : une revue	151
<i>Cornelia Rumpel</i>	

Chapitre 12

Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale	161
--	------------

Hubert Guerin, Éric Roose

Chapitre 13

Intérêt des fumiers pour restaurer la fertilité des sols en zone semi-aride d'Afrique	179
--	------------

Francis Ganry, Laurent Thuriès

Chapitre 14

Restauration des sols cultivés mais dégradation des parcours par l'élevage au Maroc.....	197
---	------------

Mohamed Sabir, Éric Roose

Chapitre 15

Érosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi.....	211
--	------------

Théodomir Rishirumuhirwa, Éric Roose

Chapitre 16

Effets de la gestion des résidus de culture sur un sol brun tropical volcanique. Tests sur divers systèmes intensifs de cultures d'exportation sous pluies naturelles et simulées en Martinique	223
--	------------

Benoît Khamsouk, Éric Roose

Chapitre 17

Potentiel du paillage pour réduire l'érosion et restaurer la productivité des sols tropicaux.....	235
--	------------

Éric Roose

Chapitre 18

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)	247
---	------------

Éric Roose, Nadine Vernumière, Khamsouk Bounmanh-Benoit

Chapitre 19

Valorisation agricole des déchets domestiques et industriels dans les agrosystèmes en Afrique de l'Ouest et à Madagascar .	259
---	------------

Dominique Masse, M. Ndiénor, Edmond Hien, Tovonarivo Rafolisy, Yacine Ndour, Alfonse Bilgo, Serge Houot, Christine Aubry

Chapitre 20

Performances des engrais minéraux et organiques sur la production de laitue et sur la fertilité d'un sol maraîcher à Nkolondom (Yaoundé, Cameroun).....	275
<i>Emmanuel Seh Ngoun, Michel Omoko, Serge Simon</i>	

Chapitre 21

Rôle des cultures associées pour restaurer la productivité des sols du nord-ouest du Cameroun.....	285
<i>Serge Valet</i>	

Chapitre 22

Gestion des micro-organismes symbiotiques pour une restauration durable de la productivité des agrosystèmes tropicaux et méditerranéens	297
<i>Claudine Franche, Robin Duponnois</i>	

Chapitre 23

Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux.....	303
<i>Éric Blanchart, Pascal Jouquet</i>	

Chapitre 24

Valorisation agro-énergétique des déchets d'abattoir par méthanisation.....	315
<i>Jean-Louis Farinet</i>	

Chapitre 25

Valorisation des urines humaines et animales pour la fertilisation des sols tropicaux : une revue	319
<i>Éric Roose, Ernest Kouakoua</i>	

Chapitre 26

Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux.....	329
<i>Philippe Hinsinger, Yacine Ndour, Thierry Becquer, Lydie Chapuis-Lardy, Dominique Masse</i>	

Conclusions de la deuxième partie. Effets de la gestion de la biomasse.....	343
<i>Éric Roose</i>	

Partie 3	
Restauration des sols par les techniques culturales dans les agrosystèmes tropicaux.....	353
Chapitre 27	
Le semis direct sous couverture végétale, une voie de restauration durable de la productivité des sols semi-arides du Maroc.....	357
<i>Rachid Mrabet</i>	
Chapitre 28	
Potentiel du semis direct et des matières organiques pour restaurer durablement la productivité des sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun et du Sud-Mali.....	367
<i>Zachée Boli, Drissa Diallo, Éric Roose</i>	
Chapitre 29	
Influences de diverses techniques culturales (SCV-labour) sur l'érosion et sur le rendement en maïs, riz, haricots sur ferralsols des Hautes-Terres malgaches	377
<i>Noroso Razafindramanana Rakotoniaina, Jean-Marie Douzet, Bernard Barthès, Lilia Rabeharisoa, Alain Albrecht</i>	
Chapitre 30	
Usages agropastoraux des biomasses végétales et conséquences sur l'adoption du semis direct sous couvert végétal au nord du Cameroun	387
<i>Patrick Dugué, Paul Belchi, Lise Paresys, Marine Rétif, Jean-Pierre Olin</i>	
Chapitre 31	
Effets du <i>Mucuna</i> sur la production et la durabilité de systèmes de culture à base de maïs au Sud-Bénin	403
<i>Bernard Barthès, Anastase Azontonde, Christian Feller</i>	
Chapitre 32	
Restauration des terres de parcours dans les monts de Beni Chougrane (NO Algérie) par la mise en défens et l'enrichissement en légumineuses.....	415
<i>Boutkhil Morsli, Abdelkrim Hamoudi</i>	
Chapitre 33	
La lutte antiérosive, la GCES et la restauration de la productivité de sols dans les montagnes du nord de l'Algérie.....	429
<i>Éric Roose, Mourad Arabi, Lakhdar Bourougaa, Abdelkrim Hamoudi, Boutkhil Morsli, Nadjai Mededjel, Mohamed Mazour, Khaled Brahamia</i>	

Chapitre 34

Adaptations de l'agriculture à l'aridité dans les îles Canaries	447
--	-----

Marisa Tejedor, Conception Jiménez, Francisco Díaz

Conclusions de la troisième partie. Les effets des techniques culturelles	457
--	-----

Éric Roose

Partie 4

Restauration des sols par des techniques complexes	463
---	-----

Chapitre 35

Création de champs cultivés en terrasses dans les monts Mandara et réhabilitation des vertisols dans la plaine du Diamaré (Nord-Cameroun)	467
--	-----

Christian Seignobos, Michel Tchotsoua

Chapitre 36

Création de champs cultivés et gestion de l'eau et de la fertilité des sols sur le plateau Dogon (Mali)	483
--	-----

Drissa Diallo

Chapitre 37

Techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols dégradés en régions semi-arides d'Afrique occidentale	491
---	-----

Éric Roose, Robert Zougmore, Leo Stroosnijder, Patrick Dugué, Ibrahim Bouzou-Moussa

Chapitre 38

Habilitation agricole de tufs volcaniques indurés au Mexique ..	519
--	-----

Christian Prat, Jorge D. Etchevers, Aurelio Báez, Juan F. Gallardo, Juliana Padilla

Chapitre 39

Restauration de sols volcaniques dégradés de l'altiplano mexicain par plantation d'agaves, d'herbes et d'arbres	535
--	-----

Christian Prat, Alejandro Martínez Palacios, Eduardo Ríos Patrón

Chapitre 40

Restauration des basses terrasses dévastées par les torrents dans le Haut Atlas (Maroc)	547
--	-----

Éric Roose, Mohamed Sabir

Chapitre 41	
Évolution des propriétés des sols de lits de ravines marneuses au cours de leur restauration écologique (Draix, France)	555
<i>Amandine Erktan, Lauric Cécillon, Freddy Rey</i>	
Chapitre 42	
Aménagements hydro-agricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols	565
<i>Michel Brochet, Saintil Clossy, Charles Lilin, Éric Roose</i>	
Chapitre 43	
Amélioration de la productivité des sols cultivés des collines du bassin versant de Maniandro (Madagascar).....	581
<i>Edmond Andriambelomanga, Simone Ratsivalaka, Nicolas Andriamampianina, Jean-Chrysostôme Randriamboavonjy, Mparany Andriamihamina</i>	
Chapitre 44	
Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda.....	591
<i>François Ndayizigiye</i>	
Chapitre 45	
Efficacité des haies mixtes, du fumier et du paillage pour la conservation de l'eau et la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique argileux acide du Burundi.....	605
<i>Hervé Duchaufour, Melchior Bizimana, Éric Roose, Canisius Mikokoro</i>	
Chapitre 46	
Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda.....	613
<i>Dieter König</i>	
Chapitre 47	
Lutte antiérosive et intensification de l'agriculture en milieu steppique (Boughezoul, Algérie)	625
<i>Mourad Arabi, Lakhdar Bourougaa, Oum El kir Kedaid</i>	
Chapitre 48	
Gestion du ruissellement et restauration de la productivité des terres de montagne au Nord-Ouest algérien (Beni Snouss).....	635
<i>Mohamed Mazour, Mohamed Zobiri, Malika Benmansour</i>	
Conclusions de la quatrième partie. Aménagements complexes .	647
<i>Éric Roose</i>	

Conclusion générale

Six règles à respecter pour restaurer la productivité des sols . . . 653

Éric Roose

Les auteurs 661

Résumés et abstracts 667

Introduction générale

Pourquoi un ouvrage collectif ?

Éric ROOSE

Avec la croissance démographique, la dégradation des terres atteint plus de 20 %

Dans le monde, la population ne cesse d'augmenter. Elle a dépassé 7,2 milliards de personnes en 2013 et pourrait atteindre 11 milliards en 2100 (GENESTE, 2013) : elle continue à croître dans les pays en voie de développement, la plupart situés dans les régions tropicales. Bien que la FAO estime que l'on dispose de techniques modernes capables de nourrir toute la population du monde, il s'avère qu'aujourd'hui plus de 900 millions d'humains souffrent de sous-alimentation. Or, 80 % des populations malnutries sont des petits agriculteurs ! (DE SCHUTTER, 2010). 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, en particulier des engrais minéraux, mais aussi la pression foncière des multinationales qui dépouillent les petits paysans de leurs droits à la terre (ZIEGLER, 2012).

Mais à 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 où l'érosion sélective, la lixiviation des nutriments par le drainage, la minéralisation de l'humus et les exportations par les récoltes ne sont jamais compensés par des apports suffisants de biomasse et de nutriments.

Le projet Glasod (OLDEMAN *et al.*, 1990) a mobilisé 250 chercheurs pour préciser la carte mondiale des divers types de dégradation des sols. Il conclut qu'en 1990, en Afrique 3,2 millions de km², soit 24,5 % des terres, étaient dégradés et au niveau

mondial 10,3 millions de km², soit 20 % des terres. 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 (1,7 %). Les principales causes sont le surpâturage (58 %), la culture (18 %), la surexploitation (17 %) et la déforestation (6,6 %). D'après LE HOUÉROU (1995), la restauration de ces terres dégradées exige une mise en défens, un enrichissement en végétation pérenne seul capable d'augmenter la production de biomasse et de restaurer l'humus du sol et les propriétés qui y sont liées (infiltration et vie biologique). PIERI (1989), s'appuyant sur le bilan de trente années de recherche, estime que les terres des savanes au sud du Sahara sont dégradées en raison des pratiques culturales, de l'explosion de l'activité microbologique des sols imposée 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 sont capables de produire durablement 5 à 10 fois la production mesurée actuellement en champs paysans » (PIERI, 1989).

La technique traditionnelle la plus courante pour restaurer la fertilité physique, chimique et biologique des sols consiste à abandonner les champs devenus trop peu productifs à *la jachère* pendant une période d'autant plus longue que le milieu est dégradé et aride. Mais la résilience des sols exige des temps de repos très longs (10 à 50 ans) pour retrouver une fertilité suffisante. Or depuis la période coloniale, la population africaine a doublé tous les vingt ans et les surfaces disponibles pour le développement agricole sont devenues trop exiguës. La durée de la jachère n'a cessé de diminuer au point de disparaître au profit de cultures continues et intensives soutenues par l'apport massif d'engrais minéraux et de pesticides industriels. La durée des jachères peut être raccourcie si elles sont enrichies en légumineuses fixatrices d'azote, ou prolongée si elles sont exploitées comme parcours pour le bétail, ou comme ressources en produits pharmaceutiques ou énergétiques (bois de feu pour la cuisine).

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 le système de culture extensif où il faut suffisamment de temps (donc de surface cultivable) pour que la jachère restaure les principales propriétés du sol en relation avec la production végétale (PLANCHON et VALENTIN, 1999). 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), 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 soignée, fumée, nettoyée des adventices et des ravageurs. » (TIFTEN *et al.*, 1994). Mais la relation entre la densité de population et l'érosion n'est pas toujours linéaire. En Afrique, ROOSE (1994) a observé des crises environnementales contraignant la population à choisir entre l'émigration ou la modification du système de production légué par les ancêtres. On assiste alors à une succession de périodes de crises et de périodes plus stables, où succèdent des systèmes de production adaptés à chaque situation foncière.

Les efforts de conservation des sols dégradés ne suffisent plus

Dès 1939, Bennet a développé le concept de « conservation de l'eau et des sols » (CES) qui consiste à mettre en défens une partie du territoire (les parcs nationaux) et à développer des techniques culturales pour couvrir les sols cultivés et des structures antiérosives (banquettes) pour conduire les excès d'eau de pluie jusqu'aux drains naturels.

En Afrique, depuis un demi-siècle, diverses personnalités de la recherche agronomique ont tiré la sonnette d'alarme (VAN DEN ABEELE, 1941 ; TONDEUR, 1954 ; JURION *et al.*, 1967). Dans « Afrique Terre qui meurt » Harroy (1944) prévient que les terres fragiles de l'Afrique ne peuvent supporter les techniques culturales (labour, engrais, cultures permanentes) développées pour la production intensive sur les terres des régions tempérées. De nombreux congrès internationaux ont décrit les processus de dégradation des terres et préconisé diverses techniques de conservation de l'eau et des sols (CES).

Dans les régions méditerranéennes de l'Afrique du Nord bien connues pour les dégâts d'érosion catastrophique lors des averses exceptionnelles, agronomes et forestiers (Putod, Plantié, Monjaube, cités dans GRÉCO, 1979) ont préconisé la mise en défens et la plantation d'arbres sur les hautes terres, la restauration des ravines et torrents qui transportent la majorité des sédiments et le terrassement des versants cultivés. Ce sont les principes de la défense et restauration des sols (DRS) qui se sont répandus tout autour de la Méditerranée. Cependant, dès les années 1975, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec de ces approches technocratiques qui ne tiennent pas assez 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 ; HUDSON, 1992 ; ROOSE, 1987, 1993, 1994).

De nouvelles approches pour restaurer la productivité des sols

La Révolution verte

Face aux famines de plus en plus fréquentes qui ravageaient 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, l'Argentine, le Brésil, mais a causé la perte de

nombreux petits producteurs qui, à la suite d'une récolte catastrophique (sécheresse, maladies, parasites), ont été privés de leur lopin de terre au profit de grosses sociétés qui leur avaient prêté les moyens de production. On a vu arriver en ville quantité de 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, mais la pauvreté du peuple l'empêche d'acheter la nourriture produite sur leurs terres. On a vu se développer en 2009 de nombreuses manifestations de paysans affamés dans les grandes villes d'Afrique et d'Amérique latine.

La révolution doublement verte ou l'agroécologie (AE)

Devant les échecs sociologiques et environnementaux, ainsi que le retour de la pauvreté et de la malnutrition, une nouvelle approche agricole s'est développée qui intègre mieux le bien-être de l'homme dans un milieu plus naturel. La révolution doublement verte recherche des techniques produisant des hauts rendements, tout en protégeant l'environnement (notion de durabilité des systèmes). L'agroécologie 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 plus aux liens entre producteurs, consommateurs, société, territoire, ressources naturelles et production agricole. L'agroécologie 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 de nutriments grâce à la couverture du sol ; 4/ le renforcement de la diversité génétique, des associations et rotations ; 5/ le renforcement des interactions biologiques parmi les composants de l'agrosystème (ALLAVERDIAN *et al.*, 2014). En Europe, l'AE se matérialise à travers 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, faisant appel aux techniques culturales qui protègent le sol (rotation céréales/légumineuses, semis direct sous couverture des résidus 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).

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

Lors du séminaire de Porto Rico (1988), 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). Cette approche a été nommée « land husbandry » par les anglophones (SHAXSON *et al.*, 1989 ; HUDSON, 1992) et « gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) » par les francophones (ROOSE, 1987, 1994 ; LAQUINA, 2007). Il s'agit non seulement de réduire le ruissellement et l'érosion, mais de couvrir la terre, de soigner le sol et de nourrir les plantes (ROOSE *et al.*, 2010). Pour lutter contre la dégradation des sols tropicaux, les chercheurs, réunis au congrès de Tananarive (Madagascar en 1966), ont proposé que l'aide internationale corrige les carences du sol (P, N, K), tandis que les paysans ne compensent que les exportations par les récoltes. Or, la majorité des sols tropicaux (ferrugineux, ferrallitiques et sols sableux) retiennent mal les engrais (faible capacité d'échange des argiles), perdent 50 % des MO. en quatre ans sur sols sableux et en dix ans sur sols argileux, fixent les phosphates sur les hydroxydes de fer et d'alumine, et s'acidifient par lixiviation des bases et exportation de la biomasse. Au lieu de corriger les carences du sol (trop cher et trop temporaire), il faut donc améliorer le pH et le taux de MO des sols et alimenter les plantes cultivées par des restitutions organiques et minérales pour leur assurer une croissance optimale en fonction des conditions écologiques locales (ROOSE et GODEFROY, 1968).

Le réchauffement climatique et la séquestration du carbone dans les sols

Malgré l'importance des sols pour la sécurité alimentaire, la gestion de l'eau et le stockage du carbone, l'agriculture et les matières organiques des sols sont restés longtemps les parents pauvres des négociations internationales sur les changements climatiques, la diversité biologique et la lutte contre la désertification (BERNOUX et CHEVALLIER, 2013). Or, il est apparu que les gaz à effet de serre (vapeurs d'eau + CO₂ + CH₄) proviennent des activités humaines, industrielles, énergies, transports, mais aussi des modifications de la végétation et des sols suite à la valorisation agricole. Si on compte 830 GT de C dans l'atmosphère, on en trouve 600 GT dans la végétation et 2 000 à 2 500 GT de carbone organique et 950 GT de carbone minéral dans les sols, le plus grand réservoir de carbone. Or, le sol peut séquestrer 1 à 3 GT/ha/an de carbone (puits de C) et améliorer la fertilité des sols, la résilience et la durabilité de l'agriculture, ainsi que la sécurité alimentaire. Dorénavant, le carbone organique des sols est considéré comme un excellent indicateur pour suivre les qualités d'un sol et ses fonctions environnementales : toute intervention agricole améliorant le taux de MO du sol contribue à l'atténuation des changements climatiques, pas seulement la reforestation. Inversement, le réchauffement climatique entraîne l'augmentation de la respiration

des microbes du sol et réduit sa capacité à séquestrer dans le sol le carbone de la photosynthèse. On devine que l'augmentation de production de la biomasse est une des voies principales pour restaurer la productivité des sols des régions chaudes : les techniques culturales (structuration et fertilisation minérale) et la gestion des eaux de surface constituent une approche complémentaire pour lutter contre la désertification, ou plus simplement la dégradation des sols.

Peu de synthèses sur la restauration de la productivité des sols

Dans la littérature, on peut trouver de nombreux ouvrages sur la fertilisation ou la dégradation des sols et des couvertures végétales par les cultures (PIERI, 1989), sur la restauration des propriétés naturelles des sols et la résilience des végétations naturelles (approches écologique et pédologique) (OLDEMAN *et al.*, 1990 ; PONTANIER *et al.*, 1995 ; RUELLAN, 2010). Par contre, il se trouve très peu d'ouvrages de synthèse sur la « restauration de la capacité de production d'une terre arable dégradée » qui a perdu ses qualités essentielles par une exploitation minière, sans compensation suffisante du carbone et des nutriments exportés (approche agro-pédologique). Sur internet on n'a trouvé que quelques articles d'intérêt local : le compte rendu d'un colloque sur ce sujet il y a vingt ans en Inde (SINGH, 1992) ou en Tunisie, (PONTANIER *et al.*, 1995), un *cahier Orstom Pédologie spécial* « restauration des sols » (ROOSE, 1993), une thèse (HIEN, 1995) et un rapport de synthèse sur la restauration des sols et de la végétation du plateau central du Burkina Faso (REIJ et THIOMBIANO, 2003). Même dans ces ouvrages, l'essentiel est consacré à la restauration des écosystèmes naturels plutôt qu'aux solutions développées pour intensifier durablement la production végétale.

Possibilité de restaurer certains sols tropicaux dégradés

Pour la majorité des pédologues, « le sol est une ressource non renouvelable » (RUELLAN, 2010). En effet, lorsqu'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 apte à accumuler les nutriments et assez d'eau dans les pores pour alimenter les cultures.

Or en Afrique occidentale, il existe de grandes surfaces désertifiées, érodées et encroûtées (suite au labour combiné à l'érosion éolienne et hydrique) qui ont perdu une grande partie de leur horizon humifère, de leur stabilité structurale et

ont développé des croûtes d'érosion capables de réduire leur capacité d'infiltration à quelques mm/heure. Les Mossi du Burkina Faso, les Dogons du Mali et les Nigériens du Sud ont développé des techniques de restauration de la productivité des sols de la région soudano-sahélienne (pluie annuelle de 300 à 850 mm) dénommées « zaï » au Burkina (ROOSE *et al.*, 1993). Lorsque la pression démographique se fait durement sentir, les paysans sont capables de récupérer ces terres dégradées en captant le ruissellement et en concentrant le fumier disponible dans des petites cuvettes, en y semant une douzaine de graines de mil ou de sorgho dès les premières pluies. Grâce à cette technique traditionnelle de restauration, les récoltes dépassent la production moyenne locale dès la première année et, si on y ajoute une dose raisonnée de NPK, on peut doubler le rendement en céréale. En analysant en détail cette technique complexe, il est apparu qu'en captant les eaux de ruissellement, en gérant la biomasse et les nutriments, on favorise les activités de la microflore et de la faune, on arrive en quelques années à restaurer la capacité de production des cultures et à mettre en place un système agro-sylvo-pastoral durable. Sur des matériaux meubles on peut donc restaurer rapidement la production végétale, mais cela a un prix : beaucoup de travail, du fumier, un aménagement de gestion des eaux et des nutriments pour que les plantes choisies développent une biomasse abondante (ROOSE *et al.*, 2011).

Pour cet ouvrage, nous avons donc choisi une quarantaine d'exemples de restauration de sols tropicaux ou méditerranéens, car c'est dans les zones chaudes et humides que les sols se dégradent et se restaurent le plus vite, que l'érosion est la plus active, que les roches et les MO se décomposent rapidement par la forte activité microbienne/biologique. Dans la zone de recherche de l'IRD et du Cirad, on s'est appuyé sur les résultats d'expérimentations de courte durée, confirmés par quelques résultats d'observations sur 10 à 20 ans. Après cinquante années de recherches, il nous semble bon de faire un bilan des résultats expérimentaux acquis essentiellement en Afrique francophone et parfois en Amérique latine (Martinique, Mexique, Haïti). Face aux prédictions catastrophiques de destruction des sols, de désertification des campagnes, de famines, de désordres sociaux, nous voudrions montrer des exemples de réactions positives des populations, et analyser le potentiel et les limites de chaque technique disponible, testée seule ou combinée, en vue d'améliorer les propriétés du sol et la production végétale.

De la lutte contre l'érosion à la gestion des ressources naturelles

Nous proposons 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 des savoir-faire paysans et dans la volonté d'élargir les moyens d'action des populations rurales.

L'État développe des stratégies d'équipement rural (RTM, CES, DRS) et s'intéresse d'abord aux terres dégradées d'où proviennent la majorité des sédiments qui polluent les eaux indispensables aux villes, aux industries et à l'irrigation des plaines. En créant des banquettes, des fossés de diversion sur les mauvaises terres, on ne s'attaque pas aux causes de l'érosion et les terres productives continuent à se dégrader. Les paysans préfèrent investir d'abord sur leurs terres productives pour tirer le meilleur revenu de leurs améliorations foncières (ROOSE, 1994, Brochet *et al.* dans cet ouvrage). On proposera ici trois exemples.

1) Si un versant rocheux largue beaucoup d'eau de ruissellement, au lieu de lui barrer la route (fossé, banquette), mieux vaut la freiner à travers une haie vive et l'utiliser en aval sur de bons sols pour donner un complément d'eau aux cultures arborées (ex. demi-lunes entourant un olivier dans le Maghreb).

2) Sur les versants des collines du Burundi, un bon paillage limite suffisamment le ruissellement et l'érosion pour obtenir de bons rendements du maïs, des haricots et autres légumes cultivés à l'abri du feuillage des bananiers : il n'y a pas besoin de terrassement sur ces sols ferrallitiques argileux acides, mais d'un apport de fumier et d'un complément minéral (Rishirumuhirwa et Duchaufour, dans cet ouvrage).

3) Sur les terres sableuses du Sud-Bénin, après dix années d'échec de diverses techniques culturales mécaniques, l'introduction d'une légumineuse sous le maïs a permis de maîtriser non seulement l'érosion, mais de reconstituer le stock de MO et de nutriments du sol nécessaires au rétablissement d'une production durable de céréales (BARTHÈS *et al.*, 2015).

Restauration de l'écosystème naturel ou réhabilitation des sols

Pour les écologues, la restauration au sens strict consiste à interrompre les facteurs de dégradation pour permettre au milieu de retrouver naturellement la flore et la faune primitives (ARONSON *et al.*, 1995). Comme on ignore souvent la composition du milieu primitif, on intervient pour orienter le milieu perturbé vers ce qu'on suppose être l'écosystème équilibré. Lorsqu'on a dépassé certains seuils irréversibles, et qu'on est obligé d'intervenir énergiquement, les écologues parlent de réhabilitation d'un système dégradé ou de réallocation, si on destine la terre à un nouvel usage sans rapport avec l'écosystème dégradé, par exemple une plantation d'eucalyptus dans la savane. Le terme de « réhabilitation » des écologues correspond souvent au terme de « soil reclamation » ou de « soil restoration » des pédologues anglophones, quand il s'agit d'intervenir énergiquement pour rétablir la capacité de production d'un sol cultivé épuisé.

Dans cet ouvrage il s'agit d'interventions dans un agrosystème pour créer les conditions biologiques, physiques et chimiques qui améliorent la croissance des plantes. L'homme intervient artificiellement par exemple pour relancer le fonctionnement hydrique des « vertisols hardés » ou des sols ferrugineux encroûtés, pour reconstituer un complexe argilo-humique des cendres volcaniques du Mexique, pour réduire la toxicité aluminique des vieux sols ferrallitiques acides du Burundi, du Rwanda et de Madagascar ou pour reconstituer le stock de matières organiques du sol (MOS) et de nutriments indispensables pour optimiser la croissance des cultures. Le sol n'est plus un objet à conserver pour lui-même, mais un milieu complexe à gérer au mieux avec l'eau, le carbone et les nutriments nécessaires pour optimiser la production végétale et faire face aux besoins des populations rurales et urbaines.

Présentation de l'ouvrage

Après cinquante années de recherches en agro-pédologie et lutte antiérosive, nous avons entrepris de réaliser une synthèse sur la restauration de la productivité des sols en commençant par dresser le sommaire des thèmes que nous voulions traiter ; puis, nous avons proposé à des spécialistes la rédaction de chaque chapitre pour rassembler dans un ouvrage collectif l'état actuel des connaissances sur la restauration du potentiel de production des sols cultivables en régions chaudes.

Il s'agit de montrer le potentiel et les limites de chaque technique, de chaque intervention en fonction des conditions physiques et humaines de chaque situation particulière. Trois années de dialogue avec les chercheurs ont été nécessaires pour recentrer et réduire le volume des communications. Pendant cette période nous avons aussi découvert l'importance de certaines pratiques qui n'avaient pas été programmées à l'origine de l'ouvrage.

Cet ouvrage collectif est structuré en quatre parties.

- La dégradation des sols en fonction des types d'érosion : l'érosion en nappe sélective, l'érosion linéaire en ravine, en masse et les inondations catastrophiques en relation avec les dégradations physiques, chimiques et biologiques qu'elles entraînent (4 chapitres).

- La gestion de la biomasse et des nutriments : le brûlage et les cendres, l'enfouissement des résidus ou le paillage, le compostage, le broutage des parcours et la production de fumier, les jachères naturelles ou enrichies en légumineuses, l'agroforesterie, les cultures associées, les déchets urbains ou humains. Mais le volume insuffisant de biomasse disponible et leur pauvreté en nutriments entraînent la nécessité d'une fertilisation minérale complémentaire (22 chapitres).

– Le rôle des techniques culturales : le semis direct sous litière, la couverture végétale du sol, les adaptations à l'aridité, l'enrichissement en légumineuses des parcours. Les techniques culturales interviennent dans la vitesse de l'enracinement, dans l'infiltration et l'érodibilité des sols, leur recouvrement par les cultures (8 chapitres).

– Les techniques complexes : associant les structures de lutte antiérosive, la gestion de l'eau (ruissellement ou drainage ?), des MO et les engrais minéraux. Les causes de dégradation des sols étant multiples, il faut d'abord réduire les pertes avant d'améliorer la disponibilité en eau et en nutriments (14 chapitres).

Aux lecteurs pressés nous proposons un parcours rapide : le sommaire, l'introduction et la conclusion générale, puis les introductions et conclusions des quatre parties. Il sera facile ensuite de sélectionner les chapitres qui intéressent particulièrement le lecteur et de les relier aux principales conclusions.

Les résultats des recherches présentées doivent être considérés comme l'état actuel des connaissances : ils mériteraient parfois d'être confirmés plus longtemps et en d'autres régions écologiques ou de servir de base pour rénover les thèmes de la recherche agronomique tropicale.

Ces 48 chapitres réunissent les efforts d'un large panel de chercheurs (108 coauteurs) pour apporter sous forme chiffrée leur expérience, pour la synthétiser sous une forme compréhensible par un large public scientifique et technique, de l'agronome au forestier, du géographe à l'hydrologue, des ONG aux agents des ministères, des enseignants aux chercheurs et aux étudiants, des spécialistes de l'environnement aux praticiens de terrain.

Les conclusions remettent en cause le potentiel et les limites de certaines pratiques. Par exemple, le fumier ne peut remplacer la jachère, ni la fertilisation minérale raisonnée. La conservation des sols ne suffit pas à restaurer la productivité d'une terre. La capture du ruissellement ne peut remplacer l'irrigation, s'il ne pleut pas. La lignine des racines, des fourrages, du fumier, du paillage et des arbres est indispensable pour stabiliser l'humus du sol.

Seule la gestion de l'eau combinée à la gestion du carbone et des nutriments permet d'améliorer substantiellement la production d'un terroir. Mais la restauration a un coût et il faut le justifier par une augmentation sensible et rapide de la production agricole. Dans une phase transitoire, on ne peut se passer d'une fertilisation organique abondante, complétée d'apports minéraux raisonnés. La fumure organique, en effet, sert de stockage de certains nutriments, mais surtout d'amendement pour maintenir les activités biologiques et un milieu physique favorable à la croissance des plantes. Depuis Liebig (XIX^e siècle), on sait que les plantes se nourrissent essentiellement d'éléments minéraux, d'où l'importance de maintenir la faune du sol et la vie microbienne pour structurer le milieu et restituer les nutriments sous des formes assimilables par les végétaux.

Bibliographie

- ALLAVERDIAN C., FERRAND P., KIBLER J. F., REYNAUD L., 2014 – L'agroécologie, un concept pour une diversité d'approches. *Grain de sel*, 63-66 : 6-7.
- ARONSON J., FLORET C., LE FLOC'H E., OVALLE C., PONTANIER R., 1995 – « Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones semi-arides : le vocabulaire et les concepts ». In Pontanier R., M'Hiri A., Aronson J., Akrimi N., Le Floch E. (eds) : *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?*, Paris, John Libbey Eurotext : 11-30.
- BARTHÈS B., AZONTONDE A., FELLER C., 2015 – Effets d'une légumineuse de couverture sur la production et la durabilité de systèmes de cultures à base de maïs au Sud-Bénin. In : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie* : 319-328.
- BENNET H., 1939 – *Elements of soil conservation*. New York, Mc Graw-Hill, 2nd edition.
- BERNOUX M., CHEVALLIER T., 2013 – *Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables*. CSFD, dossier 10, Agropolis, 42 p.
- BOISSEAU S., LOCATELLI B., WEBER J., 1999 – *Population & environment relationship: a U shape curve hypothesis*. Chambéry, Jardin planétaire, 4 p.
- DE SCHUTTER O., 2010 – L'économie politique de la faim. Garantir le droit à l'alimentation dans un monde de ressources rares. *Les leçons inaugurales du groupe ESA* <http://gesd.free.fr/deschut10.pdf>, Angers, ed. G. ESA.
- FOTSING J. M., 1993 – Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en pays bamiléké, Cameroun. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (4) : 241-254.
- GENESTE A., 2013 – Onze milliards d'habitants sur la planète en 2100 : la population n'est pas en voie de stabilisation. *Le Monde*, 27 juillet 2013.
- GRÉCO J., 1979 – *La défense des sols contre l'érosion*. Paris, La Maison Rustique, 163 p.
- HARROY H., 1944 – Afrique, terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation. Bruxelles, M. Hayez edit., 557 p.
- HEUSCH B., 1986 – Cinquante ans de banquette de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 153-162.
- HIEN F., 1995 – La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel. Étude de l'effet des mesures de CES au Burkina Faso. *Tropical Resource Management*, 7, Wageningen, 223 p.
- HUDSON N., 1992 – *Land husbandry*. London, Batsford, 192 p.
- JURION F., HENRY J., 1967 – De l'agriculture itinérante à l'agriculture intensifiée. Bruxelles, Publication INEAC, hors série, 498 p.
- LAOUINA A., 2007 – GCES au Maroc. Diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres. *Publ. de la Fac FLSH*, Mohamed IV, Agdal, Rabat, Maroc, 172 p.
- LE HOUÉROU H., 1995 – Dégradation, régénération et mise en valeur des terres sèches d'Afrique. In Pontanier R., M'Hiri A., Aronson J., Akrimi N., Le Floch E. (éd.) : *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?*, Paris, John Libbey Eurotext : 65-102.
- LOVEJOY J., NAPIER T., 1976 – Conserving soil: sociological insight. *J. Soil & Water Conserv.*, 415 : 304-410.
- OLDEMAN L., HAKKELING R., SOMBROEK V., 1990 – *World map of the status of human-induced soil degradation*. Projet Glasod., ISRIC, Wageningen and Unep, Nairobi.
- PIERI C., 1989 – *Fertilité des terres de savanes*. Paris, Cirad, Min. Coopération, 444 p.
- PLANCHON O., VALENTIN C., 1999 – Croissance démographique et dégradation des sols en Afrique de l'Ouest. *Bull. Réseau Érosion*, 19 : 157.
- PONTANIER R., M'HIRI A., ARONSON J., AKRIMI N., LE FLOC'H E., 1995 – *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?* Paris, John Libbey Eurotext, 455 p.
- REIJ C., THIOMBIANO T., 2003 – *La réhabilitation de la capacité productive des terroirs sur la partie nord du plateau central du Burkina Faso entre 1980 et 2001*. Rapport de synthèse, GTZ, Usaid, Amb. Pays Bas, 82 p.

ROOSE É., 1987 – « Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale ». Séminaire Icrisat/Inran, Niamey, Niger : 57-72.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO*, 70, 420 p.

ROOSE É., 1996 – Réhabilitation des sols et GCES. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28, 2, 423 p.

ROOSE É., GODEFROY J., 1968 – Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. *Fruits*, 23 (11) : 580-584.

ROOSE É., 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, sér. Pédol.*, 28 (2) : 159-174.

ROOSE É., ALBERGEL J., DE NONI G., LAOUINA A., SABIR M., 2008 – *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité en milieu semi-arides*. AUF, IRD, Enfi, 402 p.

ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011 – Six rules for rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical & Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (3) : 1-12.

RUELLAN A., 2010 – *Des sols et des hommes : un lien menacé*. Marseille, IRD Éditions, 105 p.

SHAXSON T., HUDSON N., SANDERS D., ROOSE É., MOLDENHAUER W., 1989 – *Land husbandry: a framework for soil & water conservation*. USDA, Ankeny, IOWA, SWC Soc., 64 p.

SINGH J. S., 1992 – *Restoration of degraded lands: concepts & strategies*. Meerut, India, Rastogi Publications, 255 p.

TIFTEN M., MORTIMORE M., GICHOUKI F., 1994 – *More people, less erosion: environmental recovery in Kenya*. Chichester, John Wiley, 26 p.

TONDEUR G., 1954 – *Érosion du sol, spécialement au Congo belge*. Bruxelles, ministère des Colonies, 240 p.

VAN DEN ABEELE M., 1941 – *L'érosion, problème africain*. Bruxelles, Ineac, Sciences naturelles, t. XI.

ZIEGLER J., 2011 – *Destruction massive. Géopolitique de la faim*. Paris, Éditions du Seuil.

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

Partie I

La dégradation de la productivité des sols tropicaux par divers types d'érosion



Les sols, issus de l'altération des roches et des activités biologiques, forment un milieu complexe aux propriétés très particulières. La perte d'une ou plusieurs de ces qualités des sols, suite à leur défrichement et à leur système de production, entraîne la dégradation de leur capacité à produire de la biomasse.

Mais pour restaurer efficacement la productivité de ces sols dégradés, il faut connaître les processus et les facteurs en cause. Lors d'une enquête parmi les producteurs maliens de coton et de céréales, nous avons essayé de préciser comment ils ressentent la dégradation de leur terre ?

1. Les sols deviennent plus clairs : ils ont perdu de l'humus.
2. Ils sont plus vite secs : le ruissellement est abondant et le stockage de l'eau décroît.
3. La surface du sol est plus vite battante et encroûtée : la stabilité de la structure du sol a diminué, ainsi que leur porosité.
4. Le sol devient plus sableux : l'érosion en nappe emporte sélectivement les particules légères et les plus fertiles (MO + argiles + limons).
5. Le sol retient moins bien les engrais et nutriments : perte des MO et des argiles.
6. Les cultures sont plus sensibles à la sécheresse et donc aux maladies.
7. Finalement, le sol est envahi par les mauvaises herbes plus résistantes.

La cause primaire semble la baisse de teneur en matière organique 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 les microbes, lixiviation des solubles par les eaux de drainage, faible retour de biomasse au sol par les cultures, encore aggravé par la vaine pâture en saison sèche.



Malgré des pentes faibles ($< 2\%$), ce versant dénudé pour les cultures et battu par les pluies, ruisselle énormément au point de provoquer un ravinement important des meilleures terres dans la région de Ouahigouya, Nord-Burkina Faso.

© IRD/É. Roose

Dans cette partie sont réunis quelques exemples montrant que l'érosion en nappe, beaucoup moins abondante que le décapage par le ruissellement linéaire ou par les mouvements de masse, entraîne sélectivement les particules les plus légères (MO + argile + limon + agrégats, les plus fertiles) et réduit durablement le potentiel de production des terres dégradées malgré divers apports de fertilisants organiques et minéraux. Le deuxième facteur est l'abondance et la qualité de la couverture végétale, ainsi que la fraction de la biomasse produite qui est restituée au sol.

Enfin, les catastrophes naturelles, ravines profondes, glissements de terrain et inondations, dépendent de l'abondance des pluies, mais aussi des systèmes de culture couvrant le sol des bassins versants. La dénudation des terres des collines entraîne la dégradation des états de surface, le développement de fines croûtes de battance sur le sol réduisant l'infiltration sur le bassin à moins de 2 à 10 mm/heure. Il s'ensuit des crues très abondantes des rivières lors des averses de fréquence rare et un étiage réduit en saison sèche, au moment où on a le plus besoin d'eau. La croissance démographique entraînant l'extension des surfaces cultivées a un impact profond sur la dynamique hydrique des rivières et l'inondation des plaines les plus productrices.

Enfin, le Dr Shaxson montre comment tenir compte du fonctionnement écologique du milieu pour restaurer durablement la productivité des sols.

Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion

Éric ROOSE

Zachée BOLI

Théodomir RISHIRUMUHIRWA

Introduction : la définition des sols

Avant de parler de la restauration des sols, il nous faut définir brièvement les propriétés des sols et les processus qui entraînent leur dégradation.

Le sol est un épiderme fragile couvrant la surface de la terre. Contrairement aux êtres vivants, il n'y a pas de sol individuel. Il y a continuité entre un sol et son voisin sur le versant d'une colline : on devrait plutôt parler de couvertures pédologiques (RUELLAN, 2010). Le sol est une mince couche (0,1 à plus de 10 m d'épaisseur) 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 de l'atmosphère (l'alternance gel-dégel, pluie-sécheresse), de l'hydrosphère (attaque des acides carboniques des pluies, des acides humiques des eaux de drainage), et de la biosphère (minéralisation par les microbes, perforation par les racines et par la faune qui y trouvent un habitat très varié).

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

Les sols sont structurés, composés de pores remplis d'air ou d'eau, d'agrégats, de mottes et d'horizons plus ou moins épais et distincts. La densité réelle 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 sur certains sols volcaniques, de 1,3 après labour à plus de 1,5 en fin de saison culturale et à plus de 1,8 sur certains sols riches en fer. Sous forêts, le sol de surface est souvent plus léger que l'eau (0,9), tant il est poreux, soulevé par les racines, perforé par les animaux, allégé par les matières organiques : le pied s'enfonce d'ailleurs dans ce matériau plus riche en air et en eau qu'en minéraux solides (ROOSE, 1994).

Bref, il y a un monde entre le sol et la roche ou les sédiments qui lui ont donné naissance.

Le sol, un milieu très complexe qui a des propriétés particulières

C'est un milieu poreux qui filtre les eaux de drainage, stocke les eaux utiles aux plantes dans les micropores et permet aux eaux excédentaires de circuler rapidement dans les macropores pour alimenter les nappes phréatiques et bien plus tard, les rivières. Il assure aussi la continuité et le renouvellement de l'atmosphère en son sein.

C'est un milieu structuré où les particules minérales de tailles diverses s'allient de façon plus ou moins stable avec l'humus, le calcium et divers complexes métalliques pour former des agrégats, des mottes qui reflètent les travaux cultureaux, des horizons aux propriétés différentes (couleur, texture, structure, densité, etc.) qui renseignent sur la qualité de l'environnement pédologique.

C'est un habitat très diversifié qui abrite d'innombrables êtres vivants : des microbes, des animaux, des racines qui profitent d'une infinité d'habitats différents et de surfaces de contact permettant des échanges entre les divers habitants. C'est l'un des refuges de la biodiversité d'où l'on a tiré de nombreuses molécules utilisées par l'homme (ex. les antibiotiques, les ferments lactiques, etc.).

C'est un lieu de stockage de l'eau, de métaux et d'autres ressources précieuses : eaux minérales, terres rares, argiles pour la poterie, minéraux et métaux recherchés par l'industrie. C'est un matériau de construction isolant qui a été utilisé depuis l'antiquité pour élever des murs en argile tassée ou fabriquer des briques séchées au soleil. Une fois cuites à haute température, ces argiles forment des briques et des tuiles abritant durablement les mesures comme les palais.

C'est un lieu de stockage du carbone et des nutriments pour les plantes : azote, phosphore et soufre dans les matières organiques, cations et métaux adsorbés aux argiles et à l'humus, divers nutriments constituant des limons et certains sables capables de restituer progressivement la silice, des cations (K + Ca + Mg)

et divers nutriments minéraux (oligoéléments) dont les plantes et les animaux ont besoin pour se développer. C'est aussi un piège où séquestrer le carbone (ROOSE et BARTHÈS, 2006).

La dégradation des sols

Ce milieu complexe, fait de solides, d'air et d'eau, est le support de la vie. Mais avec la pression démographique et l'exploitation intensive des sols, l'homme néglige les règles naturelles d'entretien, de repos, de protection contre divers agents de déstructuration : au bout de quelques années, on peut constater que ses propriétés se dégradent, ainsi que sa capacité à produire des végétaux et à nourrir les animaux et les hommes.

La dégradation se manifeste par la perte d'une ou plusieurs qualités du sol par l'intervention de divers processus naturels ou accélérés par les activités de l'homme.

La minéralisation des matières organiques

Elle est indispensable pour transformer en humus les litières, cadavres et divers déchets organiques et plus tard pour restituer progressivement les nutriments (N, P, oligoéléments, etc.). Mais lorsqu'on défriche le milieu naturel et qu'on supprime l'apport régulier de litière ou de résidus organiques, la population microbienne du sol s'attaque à l'humus (ensemble complexe d'acides humiques libérés par les microbes) et aux matières organiques du sol responsables de la stabilité structurale. Si en plus on aère le sol par les travaux culturaux (labour, sarclages, etc.), on accélère la dégradation des matières organiques et de la structure 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, 1995 ; FELLER et BEARE, 1997). En dessous de ces seuils la structure du sol s'effondre, des croûtes se forment à la surface du sol qui réduisent l'infiltration, accélèrent le ruissellement et l'érosion, l'assèchement du profil et son appauvrissement sélectif en nutriments (ROOSE, 1994).

La dégradation par l'érosion en nappe

Les gouttes de pluies pilonnent la surface du sol, détachent les particules et micro-agrégats des mottes, arasent la rugosité de la surface du sol. Il se forme alors des croûtes compactes qui réduisent sévèrement la capacité d'infiltration des eaux de pluie (de 100 à < 10 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 le carbone dans ses horizons superficiels (ROOSE et



*Dégradation des sols près d'Abidjan, Sud Côte d'Ivoire.
Trois manifestations : pellicules de battance, épandages de sables et demoiselles coiffées.
© IRD/É. Roose*

BARTHÈS, 2006). Le ruissellement en nappe se déplaçant lentement à la surface du sol emporte sélectivement les particules les plus légères et les plus fertiles (argiles, limons, matières organiques et nutriments qui y sont associés). Elle laisse en place des nappes de sables et de graviers stériles et forme de minces croûtes d'érosion et de sédimentation qui réduisent drastiquement l'infiltration et la respiration du sol. L'érosion en nappe exportant sélectivement les particules légères prive le sol des nutriments concentrés dans les horizons de surface et appauvrit l'horizon cultivé des argiles et de l'humus (ROOSE, 1994).

La dégradation par compaction du sol

Les paysans, les animaux et les engins utilisés pour mécaniser les travaux cultureux exercent une pression de 1,5 à 6 kg/cm² à la surface du sol : celle-ci se transmet progressivement en profondeur (50 cm), écrase les macropores, ralentit la circulation de l'eau et de l'air indispensable aux racines (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. On observe une réduction progressive de la productivité du sol, car les plantes n'ont plus accès aux couches profondes du sol.

La pollution du sol par les métaux lourds, 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 apporte des métaux lourds rapidement absorbés par les argiles : un excès d'azote peut se libérer qui pollue la nappe par les eaux de drainage. Le milieu poreux que constitue le sol accumule ces produits qui deviennent toxiques pour les plantes. De même, 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 pression osmotique et à pH trop élevés pour que les racines puissent les supporter. Ces pollutions sortent du cadre de cette étude.

Dans cet ouvrage, sont prises en compte les dégradations par minéralisation des MO du sol, par l'érosion sélective ou le décapage et la compaction des horizons de surface qui entraînent une réduction importante de la production végétale.

Les écologues parlent de restauration d'un milieu dégradé quand il s'agit d'arrêter les processus de dégradation et de restaurer à l'identique les caractéristiques initiales de la faune, de la végétation et éventuellement du sol d'un écosystème. Quand il s'agit de récupérer des terres dégradées suite aux activités humaines et d'intervenir énergiquement pour transformer le milieu en terrain de culture rentable, les écologues parlent de réhabilitation (ARONSON *et al.*, 1993). Dans cet ouvrage, les études visent à décrire les méthodes de récupération de la productivité des sols dégradés par les cultures, l'élevage ou d'autres mises en valeur ; on parlera plutôt de restauration de la productivité des sols, de leur capacité à produire durablement des récoltes végétales ou des produits animaux. C'est le terme utilisé généralement par les agronomes et pédologues américains.

Les limites tolérables de l'érosion

Dans un premier temps, il s'agit de garder l'épaisseur du sol constant en acceptant une perte en terre du même ordre de grandeur que l'altération de la roche sous-jacente, soit environ 1 mm par an, 10 cm par siècle ou 1 m par millénaire. Si on choisit une densité apparente du sol de 1,2, cela correspond à 12 t/ha/an. Mais ce seuil ne tient pas compte de la différence très nette de fertilité entre la couche humifère superficielle qui est érodée et la couche de roche altérée.

Une deuxième approche propose de fixer le seuil d'érosion tolérable autour de celui qui correspond au maintien de la productivité du sol, mais cela ne tient pas compte des dégâts dus aux transports de sédiments dans les drains et les réservoirs d'eau.

En définitive, les spécialistes américains ont proposé une fourchette de 1 à 12 t/ha/an en fonction de la fragilité des sols et du milieu cultivé : 1 t/ha/an sur les sols forestiers où toute la fertilité est concentrée dans les premiers cm et jusqu'à 12 t/ha/an sur des vertisols qui peuvent se reconstituer rapidement (10 à 20 mm par an).

Influence de l'érosion en nappe sélective sur la production de céréales d'un sol ferrallitique acide argileux

Au Burundi central, sur un sol ferrallitique argileux acide des collines près de Gitega, l'érosion a été mesurée pendant trois années sur des parcelles d'érosion (300 m² et 8 % de pente) soumises à quatre niveaux de paillage (RISHIRUMUHIRWA et ROOSE, 2004). Les pertes en terre cumulées s'élèvent à 154 t/ha/3 ans sur la parcelle nue standard (mulch = 0 %), 54, 17 et 0,12 t/ha/3 ans sur des bananeraies avec une surface couverte respectivement de 20, 40 et 100 % par le paillage. Sur ces parcelles ayant connu un grand éventail d'intensité d'érosion en nappe, on a tenté de mesurer l'arrière effet de ce processus. La 4^e année, après l'arrachage des bananiers, chaque parcelle fut semée uniformément en maïs, dont un quart de chaque parcelle sans ajouter d'amendement. Le rendement en maïs-grain a diminué significativement (1,7-1,0, 0,5-0 t/ha) sur ces parcelles où l'érosion en nappe des années précédentes variait de 0,01 à 10 mm. L'horizon superficiel du sol a donc une mémoire très fine de l'érosion en nappe sélective subie les années précédentes. On verra plus loin que cette mémoire a aussi un effet très net sur les possibilités de restaurer la productivité de ces parcelles.

L'érosion en nappe sélective est douze fois plus dommageable que l'érosion en rigole ou en masse sur la production de maïs d'un sol ferrugineux sableux

Sur un sol ferrugineux sableux des pénéplaines du Nord-Cameroun, à la station de Mbissiri, près de Tchollire (BOLI et ROOSE, 1998), l'érosion mesurée pendant quatre années sur des parcelles d'érosion (100 m² et 2 % de pente) a atteint 160 t/ha/4 ans sur la parcelle nue standard (équivalente à 10 mm d'épaisseur), 90 t/ha/4 ans (= 6 mm d'épaisseur) sur des parcelles labourées et soumises à une rotation intensive de maïs-coton et 30 t/ha/4 ans (= 2 mm) sur des parcelles soumises aux mêmes cultures, mais avec un minimum de travail du sol sur la ligne de plantation et une litière couvrant plus de 30 % de la surface du sol. La 5^e année, toutes ces parcelles furent semées en maïs uniformément, sans fertilisation. En moyenne, les parcelles « antérieurement labourées » ont produit 10 quintaux de moins que les parcelles peu travaillées (2,5 t/ha), soit 40 % de moins pour une différence d'érosion en nappe sélective de 4 mm.

À proximité de ces parcelles d'érosion, on a découpé mécaniquement 30 parcelles de 0, 50, 70, 100 et 150 mm de l'horizon humifère pour simuler une érosion en rigole non sélective des particules légères. Après une plantation uniforme en maïs, le rendement en grain a décliné de 30 % sur les parcelles découpées de 50 mm et de 50 % sur celles dont tout l'horizon humifère (15 cm) a été découpé. Si on compare les résultats de ces deux tests, on peut estimer que la perte en terre constante, l'érosion en nappe sélective est douze fois plus délétère sur les rendements des cultures de maïs que l'érosion en rigole ou en masse non sélective (ROOSE *et al.*, 2011). Ou encore on perd 30 % des rendements, si on constate 4 mm d'érosion en nappe ou 40 mm d'érosion découpante non sélective.

Sur les mêmes parcelles d'érosion, on a observé la 4^e année l'activité des vers de terre après trois années de rotation intensive coton-maïs en fonction des diverses techniques culturales. Alors que les parcelles labourées (nue, labour avec enfouissement des résidus de maïs, labour plus paillis) présentent peu de turricules (5 à 70 par 100 m²), les parcelles peu ou pas travaillées restant couvertes par les résidus de culture accueillent 320 à 480 turricules/100 m². 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, les pesticides et herbicides abondamment utilisés sur la culture de cotonnier. La présence d'une litière de résidus de culture ou un paillage de graminées rapportées 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 d'une part, une jeune défriche (5 ans) et d'autre part, une vieille défriche (35 ans) et un sol sableux dégradé par les cultures, on constate que les risques de ruissellement observés pour chaque système de culture augmentent avec le temps de défrichement et le niveau de dégradation (tabl. 1).

Les parcelles cultivées et labourées perdent 10 à 25 % de plus de ruissellement que celles en travail réduit, 5 à 20 t/ha de terre, dont 4 à 10 t/ha de suspensions fines qui contiennent les matières organiques et les nutriments. Néanmoins, les parcelles labourées produisent les premières années 20 à 40 % de plus de maïs, et un peu moins de coton que les parcelles moins perturbées par le labour. Les parcelles en billonnage cloisonné ne perdent pas beaucoup de ruissellement ni d'érosion, mais produisent 20 % de moins que le labour conventionnel et exigent plus de travail de préparation. Il entraîne une dégradation de la structure et un appauvrissement en particules fines. Le billonnage cloisonné semble moins adapté aux zones humides qu'aux régions soudano-sahéliennes plus sèches.

Tableau 1
Effets de l'âge de la défriche et des techniques culturales
sur le ruissellement sur un sol ferrugineux sableux du Nord-Cameroun.

Traitement	Ruiss. moyen en % sur jeune défriche	Ruiss. moyen en % sur vieille défriche
Sur sol nu, labouré	40	41
Sur cultivé + labour	24	32
Idem + bandes d'arrêt	12	24
Cultures + labour paillé	14	20
Labour + billons cloisonnés	2	3
Semis direct sous litière	3	7

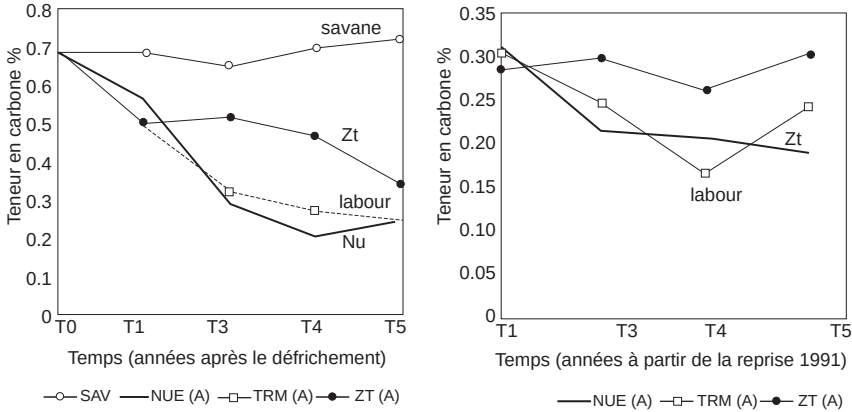
Source : BOLI et al., 1998.

Dans les sols sableux, le taux de matière organique de l'horizon superficiel (0-10 cm) du sol (MOS) est un bon indicateur de la fertilité. On a donc prélevé en février de chaque année 12 échantillons sur les diagonales des parcelles d'érosion.

Sur les parcelles en savane arborée, le taux de carbone reste stable autour de 0,7 %. Après labour et culture ou jachère nue, le taux de carbone tombe en 2 ans autour de C = 0,3 %. Sur les parcelles cultivées en semis direct sous litière, le taux de carbone décroît plus lentement, mais s'approche des C = 0,3 % en 5 ans.

Sur le bloc dégradé suite à 35 années de culture intensive, le taux de C ne dépasse pas 0,25 à 0,30 % sur les parcelles de semis direct sous litière de résidu de maïs. Sous labour et sol nu témoin, le taux de carbone descend à 0,20 ou 0,15 %, mais jamais plus bas (fig. 1). On a donc l'impression qu'il y a deux taux de carbone seuil, l'un maximum sous forêt continue et l'autre minimum

sur labour et sol nu. Il semble difficile de remonter rapidement de ce dernier au taux de carbone max. dans ces milieux sableux tropicaux humides où l'activité minéralisatrice des microbes et des insectes est très élevée et la biomasse réduite.



Les effets du ravinement et de l'érosion en masse

Chaque fois que l'homme perturbe l'écosystème naturel, transforme la forêt amazonienne ou africaine en pâturages ou en cultures intensives, il laboure et découvre la surface du sol, réduit les apports de litière, modifie la structure de la surface du sol, augmente le ruissellement et l'érosion de l'horizon humifère, le plus riche. Même sur des pentes douces (1 %) comme au Sahel, les nappes de ruissellement s'accumulent dans les vallons qu'elles creusent en ravins profonds, lacèrent la couverture pédologique par érosion régressive : si on n'intervient pas vigoureusement, les ravines ruinent les meilleures terres des versants et des bas-fonds en formant des badlands. De vastes champs doivent être abandonnés, tandis que continuent les inondations et dépôts de boue dans les plaines et les zones urbaines (ROOSE, 1994).

De brusques mouvements de masse se développent souvent en parallèle avec le défrichement des versants instables et le ravinement des bas de versant, avec l'agrandissement des ravines, les débits de pointe des rivières, le creusement d'une route ou d'un réseau de drains antiérosifs sur un versant. Qu'il s'agisse d'un « coup de cuillère » rotatif ou d'un mouvement en planche au-dessus d'un

horizon peu perméable soumis à des pressions hydrostatiques lors des averses exceptionnelles, tout le profil pédologique démenage des pentes vers les vallées où des masses de boues se déposent sans triage de matériaux. S'il s'agit d'une mince coulée boueuse, le ravinement prend aussitôt le relais pour creuser ou élargir le canal laissé béant jusqu'à la roche pourrie, stérile et peu cohérente qui sert de plan de glissement.

Les dégâts sont impressionnants et les paysans incapables d'organiser la lutte. Les techniques antiérosives et les grands moyens nécessaires dépendent des services spécialisés de l'État. « Mieux vaut prévenir que guérir » et cartographier les zones où il n'est pas raisonnable de tenter des modifications des écosystèmes (MOEYERSONS, 1989). Seuls quelques arbres (*Eucalyptus*) semblent capables de dessécher le plan de glissement, d'enfoncer de grosses racines dans les anfractuosités de la roche et d'augmenter sa rugosité (TEMPEL et RAPP, 1972).

Le travail du sol et le creeping entraînent aussi des mouvements lents de l'horizon humifère depuis le sommet des pentes jusqu'au bas de versant où la terre humifère s'accumule dans les colluvions. Cette érosion lente et à courte distance oblige les paysans à diversifier les techniques culturales sur les diverses situations couvertes par leurs champs (REVEL *et al.*, 1990).



Effets du labour (décapage progressif en haut de pente), du ruissellement (rigoles évoluant en ravines) et de la pente concave (dépôts des colluvions) dans l'Atlas algérien.

© IRD/É. Roose

Conclusions

En fonction des types d'érosion et de dégradation des terres, il faut mettre en place des stratégies adaptées aux processus majeurs concernés.

L'érosion en nappe ne déplace que quelques millimètres de sol par an (1 mm = 12 t/ha), mais elle s'attaque aux horizons superficiels et n'entraîne que les

matériaux légers, les plus fertiles, en particulier l'argile, les limons et surtout les matières organiques du sol, responsables du stockage des nutriments, de la structure de la surface du sol et de la capacité d'infiltration des eaux de pluie. Une érosion sélective de quelques millimètres entraîne donc une dégradation rapide de la productivité du sol. Le maintien de la couverture du sol et l'apport régulier de litière sont donc l'une des clés pour dissiper l'énergie des gouttes de pluie, nourrir la faune qui perfore la surface du sol et maintenir l'infiltration et l'alimentation hydrique (et minérale) des cultures. L'érosion en nappe détache bien plus de terre qu'elle n'en exporte et participe ainsi à la dégradation de sa structure et de ses propriétés physiques.

L'érosion en rigole et en ravine déplace 10 à 1 000 fois plus de terre, concentre le flux de ruissellement dans des canaux où le ruissellement développe son énergie propre au point d'arracher des mottes et des morceaux de roche. La restauration de ces terrains exige à la fois l'amélioration de l'infiltration sur l'ensemble du bassin et la dissipation de l'énergie du ruissellement canalisé par des seuils mécaniques et le développement d'une flore adaptée à ces milieux trop humides en saison des crues et arides en saison sèche : des arbres pour stabiliser les berges et des herbes au fond du canal pour laisser couler les excédents d'eau, tout en couvrant le fond.

L'érosion en masse concerne soit le glissement lent de l'horizon superficiel ou labouré des sommets de versant vers la vallée, soit la liquéfaction de zones saturées et le déplacement rapide des boues, soit le glissement rapide de tout un versant : arrachement et dépôts des sédiments ne sont pas sélectifs. Pour arrêter les mouvements rapides, il faut à la fois drainer le plan de glissement, augmenter sa rugosité et réduire l'infiltration. Étant donné le coût des ouvrages de gabionnage, seules des zones stratégiques peuvent être protégées. En milieu rural, seuls des arbres à enracinement puissant peuvent opposer une résistance au glissement, assécher le plan de glissement et renforcer la rugosité du contact du sol avec la roche.

Bibliographie

ARONSON J., FLORET C., LE FLOC'H E., OVALLE C., PONTANIER R., 1993 – Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1 (1) : 8-17.

BERGSMAN E., 1996 – *Terminology for soil erosion and conservation*. Wageningen, ISSS, ITC, ISRIC, 313 p.

BOLI Z., ROOSE É., 1998 – Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet

savannah of Northern Cameroon. *Advances in Geoecology*, 31 : 395-401.

BOLI Z., ROOSE É., 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 Érosion*, 18 : 246-259.

FELLER C., 1995 – *La matière organique dans les sols à argile 1 : 1*. Thèse doct. État, univ. Strasbourg, édit. Orstom, 393 p.

FELLER C., BEARE M.H., 1997 – Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 : 69-116.

MOEYERSONS J., 1989 – Les glissements de terrain au Rwanda occidental : leurs causes et les possibilités de leur prévention. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1) : 131-150.

PIERI C., 1989 – *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*. Paris, Cirad, Agridoc, 444 p.

REVEL J. C., COSTE N., CAVALIE J., COSTE J. L., 1990 – Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain (France). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1) : 111-118.

RISHIRUMUHIRWA TH., ROOSE E., 2004 – Influence de la gestion de la biomasse sous bananeraie sur l'érosion, le carbone et les propriétés d'un sol ferrallitique acide des hauts plateaux du Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, Montpellier, 23 : 250-261.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO*, Rome, 70, 420 p.

ROOSE É., BARTHÈS B., 2006 – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller Ch., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Science*, CRC, Taylor and Francis, Boca Raton, Floride, USA : 55-72.

ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011 – Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (3) : 1-12.

RUELLAN A., 2010 – *Des sols et des hommes : un lien menacé*. Marseille, IRD Éditions, 105 p.

TEMPEL P., RAPP A., 1972 – « Landslides in the Mgeta area, Western Uluguru mountains, Tanzania. Geomorphological effects of Suddan heavy rainfall ». In : *Studies of soil erosion and sedimentation in Tanzania, Geografiska Annaler*, 54 (3-4) : 157-194.

Influences du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale

Éric ROOSE

Introduction

En observant 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. Sous savane 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 du sol et de l'agressivité des pluies, le rendement des cultures diminue, tandis que le sol perd 50 % de son humus (ROOSE, 1981). Il suffit de 3 ans sur les sols sableux et de 15 ans sur les sols argileux pour constater 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 de l'agressivité des pluies tropicales, laquelle peut provoquer des taux d'érosion impressionnants, dès que le sol est labouré et dénudé (1 à 700 t/ha/an pour des pentes de 1 à 25 %) (ROOSE, 1994) : il suffirait de maîtriser l'érosion par des techniques classiques de conservation des sols pour restaurer la productivité des terres. Cependant, il existe d'autres causes de dégradation des sols tropicaux, en particulier la minéralisation rapide des matières organiques en milieu chaud et humide, la lixiviation des nutriments solubles par les eaux de drainage très abondantes en zones tropicales humides, la compaction, la salinisation ou l'alcalinisation des sols des zones arides.

C'est pourquoi, nous avons rassemblé dans ce chapitre les données de l'érosion, du drainage et des pertes de nutriments consécutives (C, N, P, K, Ca, Mg, K) de quatre stations expérimentales sous milieux naturels et cultivés depuis une zone de forêts denses humides subéquatoriales (Abidjan et Azaguié), une savane arborée soudanienne (Korhogo) et une savane herbacée soudano-sahélienne (Saria).

Le milieu

L'étude de l'érosion hydrique et de la lixiviation des solubles a été mise en place sur une séquence climatique et pédologique de 1 200 km s'étendant de la basse Côte d'Ivoire (Adiopodoumé et Azaguié) aux savanes du nord de la Côte d'Ivoire (Korhogo) et du plateau central du Burkina Faso (Saria).

La station d'Abidjan (Adiopodoumé) (05° 20' N, 04° 08' W, 30 m d'altitude) est située dans la zone des forêts denses humides du sud de la Côte d'Ivoire. Les sols sont ferrallitiques très désaturés, sablo-argileux, acides (typic hapludult pour la classification USA), à argile kaolinitique à faible capacité d'échange de cations, pauvre en matières organiques (MOS). Douze parcelles d'érosion ont été installées en bordure de plateau sur des pentes de 7, 15 et 25 % sous une vieille forêt secondaire défrichée en 1956 (ROOSE et BARTHÈS, 2006).

La station d'Azaguié (ROOSE et GODEFROY, 1977) (05° 33' N, 04° 03' W, 80 m d'altitude) se trouve à la limite de la forêt du Téké dans le sud de la Côte d'Ivoire. Les sols ferrallitiques très désaturés sur schiste sont remaniés et graveleux (typic kandiudult). Les parcelles d'érosion sont situées sur des versants opposés de 14 % de pente, l'un couvert d'une forêt dense ancienne et l'autre défriché depuis plus de 20 ans et aménagé en bananeraie intensive, abondamment fertilisée (N 700, P 50, K 320, + 500 kg/ha de dolomie) et irriguée.

La station de Korhogo (09°25' N, 05° 39' W, 390 m d'altitude) a été implantée dans une savane arbustive brûlée presque chaque année, sur un long glacis de 4 % de pente, sur un sol ferrallitique ocre gravillonnaire désaturé sur cuirasse ferrugineuse sur granite (typic kandiustult). La savane arbustive à *Andropogon* a été défrichée en 1965 pour y installer deux parcelles d'érosion, l'une cultivée en maïs fertilisé et l'autre laissée en savane brûlée presque chaque année. Quatre lysimètres non remaniés ont été implantés vers 50 à 150 cm de profondeur, cultivés en maïs fertilisé.

Enfin, la station de Saria (12° 16' N, 02° 09' W, 330 m d'altitude) est située à 90 km au sud-ouest de Ouagadougou au Burkina Faso. Le sol est ferrugineux lessivé sur cuirasse, issu de granite (typic plinthustalf). Les parcelles d'érosion et les lysimètres ont été implantés sur le champ P7 au milieu d'un long glacis

de 0,7 % de pente : une parcelle est cultivée en sorgho, fertilisée, labourée (profondeur de 12 à 15 cm) et sarclée à la traction animale, tandis que la voisine est une savane herbacée.

Ces stations sont donc situées sur une séquence tropicale s'étendant au sud depuis les forêts denses humides près de l'océan Atlantique jusqu'aux savanes du plateau central du Burkina Faso. La pluviosité annuelle moyenne diminue de 2 100 mm à 1 800 mm au sud avec deux saisons des pluies, à 1 300 mm à Korhogo et 730 mm à Saria en une seule saison.

Les méthodes

La méthode la plus classique pour étudier la dégradation des sols consiste à comparer les caractéristiques des échantillons de terre prélevés à la surface de parcelles ayant subi des itinéraires culturaux différents aux caractéristiques des terres voisines sous végétation naturelle. Le problème est de déterminer le nombre d'échantillons nécessaires pour lisser l'hétérogénéité importante des sols et obtenir des différences significatives de leurs caractéristiques en un court laps de temps. Dans ces expérimentations en parcelles d'érosion (100 à 200m²), on a prélevé chaque année 15 échantillons au tube long de 10 cm. Les analyses classiques ont été réalisées au laboratoire du centre IRD d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) sur des échantillons soigneusement mélangés, séchés à l'air et précautionneusement tamisés à 2 mm. On verra que les résultats d'analyse de C, N, P, K, Ca, Mg évoluent rapidement dans le sens d'une dégradation sous cultures sarclées comme dans le sens de l'amélioration en fonction des apports d'engrais minéraux, de fumier, de paillage, de plantes de couverture ou de légumineuses. Malheureusement, comme les études couvrent parfois plus de 15 ans, on observe des variations parasites certaines années qui dépendraient d'un changement intempestif de méthode d'analyse.

La mesure de l'érosion a été effectuée chaque jour de pluie au bas de « parcelles d'érosion » de 100 à 200 m², de 22 m de long, isolées du voisinage par des tôles fichées dans le sol sur plus de 10 cm et connectées à des cuves de stockage par un canal de captage des eaux de ruissellement, des particules fines en suspension et des terres de fond (sables et agrégats). Les terres de fond ont été pesées humides sur le terrain et l'humidité des boues a été évaluée au laboratoire après passage à l'étuve pendant 48 heures. Le volume ruisselé a été déterminé par le volume dans deux cuves couvertes reliées par un partiteur à 11 fentes. Les suspensions fines ont été évaluées en filtrant puis séchant à l'étuve les échantillons moyens (3 répétitions) et pesant la charge solide et la turbidité moyenne (en mg/l.) des eaux de ruissellement dans chaque cuve. L'érosion en tonne/ha/an est la somme des terres de fond et des suspensions fines qui ont quitté la parcelle avec les eaux de ruissellement. Le ruissellement et le drainage s'expriment en mm ou en % des pluies.

Le drainage est mesuré aux lysimètres ou calculé mensuellement par la différence entre les pluies mesurées sur le terrain au pluviographe, et le ruissellement + l'ETR + les différences d'humidité du sol (voir en détail dans ROOSE, 1981).

Les méthodes d'analyse des échantillons de sol et d'eau (ruissellement et drainage) sont les méthodes classiques du laboratoire de l'IRD à Adiopodoumé (Walkley & Black pour le carbone, le phosphore assimilable par la méthode Olsen adaptée par Dabin, l'azote total par la méthode Kjeldahl, les cations échangeables extraits à l'acétate d'ammonium).

Résultats et discussion

L'érosion

Dans le milieu naturel, les pertes en terre sont faibles : de 50 à 150 kg/ha/an sous forêts et sous savanes et jusqu'à 510 kg/ha sous une jachère herbacée. Par contre sous cultures, les pertes en terre varient énormément en fonction du couvert végétal : de 5,5 à 90 t/ha/an sous céréales en fonction de la pente et de l'érosivité des pluies, 2 t/ha/an sous bananeraie intensive (tabl. 1).

Le drainage

La lame d'eau qui draine à travers les horizons exploités par les racines jusqu'à la nappe décroît évidemment depuis la zone subéquatoriale ($Dr = 880$ à 640 mm pour des pluies $> 2\,000$ mm), jusqu'à la zone soudanienne ($Dr = 250$ mm sur $1\,350$ mm de pluies) et la zone soudano-sahélienne ($Dr = 20$ à 140 mm sur 730 mm de pluies). Ce drainage dépend à la fois de la pluviosité, du ruissellement (faible sous végétation naturelle 1 à 3 %, mais 25 à 40 % sous céréales) et de l'évapotranspiration (sur une profondeur de 1 m sous céréales et jusqu'à 10 m sous forêts).

Les pertes en carbone par érosion et drainage

En milieu naturel, les pertes en matières organiques par érosion sont faibles :

- les pertes en carbone par érosion diminuent de 15 kg/ha sous forêts à 8 kg sous savane, en milieu plus aride ;
- les pertes en carbone par lessivage diminuent de 71 kg/ha sous forêt tropicale humide à 2 kg/ha/an sous savane tropicale sèche.

Le cumul des pertes de carbone par érosion et drainage en milieu naturel ($< 0,1$ t/ha/an maxi) est peu important par rapport au stock de carbone de

Tableau I
Perte en nutriments par érosion et drainage (en kg/ha/an) dans quatre stations
depuis les forêts denses humides de basse Côte d'Ivoire jusqu'aux savanes herbeuses
soudano-sahéliennes du plateau central du Burkina Faso.

Stations	Abidjan		Azaguié		Korhogo		Saria	
Pluies	2 100 mm		1 800 mm		1 350 mm		730 mm	
Pente %	7	7	14	14	4	4	0,7	0,7
Végétation	forêt	cultures	forêt	banane	savane	cultures	savane herb.	cultures
Carbone								
C-érodé	14,2	1 866	15	134	7,5	82	9,5	155
C-drainé	71	70	64	117	13	25	1,5	0,3
Azote								
N-érodé	1,5	183	3	20	1,3	11	1	15
N-drainé	31	50	12	157	6	4,2	2,5	1,6
Phosphore								
P-érodé	0,1	33	0,2	2,2	0,2	2	0,3	3,8
P-drainé	2,1	0,3	1,5	2,2	1,2	0,3	0,1	0,1
Calcium éch.								
Ca-érodé	0,8	70	1,4	22	1	11	1,4	15
Ca-drainé	47	125	22	217	11	8	11	3
Magnésium éch								
Mg-érodé	0,3	35	0,4	14	0,3	4,7	0,4	9
Mg-drainé	30	26	8	95	5	1,2	3	0,7
Potassium éch.								
K-érodé	0,6	54	0,9	50	0,7	11	1,7	47
K-drainé	69	3	7	274	2,1	1,5	3,9	0,6
Érosion								
kg/ha/an	50	90 000	150	2 000	100	5 500	510	7 300
Drainage mm	880	640	515	630	250	210	136	21

Source : d'après ROOSE, 1981.

l'horizon humifère (14 t/ha/10 cm) et par rapport aux dépôts par la litière à la surface du sol (3 à 10 t/ha/an de litière 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 de C par drainage sont semblables à celles du milieu naturel (117 kg en zone subéquatoriale à 1 kg/ha/an en zone soudano-sahélienne) et diminuent en même temps que le volume de drainage. Par contre, les pertes en carbone

par érosion ne sont plus négligeables : elles varient de 1 866 à 82 kg/ha/an en fonction de l'agressivité des pluies, du couvert végétal et de la pente. Les pertes de carbone par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur que le potentiel de séquestration du carbone. Bien que l'érosion en nappe soit très sélective vis-à-vis des matières organiques, l'importance des migrations du carbone dépend essentiellement du poids de terre érodée, donc des techniques culturales et de la couverture du sol durant la saison des pluies (ROOSE et BARTHÈS, 2006).

Le taux de MO du sol décroît rapidement sous cultures non seulement à cause de l'érosion, mais aussi en fonction de l'exportation de la biomasse et surtout de la minéralisation des MO par la vie microbienne, sans compensation par apport de litière. Le paillage et l'association de plantes de couverture réduisent beaucoup l'érosion, mais l'enfouissement de ces dernières accélère parfois la minéralisation des MO du sol.

Les pertes en azote par érosion et drainage

Dans le milieu naturel, les pertes en azote par érosion sont très faibles (3 à 1 kg/ha/an) : les pertes sont dix à trois fois plus fortes par les eaux de drainage (31 à 2,5 kg/ha/an). Les besoins en azote sont tels que cet élément, une fois minéralisé en nitrates, est rapidement assimilé par le réseau racinaire très abondant.

Sous cultures sarclées et fertilisées, les pertes en azote sont importantes par érosion (183 à 15 kg/ha/an) et par drainage en milieu humide (50 à 157 kg/ha/an) ; sous milieu tropical sec, le drainage est faible ainsi que les pertes en azote soluble (1,6 à 4,2 kg/ha/an) ; par contre, les pertes en azote gazeux augmentent. L'azote n'étant pas retenu par les argiles va dépendre de l'abondance de la fertilisation azotée en période de pluies avant que les cultures puissent le capter et le stocker, d'où la pratique du fractionnement des engrais solubles (N + cations). À Azaguié, le rendement de la bananeraie dépend étroitement de la fertilisation : pour obtenir une forte production (35 t/ha de fruits tous les huit mois), le planteur distribuait jusqu'à 700 kg d'azote sous forme d'urée (moins acidifiante que les sulfates) en dix fractions distribuées au pied de chaque touffe de bananiers. Malgré ce fractionnement, les pertes par drainage ont atteint 60 % des apports d'azote (ROOSE et GODEFROY, 1977).

Les pertes en phosphore par érosion et drainage

Dans le milieu naturel, les pertes de phosphore par érosion et drainage sont très réduites (0,1 à 2 kg/ha/an). En effet, les phosphates solubles sont rapidement fixés par les hydroxydes de fer et d'alumine, abondants dans ces sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux.

Sous culture, les pertes par drainage sont aussi faibles, mais les pertes par érosion peuvent atteindre 2 à 33 kg/ha/an en fonction de l'érosion et des apports de phosphates généralement apportés en une fois en « fumure de fond » avant le semis. La majorité des sols tropicaux étant carencés en phosphore assimilable, indispensables pour le développement des graines, les végétaux sont aussi pauvres en phosphore ainsi que les fumiers et compost (0,1 % de P dans la matière sèche des fumiers). Il est donc indispensable de compléter la fumure organique par un apport de phosphate assimilable minéral.

Les pertes en potassium par érosion et drainage

En milieu naturel, les pertes en potassium par érosion sont négligeables (0,6 à 1,7 kg/ha/an) ; par contre, les pertes en K dans les eaux de drainage sont élevées en milieu forestier humide (7 à 69 kg/ha/an), un peu moins en zone tropicale sèche (4 à 21 kg/ha/an).

Sous les cultures sarclées et fertilisées, les pertes en K par érosion sont importantes (environ 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 intensivement fertilisée (274 kg/ha/an) malgré le fractionnement poussé. 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 par érosion et drainage

En milieu naturel, les pertes par érosion de Ca et Mg sont faibles (0,2 à 1,4 kg/ha/an). Par contre, les eaux de drainage exportent 47 à 11 kg de calcium et 30 à 3 kg/ha/an de magnésium.

Sous cultures, les pertes par érosion ne sont plus négligeables (70 à 15 kg/ha/an de Ca et 35 à 9 kg de Mg) et les pertes par drainage sont très variables en fonction des apports de chaux (217 à Azaguié, 125 à 3 kg/ha/an de Ca) (95 kg à Azaguié et 26 à 1 kg/ha/an 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 de la dolomie (1 t de dolomie sous bananeraie à chaque replantation). L'urée et l'ammoniaque sont rapidement transformés en nitrates dans le sol : les ions H⁺ remplacent alors les cations (K, Ca, Mg, Na) sur la kaolinite et acidifient le milieu. À chaque apport d'engrais azoté, on observe un lessivage du Ca + Mg dans les eaux de drainage.

Bien que les sols ferrallitiques et ferrugineux soient très désaturés, les risques de lixiviation du Ca + Mg sont importants et il faut en tenir compte lors des apports de dolomie pour réduire l'acidité du sol et la toxicité aluminique qui y est associée.

L'évolution du sol en place à Adiopodoumé (fig. 1 et 2)

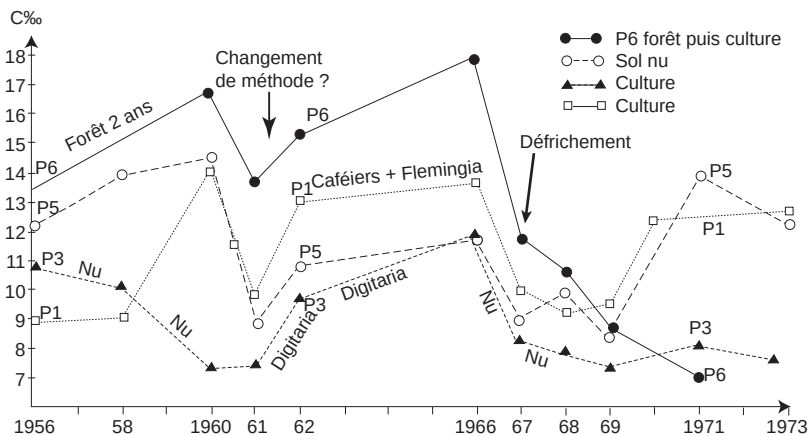


Figure 1
Évolution du taux de carbone (%) dans l'horizon superficiel (10 cm)
du sol ferrallitique sablo-argileux dans les parcelles 1+3+5+6
de la station Orstom d'Adiopodoumé (Basse Côte d'Ivoire).
Source : d'après ROOSE, 1981.

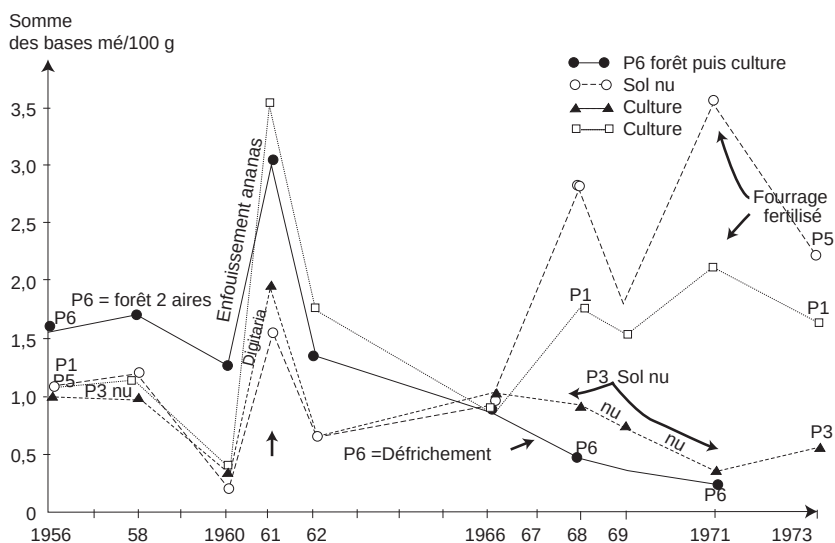


Figure 2
Évolution de la somme des cations échangeables (en méq/100 g)
dans l'horizon superficiel (10 cm) du sol ferrallitique sablo-argileux des parcelles 1+3+5+6
de la station Orstom d'Adiopodoumé (Basse Côte d'Ivoire).
Source : d'après ROOSE, 1981.

Pendant 17 années d'expérimentation sur les parcelles d'érosion, on a comparé les caractéristiques des échantillons composites du sol (15 prises sur chaque parcelle de 0 à 10 cm de profondeur) sous forêt (pente 7 %), sous cultures et sous sol nu travaillé chaque année. ROOSE (1977) a constaté que lorsque l'érosion est croissante :

- les teneurs en particules fines (A + L) du sol augmentent (13,6 à 17,8 %) par suite de la fonte et du décapage de l'horizon superficiel sableux ;
- les teneurs en carbone et azote décroissent jusqu'à un seuil minimal stable : C = 1,87 % sous forêt à 0,7 % sous sol nu et N = 0,14 % sous forêt à 0,06 % sous sol nu ;
- le pH est acide sous forêt et sol nu (4,2 et 4), mais s'améliore sous cultures fertilisées (5 à 5,6) parallèlement à l'accroissement de la somme des cations échangeables et au phosphore.

Cependant, il semble que, moyennant une fumure organique et minérale appropriée, on puisse assez facilement maintenir, ou même améliorer, le niveau de fertilité chimique des sols forestiers défrichés. 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 la vitesse d'infiltration ou de l'eau utile.

Sur les figures 1 et 2, ROOSE (1977) a tenté de représenter la dynamique des phénomènes de décapage, de séquestration du carbone et de la lixiviation des cations échangeables en fonction des traitements auxquels sont soumises quatre parcelles d'érosion d'Adiopodoumé pendant 17 ans. De prime abord, il semble que ces résultats analytiques évoluent de façon un peu anarchique avec le mode d'analyse et l'hétérogénéité naturelle du sol. Cependant, quelques exemples de vitesse d'évolution méritent d'être cités.

– En parcelle 3, sous jachère nue, le taux de carbone est passé de 1,1 à 0,73 % de 1956 à 1960, et de 1,2 à 0,72 % de 1966 à 1969. Par contre, le carbone remonte doucement de 0,75 à 1,2 % en quatre années de jachère à *Digitaria umfolosi*.

– De même en parcelle 6, sous forêt jusqu'en 1966, le taux de carbone chute de 1,79 % sous forêt à 1,17 % un an après défrichement, à 0,86 % après trois ans et se stabilise autour de 0,73 % sept ans après défrichement.

– Sous culture extensive, l'enfouissement de 40 tonnes de fumier ne laisse pas de trace détectable sur le taux de carbone un an après l'enfouissement. Par contre le paillage, une plante de couverture ou une culture fourragère fertilisée se font sentir dès la première année.

– L'évolution de l'azote est parallèle et aussi rapide que celle du carbone.

On a observé une évolution très rapide du carbone et de l'azote durant les deux premières années, puis leurs niveaux se sont stabilisés à un nouvel équilibre. Il semble donc qu'il existe deux types de matières organiques, l'une stable qui fixe le seuil minimal (C = 0,7 %) en fonction des conditions écologiques des dix dernières années, et l'autre très variable qui évolue d'une année à la suivante

de 0 à 2 % en fonction des conditions de fertilisation organique ou minérale, et en fonction des productions végétales et d'enfouissement des matières organiques (fumier et résidus de culture) (ROOSE, 1981).

– En parcelle 6, la somme des cations échangeables s'abaisse rapidement de 0,8 méq/100 g sous forêt à 0,2 méq/100 g après quatre années de jachère nue (par décapage et lixiviation).

– En parcelle 3, la somme des cations échangeables diminue de 0,9 à 0,3 méq/100 g de kaolinite après trois années de jachère nue. Ces chiffres donnent une estimation de la vitesse de lixiviation des cations échangeables et de réduction des MO dans des sols ferrallitiques sableux sous climat subéquatorial.

– Les propriétés physiques des sols se sont toutes dégradées lors du défrichage, puis se sont stabilisées en fonction du taux de MO du sol.

Conclusions

Malgré les imperfections de cette méthode de comparaison des caractéristiques de l'horizon superficiel, le plus sensible puisque le plus riche en éléments nutritifs organiques et minéraux, on peut tirer quelques conclusions sur les risques de perte en carbone et nutriments.

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

– Les forêts humides subéquitales couvrent des sols ferrallitiques à argile kaolinique, très désaturés, abondamment arrosés par les pluies et bien drainés. Le sol étant bien couvert par la litière forestière, les pertes par érosion sont faibles, mais les pertes par drainage ne sont pas négligeables. Dès qu'on défriche la forêt et dénude le sol lors des labours, les risques d'érosion augmentent considérablement et les pertes de nutriments par érosion et par drainage (surtout si le niveau de fertilisation est élevé) sont importantes.

– Les forêts sèches et les savanes arborées soudanaises, quoiqu'assez 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 et il faut en tenir compte lors des cultures.

– Les savanes herbeuses soudano-sahéliennes et sahélo-sahariennes couvrent des sols ferrugineux tropicaux à kaolinite et illite qui sont moins désaturés et moins sujets à la lixiviation par les eaux de drainage (moins abondantes) et à l'érosion (pentes et couvert végétal faibles). Mais une fois défrichées, ces zones de glaci souffrent d'un colmatage de la surface du sol par battance des pluies, d'un fort ruissellement et d'une érosion particulièrement sélective en carbone, argile et nutriments.

L'érosion en nappe est fonction de l'agressivité des pluies, de la pente, de la surface du sol et surtout du couvert végétal au ras du sol. Plus la pente est faible et le couvert végétal complet, plus l'érosion est sélective par rapport aux particules légères (MO + argile + limons) et aux nutriments. Cependant, les pertes en nutriments sont essentiellement dépendantes du poids de terre érodée (ROOSE, 1977, 1994 ; ROOSE et BARTHÈS, 2006).

Il faut donc développer des techniques culturales qui couvrent bien le sol : plantes de couverture, cultures associées, paillage et gestion des résidus de culture et des adventices en surface, semis direct sous couverture de légumineuses, etc.

Les pertes en nutriments dans les eaux de drainage sont assez comparables sous végétation naturelle et sous cultures extensives, sauf si on apporte une grande quantité de nutriments (cas des bananeraies). Le risque de lixiviation des nutriments solubles est particulièrement aigu en milieu tropical humide à fort drainage concentré sur quelques semaines. Le mode de fertilisation doit impérativement 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 de capter ces nutriments.

Dans tous ces écosystèmes des régions tropicales à sahéliennes, l'agroforesterie est le système cultural qui présenterait la meilleure solution. En effet, non seulement ce système allie la couverture du sol à l'abondance des résidus végétaux, mais surtout au transfert des nutriments profonds vers la surface (YOUNG, 1990).

Bibliographie

FELLER C., 1995 – *La matière organique dans les sols tropicaux à argile 2/1*. Thèse doct. d'État, université de Strasbourg, Orstom, 393 p.

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

ROOSE É., 1977 – *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : 20 années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 78, 108 p.

ROOSE É., 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 1967-1975). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 15 : 409-436.

ROOSE É., 1981 – *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 130, 566 p.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES). *Bull. FAO des Sols*, 70, Rome, 420 p.

ROOSE É., BARTHÈS B., 2006 – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Science*, CRC Taylor & Francis, Boca Raton Floride USA : 55-72.

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

YOUNG A., 1990 – *Agroforestry for soil conservation*. Wallingford, UK., CAB International, Icrif, 276 p.

Nature et importance de l'érosion catastrophique dans la région du Kivu, Congo (RDC)

J. MOEYERSONS

V. BYIZIGIRO

I. VANDECASTEELE

D. NKURUNZIZA

W. SAHANI

L. NAHIMANA

I. LUTUMBA (†)

Ph. TREFOIS

Introduction

Les provinces du Nord et du Sud-Kivu au Congo-RDC, le Rwanda et le Burundi, connaissent depuis leur première exploitation des problèmes d'érosion (WEIS, 1959 ; TONDEUR, 1951 ; MOEYERSONS, 1989a). À partir des années 1980, ces problèmes dépassent le cadre purement agricole et il se manifeste un accroissement d'accidents naturels, essentiellement d'ordre hydrologique. Il s'agit d'inondations et de fortes migrations de sédiments lors des crues de rivière, de plusieurs types de mouvements de masse, de ravinements et d'oscillations de la nappe phréatique. Ces accidents imprévus affectent de préférence les zones urbaines. Dans la ville de Butembo, les dégâts annuels par le ravinement et les glissements de terrain dépassent les 300 000 € (MUHINDO SAHANI, 2004). À Bujumbura, ce chiffre atteint 1 million d'euros.

La collection des *African Geographic Pictures* (<http://www.africamuseum.be/collections/browsecollections/naturalsciences/earth/geopic>) contient plusieurs images illustrant les risques naturels qui menacent la région. Ces événements occasionnent des dégâts aux maisons, aux ouvrages et au réseau routier. Ils affectent la production et la distribution de l'énergie hydro-électrique et ils sont à l'origine d'importantes réductions de la productivité agricole. Au Rwanda, on estime qu'une dizaine de personnes trouvent annuellement la mort dans ces accidents environnementaux. Il va sans dire que ces événements naturels freinent considérablement le développement durable de la région.

La plupart de ces catastrophes naturelles se présentent à l'occasion de fortes pluies. Mais la région du rift se distingue également par une tectonique très active qui, par des séismes, contribue souvent au déclenchement, parfois retardé jusqu'à l'arrivée des pluies, de glissements de terrain et d'autres formes de mouvements de masse (tabl. 1).

Tableau 1
Événements géomorphologiques de caractère catastrophique
dans la région Rwanda-Burundi-Kivu, 1980-2007.

	Événement hydrologique			Événement sismique/volcanol.			Mouvt de masse		
	Nbre	Affectés	Tués	Nbre	Affectés	Tués	Nbre	Affectés	Tués
Rwanda	12	71 777	249	3	301 643	45	3	2 000	24
Burundi	23	131 432	60	2	121	4	0	0	0
Kivu	10	83 045	111	17	110 400	208	10	149	29
Total	45	286 254	420	22	412 164	257	13	2 149	53
Moy./évén.		6 361	9		18 735	12		165	4

Source : VANDECASTEELE et al., 2010.

Le tableau 1 retient les accidents hydrologiques, qui se sont produits dans la région Rwanda-Burundi-Kivu pour la période 1980-2007. Les accidents sismiques se situent pour la plus grande partie au bord occidental du graben et au Virunga. Les accidents hydrologiques et les glissements de terrain se font sentir sur les deux bordures du Rift. La région dans son ensemble connaît en 2012 une densité de la population de l'ordre de 250 hab./km² et compte un bon nombre de villes en pleine expansion :

Notre base de données sur les risques naturels ([HTTP://WWW.AFRICAMUSEUM.BE/COLLECTIONS/BROWSECollections/NATURALSCIENCES/EARTH/HAZARD](http://www.africamuseum.be/collections/browsecollections/naturalsciences/earth/HAZARD)) montre une légère augmentation des accidents hydrologiques à partir de la deuxième moitié des années 1980 et une augmentation considérable à partir de 2000.

Ce chapitre analyse les raisons possibles de l'augmentation de la fréquence des désastres et donne un aperçu des types de risques observés et quelques recommandations de prévention.

Les crues des rivières et ce qu'elles nous apprennent

L'augmentation en nombre et en gravité des inondations reflète un changement du régime fluvial. Il y a quelques dizaines d'années, les rivières cherchaient leur cours à travers les vallées, couvertes d'une forêt de galerie ou bourrées de dépôts marécageux de boue, tourbes ou de papyrus. À l'heure actuelle, la majorité des rivières se frayent une sortie et dégagent la vallée par incision verticale et latérale ou par un vrai déplacement du lit de rivière. Un exemple extrême est la rivière Kalimabenge à Uvira, qui, en février 2002, a quitté son lit de 1959 et s'est creusée, en quelques heures, un nouvel exutoire au travers de la ville. Un millier de maisons ont été détruites et une cinquantaine de personnes ont trouvé la mort.

Les crues de rivière sont également bien documentées au Rwanda. Le 17 septembre 2007, le village de Bigogwe a été inondé par la rivière Muzingo. Plus de 350 maisons furent détruites, 25 personnes ont trouvé la mort et plus de 100 personnes ont disparu.

Les dix dernières années, des inondations, accompagnées de fortes érosions fluviales à la suite de débordements de rivière, ont été rapportées sur l'entièreté de la région considérée, y compris la région de Bujumbura, la ville de Butembo (Muhindo Sahani, 2004), la plaine de la Ruzizi, la région d'Uvira et de Bukavu.

Plusieurs raisons expliquent ce changement de régime fluvial. Premièrement, RWILIMA et FAUGÈRE (1981) ont montré que la déforestation et l'intensification de l'agriculture mènent à un tarissement des sources parce que le coefficient de ruissellement augmente (fig. 1). De même, le nombre accru des inondations sur les flancs des Virungas dans les années 1980 correspond à une déforestation et une surexploitation des zones amont (JOST, 1987). D'ailleurs, la déforestation s'avère être un facteur d'amplification des inondations dans le monde entier (BRADSHAW *et al.*, 2007). Si l'on tient également compte de l'augmentation d'éléments producteurs de ruissellement dans le paysage, notamment les routes, maisons, terrains endurcis ou revêtus, on comprend que le changement de l'utilisation du sol ces dernières décennies a contribué au changement du régime fluvial et que ce sont souvent les villes qui en souffrent le plus.

Beaucoup de chercheurs pensent que l'augmentation des débits de ruissellement trouve en partie aussi son origine dans le changement climatique global qui entraîne des pluviosités de plus en plus variables, y compris des orages plus importants en volume et en intensité (DORE, 2005 ; HULME *et al.*, 2001). MUHIGWA (1999) note que la variabilité des pluies s'est accrue depuis les années 1980 à Mulungu et Nyangezi, dans la région de Bukavu, et que les saisons pluvieuses se sont déjà déplacées d'un mois environ dans tout le Sud-Kivu, de sorte que l'auteur propose des changements au calendrier agricole. GOMMES (1996) montre également des écarts significatifs des pluies mensuelles à Butare (Rwanda) en 1993 par rapport à la moyenne des pluies

mensuelles des cinq années précédentes. Ainsi, s'accumulent progressivement les arguments statistiques qui caractérisent le changement global dans la région concernée.

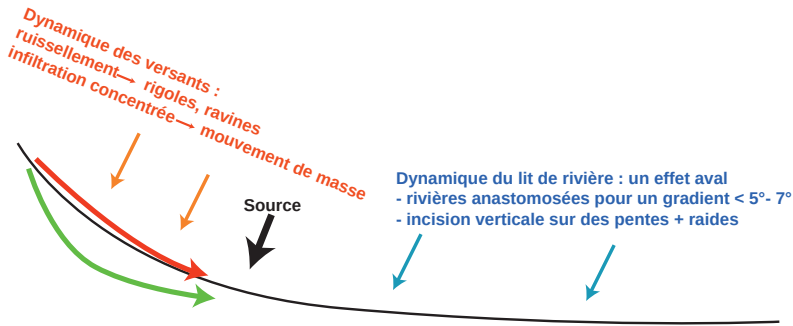


Figure 1

L'augmentation des risques hydrologiques collinaires suite à une augmentation du taux d'écoulement ou à une concentration de l'infiltration et le changement du régime fluvial en cas d'augmentation du ruissellement collinaire.

Aperçu des autres risques naturels non volcaniques

La dynamique de l'utilisation du sol et le changement global climatique interviennent très probablement ensemble dans l'évolution du comportement hydrologique du paysage tropical africain. La figure 1 montre le court-circuitage partiel des sources par l'augmentation du ruissellement sur les flancs de colline. Elle indique ainsi que les crues de rivière sont la conséquence du ruissellement accru sur les collines.

En aval des sources, qui fonctionnent toujours en partie, on distingue deux classes d'événements géomorphologiques. Une première classe comprend les crues de rivière, responsables soit des érosions verticales et/ou latérales du lit de rivière, soit des dépôts dans la vallée inondée, soit des remblaiements. Une seconde classe comprend les instabilités des versants le long de la vallée, créées par la dynamique du lit de rivière.

En amont des sources, les versants sont actuellement surtout affectés par des glissements de terrain et des ravinements.

Finalement, il faut aussi mentionner des catastrophes qui se concentrent à proximité ou même sur les structures tectoniques actives. Les risques peuvent être divisés comme suit :

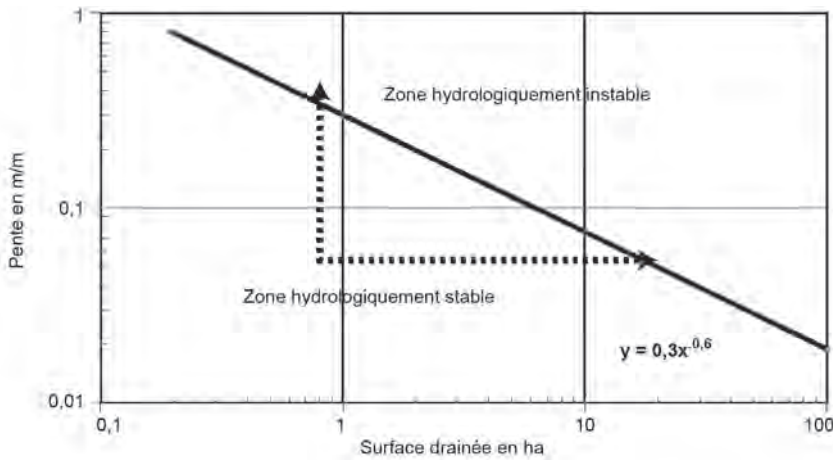


Figure 2

L'enveloppe Montgomery-Dietrich (1994) établie pour le Rwanda (Moeyersons, 2003) divise le terrain en une partie hydrologiquement stable et une partie instable. Par l'augmentation de la pente ou de la surface drainée, un point A qui, à l'origine, se trouve dans la zone stable, peut se retrouver dans la zone hydrologiquement instable.

Les glissements le long des rivières

Un très grand nombre de glissements de terrain cartographiés se trouvent le long des rivières qui montrent une dynamique active d'incision verticale ou latérale. Dans la zone d'extension de la ville de Bujumbura, les crues occasionnent une érosion verticale très considérable des lits de rivière. Le processus d'équilibrage des parois verticales comprend des affaissements gigantesques, menaçant les nouvelles constructions avant même qu'elles soient habitées. Les bords de la Kanyosha, qui jette ses eaux dans le lac Tanganyika au sud de Bujumbura, sont affectés par un grand nombre de glissements qui avancent annuellement de plusieurs mètres et qui dégradent les routes et rendent inhabitables les maisons (MOEYERSONS, 2007). Ainsi, le déplacement de la route nationale n° 7 a été nécessaire. Souvent, les lobes des glissements repoussent la Kanyosha, ce qui donne parfois lieu au barrage temporaire de la rivière. De l'autre côté du rift, à Bukavu et à Uvira, on observe également que les glissements de terrain se localisent de préférence le long des rivières qui incisent activement (MOEYERSONS *et al.*, 2004, 2010).

Les glissements affectent le régime des rivières. Une avancée soudaine d'un glissement peut temporairement bloquer la rivière. L'effet en aval d'un blocage s'exprime en une baisse temporaire du débit de rivière, suivie d'une crue, plus grande que celle à laquelle on pouvait s'attendre en fonction de la pluie. Selon les rapports locaux de 2002, un phénomène pareil s'est passé à Uvira et, en 2010 à Kabezi, à 5 km au sud de Bujumbura, où le centre médical Curgo a été envahi à l'occasion d'une crue de la Nyabage, occasionnée par la cassure d'un barrage de glissement en amont.

Les risques naturels de versant

Il a été démontré (MONTGOMERY et DIETRICH, 1994) que le ravinement et le glissement de terrain rencontrent les mêmes critères topographiques dans une région donnée. La figure 2 montre la ligne qui délimite le bord inférieur du nuage des points des incisions de versants, glissements et ravinements, comme il a été établi dans le sud du Rwanda (MOEYERSONS, 2003) :

$$S_{cr} = 0,3.A^{-0,6} \text{ (1) ;}$$

S_{cr} = la tangente de l'angle de la pente à la hauteur de la tête de l'entaille, en m/m ;

A = la surface drainée vers la tête d'entaille en ha.

Cette ligne (fig. 2) comprend des combinaisons limites de pente naturelle à l'endroit des entailles et de surface drainée vers la tête des entailles. Des combinaisons passant au-dessus de cette ligne courent le risque de ravinements ou de glissements de terrain.

L'enveloppe indique qu'un fossé quasiment horizontal (0,01 m.m⁻¹) peut drainer une surface de l'ordre de 1 000 ha sans que le fond du fossé soit raviné. Par contre, un fossé avec un gradient longitudinal de 46 % n'est capable de drainer qu'une surface inférieure à 1 ha. Une augmentation de la surface drainée ou du gradient longitudinal d'une buse ou d'un déversoir peut avoir comme effet qu'un point sur le terrain, qui à l'origine se situe en dessous de l'enveloppe, monte au-dessus de l'enveloppe (fig. 2). À partir de ce point, une entaille peut se produire. Dans le cas de ruissellement, cette entaille peut se développer en ravin. Dans le cas d'infiltration, des pressions hydrostatiques peuvent s'établir dans le sol, capables de provoquer un glissement.

Le ravinement (voir photo) mérite toute l'attention parce qu'il réduit la surface cultivable, il contribue au dessèchement du sol et parfois il menace des maisons ou des routes et constitue un danger pour les habitants et leur bétail. Le ravinement est plus actif dans les agglomérations urbaines qu'à la campagne à cause des surfaces durcies, maisons et rues. Une ville génère plus de ruissellement qu'une région de campagne. Les villes de Bukavu, Uvira, Bujumbura, Butare, Kigali, Ngoma, Butembo souffrent du ravinement.

Les glissements de terrain sont souvent des décollements rotationnels-translatoires (ROOSE, 1994). Ils affectent les horizons pédologiques superficiels sur des pentes supérieures à 35-40 % dont le substrat comprend une fraction argileuse (DIKAU *et al.*, 1996). À la fin de la saison pluvieuse, de nouvelles cicatrices incisent les flancs de colline. Lors des années pluvieuses, ce type de glissement se produit en grand nombre et affecte de grosses parties des bassins de premier ordre, comme dans la région de Kibuye et de Gikongoro en 1979, autour de Kigali en 1986 et à Mudamsonwa en 1989 (MOEYERSONS, 1989b). BYERS (1992) rapporte des glissements massifs près de Rutoyi (Ruhengeri, Rwanda), à la suite de 140 mm de pluie du 4 au 7 mai 1988.



*Lavaka, ravin géant développé à l'aval d'un déversoir
de la route Kayanza-Bujumbura, Burundi.
© J. Moeyersons*

Les décollements n'affectent généralement qu'une tranche de sol de un à deux mètres. Les entailles sont vite recolonisées, mais un examen approfondi montre que pratiquement chaque colline de la partie déboisée de la crête Congo-Nil au Rwanda et Burundi porte des anciennes cicatrices. Ainsi du côté d'Uvira et de Bukavu, les décollements sont nombreux et de grande taille. Le processus de décollement contribue autant que le ravinement et l'érosion pluviale diffuse à la dénudation et à l'appauvrissement des sols dans la région. Le coût économique des pertes en terres fertiles causées par les décollements est difficile à calculer, mais le phénomène a contribué dans le temps aux famines par la baisse de la productivité des sols les premières années. Le pire c'est que ces décollements sont encore activés par les lignes de lutte antiérosive, essentiellement des fossés collecteurs, sur des pentes trop raides pour ce dispositif (MOEYERSONS, 2003).

Les glissements d'origine sismique/tectonique

MUNYOLOLO *et al.* (1999) remarquent une recrudescence des glissements de terrain à Bukavu, suite à une réactivation sismique locale. L'application du critère topographique de MONTGOMERY-DIETRICH (1994) sur les glissements de Bukavu indique que les grands glissements I, III, V et VI (fig. 3 et 4) sont d'origine sismique (MOEYERSONS *et al.*, 2004). Les glissements II et IV et les 31 glissements en dehors du micro-rift de Bukavu seraient « hydrologiques ».

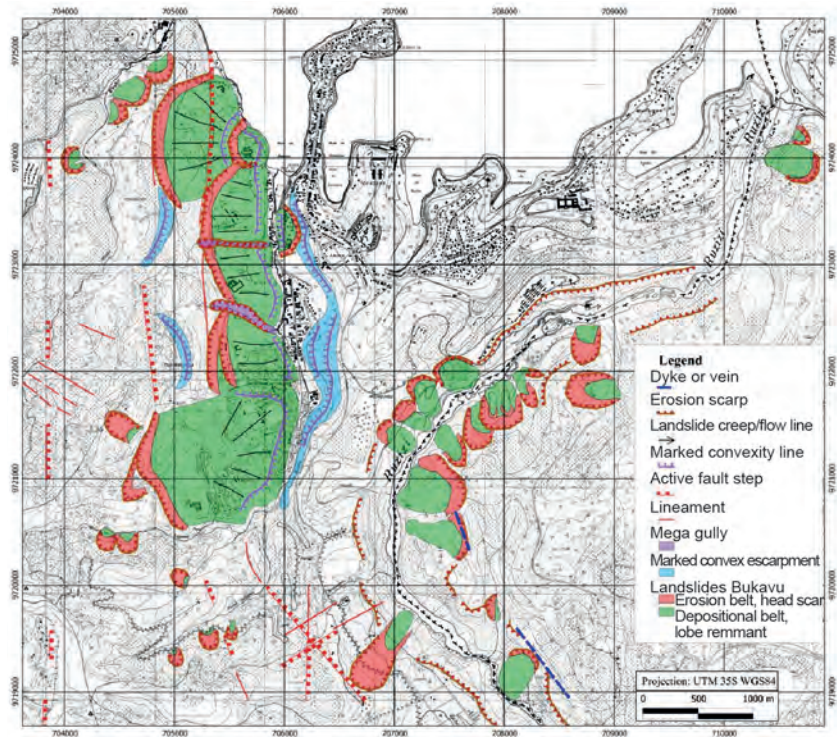


Figure 3
Carte des glissements de terrain à Uvira.
Source : Moeyersons et al., 2004.

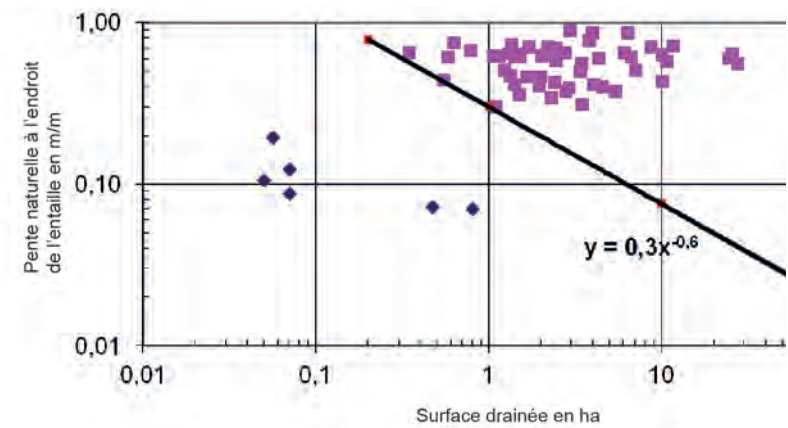


Figure 4
Les glissements dans la région d'Uvira, situés en dessous de l'enveloppe sont d'origine tectonique.

Sur le bord occidental du graben d'Uvira, 60 glissements de terrain ont été cartographiés (MOEYERSONS *et al.*, 2010) et l'application du critère topographique montre que 6 glissements tombent sous l'enveloppe et seraient donc d'origine purement sismique (fig. 5.) Nos analyses à Bukavu, Uvira, Bujumbura, Kigali et Ruhengeri montrent que les glissements sismiques sont de loin les plus grands en taille, mais en même temps les moins nombreux. Ils sont localisés au-dessus ou à proximité de structures tectoniques actives (MOEYERSONS *et al.*, 2004, 2010).

Les glissements et les ravinements dus à l'exploitation de minerais et aux travaux routiers

Les travaux publics, et notamment la construction de routes, mènent assez souvent aux mouvements de terrain artificiels. Le long du réseau routier dans les terrains accidentés des deux bords du rift Kivu-Tanganyika se sont produits des immenses glissements de terrain. Les raisons classiques sont soit la surcharge au sommet de la pente, soit l'enlèvement du support en bas de pente. Des ravinements et affaissements secondaires se produisent souvent aux endroits d'exploitation de minerais, là où le creusement dans le sol est réalisé par un fort jet d'eau. La Muhira, près de Cibitoke, est un exemple de rivière polluée de cette façon.

Le défi des risques naturels

En cas de catastrophe hydrologique, on cherche souvent des solutions dans le domaine de l'ingénierie civile. Des murs de soutènement, des digues, des ponts, des tunnels et d'autres ouvrages, parfois de grandes envergures, ont été construits pour maîtriser des ravins géants (Kigobe à Bujumbura), des rivières (Kalimabenge, Uvira) ou des glissements de terrain (gabions et murs de soutènement pour stabiliser les talus des routes). Généralement, ces travaux exigent des investissements considérables, souvent trop lourds pour les fonds locaux. En plus, leur succès n'est pas toujours garanti. L'expérience avec les ravins de Kinshasa montre que les grands ouvrages sont parfois peu efficaces ou sont même détruits par les forces qu'ils étaient censés maîtriser. Ceci vient du fait qu'il manque souvent une bonne compréhension de la situation en amont de l'endroit où la catastrophe se manifeste. Les crues de rivières, provoquant une érosion fluviale, sont gérées par deux facteurs : une augmentation du taux de ruissellement et des barrages temporaires par des glissements de terrain. Le ravinement est manifestement la conséquence d'une augmentation du taux de ruissellement (MOEYERSONS et TREFOIS, 2008). Les glissements dans la région sont la suite de l'incision verticale des rivières (MOEYERSONS

et al., 2010) et de l'infiltration concentrée sur un point ou le long d'une ligne (MOEYERSONS, 2003). La solution durable pour la grande majorité des risques est la réalisation de la restauration d'une infiltration diffuse. L'ingénierie agricole offre plusieurs solutions à ce problème. Une première solution est le terrassement radical sur des pentes inférieures à 45 %. Après quarante ans sans accident majeur, on voit une application générale du terrassement progressif ou radical au Rwanda et des essais se font au Burundi et à Uvira. Par l'infiltration diffuse qu'il crée (rugosité des champs cultivés intensément), le terrassement en gradin (ou radical) prévient généralement les glissements. En plus, l'infiltration totale qu'il réalise empêche les ravins géants de se développer et conduit en même temps à une bonne alimentation des sources et ainsi à la normalisation du régime fluvial.

Le terrassement radical n'est pas la seule méthode à normaliser la situation hydrologique. En ce qui concerne la réalisation d'une infiltration diffuse, beaucoup d'expérimentations de terrain ont été réalisées (ROOSE et NDAYIZIGIYE, 1996 ; RISHIRUMUHIRWA, 2006 ; KÖNIG, 2006). Les conclusions de ces recherches sont certainement encore valables, surtout quand il s'agit d'une classification des différentes affectations de sol selon leur efficacité relative en conservation des eaux et des sols. En termes absolus, il s'avère également que les utilisations de sol, considérées dans les années 1980 comme étant les plus efficaces (MOEYERSONS, 2004), le sont toujours à l'heure actuelle. Ainsi, aucune ravine ne peut être retrouvée à l'intérieur des plantations de thé, ni dans les bananeraies à sous-étage de jardin potager ou de plantes associées, ni dans les parcelles de café bien paillées.

Il existe aussi des techniques simples pour distribuer l'infiltration uniformément sur une pente. MOEYERSONS (1989a) propose le paillage complet des pentes raides sous culture. Les plantes de couverture sont une autre méthode de la stabilisation structurale du sol et de la maintenance de sa capacité d'infiltration. ROOSE (1994) montre l'effet bénéfique d'une méthode agroforestière d'arbres fruitiers ou fourragers plantés dans les cultures en lignes perpendiculaires à la pente. Les arbres assurent un certain ancrage du sol et les cultures effectuent une infiltration diffuse.

Plus récemment, et dans le même ordre d'idées, les géotextiles ont été lancés. Ces produits perméables en forme de filets ou de tissus, comme de la paille, brisent l'énergie cinétique de la pluie, conduisent l'eau vers la surface du sol sans la moindre concentration et sans que l'effet de compaction et de liquéfaction par les gouttes de pluie réduise la conductivité hydraulique du sol (MOEYERSONS, 1990).

Notons surtout le rôle des arbres dans la stabilisation de pentes raides à sol généralement mince et pierreux. De nombreux exemples au Rwanda et au Burundi montrent qu'une ligne de touffes d'Eucalyptus peut stabiliser les routes de montagne.

Conclusions

Ce chapitre plaide en faveur d'une politique autre que celle d'une correction de situations à la suite d'une catastrophe. L'augmentation en fréquence et gravité des événements exige une politique de prévention, ce qui revient à une réorganisation intégrée des versants, surtout ceux plus raides que 30 %. À la base de toute prévention est la restauration d'une bonne capacité d'infiltration des sols : paillage, terrasses en gradins, talus fixés par des arbustes légumineuses, agroforesterie, cultures couvrant intensément le sol.

Ce principe devrait aussi s'appliquer dans les villes, qui sont généralement gravement affectées par les risques hydrologiques. Que chaque habitation soit munie d'une citerne pour collecter les eaux de pluie et d'un jardin au sol bien couvert pour absorber l'excédent des pluies. Un bon système d'égouts et de drainage qui conduit les eaux non interceptées vers la vallée est un défi pour chaque ville.

Bibliographie

- BRADSHAW C., SODHI N., PEH K., BROOK B. W., 2007** – Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 13 : 2379-2395.
- BYERS A., 1992** – Soil loss and sediment transport during the storms and landslides of May 1988 in Ruhengeri prefecture, Rwanda. *Natural Hazards*, 5 : 279-292.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN M.-L., 1996** – *Landslide recognition*, Chichester, John Wiley & Sons, 251 p.
- DORE M., 2005** – Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? *Environment International*, 31 : 1167-1181.
- GOMMES R., 1996** – *Climat et crise rwandaise*. Département du développement durable (SD) de l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), <http://www.fao.org/sd/frdirect/eian0006.htm>
- HULME M., DOHERTY R., NGARA T., NEW M., LISTER D., 2001** – African climate change: 1900-2100. *Climate Research*, 17 : 145-168.
- JOST CH., 1987** – *Contraintes d'aménagement en région volcanique tropicale*. Thèse de doctorat, université nationale du Rwanda, faculté des lettres, département de géographie, 283 p.
- KÖNIG D., 2006** – « Agroforesterie au Rwanda : son efficacité et ses limites ». In Ratsivalaka S., Serpenté G., De Noni G., Roose É. (éd.) : *Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols*, Actes des journées scientifiques du réseau Érosion et GCES de l'AUF, Antananarivo (Madagascar), 25-27 octobre 2005, Paris, Éditions scientifiques AUF-GB : 71-75.
- MOEYERSONS J., 1989a** – La nature de l'érosion des versants au Rwanda. *Annales, Musée Roy. Afr. Centr.*, série Sciences économiques, 19, 396 p.
- MOEYERSONS J., 1989b** – « Image 672 ». In Moeyersons J. : *African Geographic Pictures*, <http://www.metafro.be/geopic/geography/672/picture>
- MOEYERSONS J., 1990** – La capacité d'infiltration d'un sol ferrallitique au Rwanda : comparaison des résultats obtenus par un perméamètre annulaire, un œdomètre et deux types de simulateurs de pluie. *Bulletin du Réseau Érosion*, 10 : 38.
- MOEYERSONS J., 2003** – The topographic thresholds of hillslope incisions in south-western Rwanda. *Catena*, 50 : 381-400.
- MOEYERSONS J., 2004** – Le rôle de la couverture végétale dans la redistribution des sédiments et du carbone des sols par le ruissellement : colline de Rwaza, Butare, Rwanda. *Bulletin du Réseau Érosion*, 23 : 99-112.

- MOEYERSONS J., 2007** – « Image 2085 ». In Moeyersons J. : *African Geographic Pictures*, <http://www.metafro.be/geopic/geography/2085/picture>
- MOEYERSONS J., TREFOIS PH., LAVREAU J., ALIMASI D., BADRIYO I., MITIMA B., MUNDALA M., MUNGANGA D. O., NAHIMANA L., 2004** – A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo. *Engineering Geology*, 72 (1-2) : 73-87.
- MOEYERSONS J., TREFOIS PH., 2008** – « Desertification and changes in river regime in Central Africa: possible ways to prevention and remediation ». In Gabriels D., Cornelis W., Eyletters M., Hollebosch P. : *Combating desertification assessment, adaptation and mitigation strategies*, Proc. of the Conference on Desertification, Ghent, 23 January 2008, Unesco Centre for Eremology, Ghent University, Belgium : 144-156.
- MOEYERSONS J., TREFOIS PH., NAHIMANA L., ILUNGA LUTUMBA, 2010** – River and landslide dynamics on the western border of the Tanganyika rift, Uvira, D.R. Congo. *Natural Hazards*, 53 (2) : 291-311.
- MONTGOMERY D. R., DIETRICH W. E., 1994** – « Landscape dissection and drainage area-slope thresholds ». In Kirkby M. J. (ed.) : *Process Models and Theoretical Geomorphology*, Chichester, Wiley : 221-245.
- MUHIGWA J.-B., 1999** – Analyse des perturbations dans le régime pluviométrique du Sud-Kivu durant les 50 dernières années. *Mus. roy. Afr. centr., Dépt. Géol. Min., Rapp. Ann.* 1997 et 1998 : 112-121.
- MUHINDO SAHANI, 2004** – *Érosion des sols et potentiel agroforestier de quelques ligneux en milieu paysan dans la zone agroécologique de Beni-Lubero, (Nord-Kivu/RDC)*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un DES interuniversitaire en gestion des risques naturels, Communauté francophone de Belgique, université de Liège et faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, 70 p.
- MUNYOLOLO Y., WAFULA M., KASEREKA M., CIRABA M., MUKAMBILWA K., MAVONGA T., CIRIMWAMI M., MUHIGIRWA B., BAGALWA R., MUNDALA M., 1999** – Recrudescence des glissements de terrain suite à la réactivation sismique du bassin du lac Kivu. Région de Bukavu (Rép. Dém. Congo). *Mus. roy. Afr. centr., Dépt. Géol. Min., Rapp. Ann.* 1997 et 1998 : 285-298.
- RISHIRUMUHIRWA TH., 2006** – « Lutte antiérosive et recherche en gestion et conservation des sols au Burundi ». In Ratsivalaka S., Serpentini G., De Noni G., Roose É. (éd.) : *Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols*, actes des journées scientifiques du réseau Érosion et GCES de l'AUF, Antananarivo (Madagascar), 25-27 octobre 2005, Paris, Éditions scientifiques AUF-GB : 57-63.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la GCES. *Bull. Sols FAO*, Rome, 70, 420 p.
- ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1996** – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.
- RWILIMA CH., FAUGÈRE T., 1981** – *Évolution entre 1958 et 1979 du couvert forestier et du débit des sources dans trois régions naturelles du Rwanda*. Kigali, Geomines-Somirwa, AIDR, 14 p.
- TONDEUR G., 1951** – Rapport annuel de la Mission antiérosive pour l'exercice 1950. *Bull. Agricole du Congo belge*, 17 (4) : 803-830.
- VANDECASTEELE I., MOEYERSONS J., TREFOIS PH., 2010** – « An assessment of the spatial and temporal distribution of natural hazards in central Africa ». In Jürgen Runge (ed.) : *Paleoecology of Africa*, 30, special issue: *African Palaeoenvironments and Geomorphic Landscape Evolution*, London, UK, CRC Press, Taylor & Francis Group : 279-300.
- WEIS G., 1959** – Le pays d'Uvira, étude de géographie régionale sur la bordure occidentale du lac Tanganika. *Acad. Roy. Sci. Coloniales, Cl. Sci. nat.*, Mem. in-8 degrees, n.s., f. 5.

Une perspective écologique sur la restauration des sols dégradés

Thomas Francis SHAXSON

Éric ROOSE

Introduction

Jusque vers les années 1960, l'objet de la « conservation de l'eau et des sols » consistait essentiellement à construire des fossés, des talus, des terrasses et des billons alignés sur les courbes de niveau en vue de lutter contre l'érosion dans les régions tropicales et méditerranéennes. Il était entendu qu'aussi longtemps que ces structures physiques ne cassaient pas, le ruissellement ne causait pas de dommage et que leur entretien préservait la fertilité des sols. Cependant, ces structures furent aussi appliquées sur des sols déjà érodés, mais elles n'ont pas, par elles-mêmes, restauré la productivité des sols endommagés. À cette époque, le sol était considéré comme l'horizon superficiel couvrant la roche altérée dans lequel les plantes s'enracinaient.

Lorsqu'en 1958, Shaxson devint officier de la « conservation des sols » au Nyassaland (maintenant le Malawi), quelques essais de paillage avec des herbes ont montré qu'on pouvait réduire le ruissellement et l'érosion en absorbant l'énergie des gouttes de pluie. L'observation de l'effet favorable des fines racines des herbes sur la structure du sol a montré qu'on pouvait améliorer le sol avec des matières organiques vivantes ou mortes et en même temps réduire les risques de ruissellement et d'érosion. Après cela, le problème de la compaction du sol par les grosses gouttes de pluie, par le

piétinement du bétail et des paysans et par les roues des tracteurs devint un facteur évident de l'érosion considérée comme la cause majeure de la baisse des rendements des sols, à la fois sur les petits champs villageois et dans les fermes commerciales. Les inondations et le dépôt des terres érodées étaient des problèmes majeurs pour les gouvernements tant à l'échelle nationale que dans chaque district.

À son arrivée au Brésil dans les années 1980, Shaxson fut très étonné de voir que les fermes commerciales des paysages du centre et du sud du Brésil étaient couvertes de nombreuses structures physiques de conservation des sols : elles souffraient toujours des mêmes problèmes sévères de compaction, ruissellement excessif, érosion et inondation. Cependant, quelques fermiers à l'esprit pionnier avaient commencé à développer des systèmes de culture comportant le semis direct des graines à travers la litière des résidus des cultures précédentes, avec beaucoup de succès.

Le ruissellement et l'érosion ont quasiment disparu, tandis que le rendement des cultures a augmenté et que leur coût de production diminuait. Les rivières, qui jadis débordaient en saison des pluies et s'asséchaient en saison sèche, coulent désormais de façon continue, même en période sèche.

Les recherches sur le mode de fonctionnement du semis direct sous litière ont montré qu'une fois que l'horizon compact et l'horizon superficiel ont été aérés et permettent l'entrée des pluies les plus intenses dans le profil, la litière des résidus des cultures précédentes devient une ressource de carbone pour la transformation microbiologique des conditions du sol favorisant en même temps la croissance des plantes et la conservation de l'eau et du sol. Plus tard, des recherches et observations au Brésil et ailleurs ont confirmé cet aspect du sol considéré comme une entité biologique (FAO, 1982), ce qui a remis en cause le concept de conservation de l'eau et des sols et fourni les bases des principes qui vont suivre (SHAXSON, 2006).

Il y a des signes avant-coureurs du déclin du fonctionnement de l'écosystème : l'extension de zones dénudées dans les champs, l'envahissement par des mauvaises herbes, la dégradation de la répartition des plantes arbustives et graminéennes, le dessèchement rapide du sol après les pluies, l'augmentation de l'érosion et le décapage des horizons de surface, l'exposition d'horizons de subsurface moins fertiles, la baisse des rendements pour des traitements semblables, la dégradation du régime hydrologique des rivières. Ces signes sont des conséquences et non des causes primaires de la dégradation (ROOSE, 1996). Ce sont des indicateurs de la mauvaise adaptation des méthodes d'aménagement du paysage qui réduit la résilience et la durabilité du potentiel de ces terres (SHAXSON *et al.*, 1989). Dans le passé, nos échecs face à la restauration de la productivité des sols proviennent souvent de notre perception erronée des causes profondes de la dégradation des sols et aussi des remèdes à appliquer (SHAXSON, 2006 ; ROOSE *et al.*, 2011).

Une approche écologique de la restauration des sols et du maintien de leur santé

Les plantes fournissent les matériaux indispensables à la vie animale : elles requièrent des conditions édaphiques favorables à leur développement, mais aussi à la santé des êtres vivants dans les horizons de surface du sol où se développent les racines (UPHOFF *et al.*, 2006). Il faut donc considérer les sols comme des entités vivantes et des écosystèmes particulièrement complexes. Leur fonctionnement et leurs relations sont dynamiques et potentiellement durables, mais elles peuvent être rompues par l'application d'un aménagement ou d'un usage inappropriés.

À la lumière de ce concept, dans une zone donnée, il est possible d'étudier les succès et les erreurs des aménagements des divers paysages (dont les sols sont des constituants) en vue d'expliquer la dégradation de la productivité passée et la réaction des sols à un aménagement dans le futur, de décider la meilleure façon de restaurer durablement le paysage en tenant compte du climat et de la topographie et finalement de planifier une stratégie d'aménagement optimal pour chaque secteur fonctionnel du paysage en vue d'assurer la durabilité de sa productivité.

« La capacité d'une terre à produire durablement des plantes et de l'eau dépend d'abord du maintien du sol en bonne condition pour permettre le déroulement de la vie sous toutes ses formes dans le système sol-plante. Ces activités biologiques vont fabriquer ou restaurer l'architecture de la porosité et de la structure du sol ; c'est sa capacité à récupérer ses propriétés physiques dégradées ou sa résilience face aux agressions climatiques ou aux aménagements néfastes » (FAO, 2008).

L'écosystème sol-plantes

La capacité du sol à produire des plantes est le résultat des effets, à différentes échelles, des interactions entre les composantes physiques × chimiques × biologiques × hydrologiques du milieu et leurs effets à l'interface racines-rhizosphère :

- au niveau physique : la structure et la porosité du sol liées à l'aération, la pénétration des racines, le stockage en eau et l'infiltration ;
- au niveau chimique : les nutriments assimilables, les exsudats des racines et des micro-organismes du sol, les argiles actives et leur capacité d'échange des cations ;
- au niveau biologique : tout ce qui vit dans le sol, y compris les racines, les matières organiques sur et dans le sol comme source d'énergie et de nutriments pour les êtres vivants ;

– au niveau hydrologique : la capacité d'infiltration de l'eau, la rétention de l'eau à diverses tensions, la transmission en profondeur des eaux libres excédentaires.

Pour la restauration et l'entretien des sols dégradés, il faut garder à l'esprit la fourniture suffisante (dans le temps et dans l'espace) des facteurs interdépendants.

– L'eau assurant le bon fonctionnement au-dessus et en dessous de la surface du sol ; les zones arides en manquent régulièrement.

– La porosité du sol, avec un volume suffisant et une bonne répartition entre les particules et les agrégats, permettant un flux adéquat d'oxygène et de CO₂ pour la respiration et une haute capacité de stockage de l'eau entre le point de flétrissement et la capacité au champ, tout en gardant des pores largement ouverts pour permettre le drainage des eaux excédentaires vers la nappe profonde.

– Les matières organiques riches en carbone : une source d'énergie et de nutriments pour les plantes et autres éléments vivants. Ces matières carbonées sont synthétisées par la photosynthèse des plantes et sont présentes dans les feuilles vivantes et mortes, leurs tiges et racines et dans les bactéries + champignons, les animaux, qui à leur mort sont recyclés dans les MO du sol, devenant à leur tour des sources d'énergie et de nutriments pour les générations futures.

– Les nutriments pour renouveler les stocks épuisés, particulièrement l'azote pour la synthèse des protéines (si possible fournies par des espèces fixant l'azote de l'air), mais aussi le phosphore, la potasse et les micronutriments provenant de l'altération des roches.

– Divers organismes vivant dans le sol pour les multiples fonctions qu'ils assurent dans tous les systèmes sol-plantes et leurs rôles dans l'amélioration de la durabilité.

La cause principale de la dégradation de la santé du sol et de sa productivité se trouve dans la perte des matières organiques (MO) sur et dans le sol : elle contribue en effet à la protection de la surface du sol contre les températures extrêmes et les pluies intenses, aux stocks de nutriments et d'énergie, à la capacité d'échange des cations et la production d'humus qui participe à la stabilité structurale et à la protection de la porosité.

La restauration des sols doit commencer par identifier la cause originale de la dégradation des MOS et réduire ce danger. Ensuite, les mesures doivent être prises pour remédier à ces causes de façon durable pour assurer leur pérennité.

Les facteurs endommageant les sols

Les techniques culturales

Les sols bien structurés favorisent la croissance des plantes et la pénétration des eaux, stockent plus d'eau utile que ceux qui ont été endommagés par des labours, la pulvérisation ou la compaction du sol.

Le déplacement du sol par les outils, en particulier les charrues à disques lourds, presse les particules du sol et réduit leur macroporosité (tabl. 1). Par ailleurs, le labour introduit de l'air dans le sol, augmente la respiration des organismes vivant dans le sol, oxyde les matières organiques du sol et rejette dans l'atmosphère du gaz carbonique à effet de serre

Tableau 1
Perte de matières organiques du sol
sous l'influence de diverses techniques culturales.

Type de travail du sol	Perte de MO en kg/ha/19 jours
Charrue + hersage à disques	4 300
Charrue	2 230
Hersage à disques	1 840
Chisel	1 720
Semis direct	860

Source : GLANZ, 1995, in FAO 2005a : 18.

Ces techniques culturales entraînent la perte de matières organiques liant les particules de sol (radicelles et micelles de champignons) et des colles biologiques : ces pertes vont réduire l'aptitude du sol à fonctionner comme un milieu favorisant la croissance des plantes (MOEBIUS-CLUNE *et al.*, 2011 ; SOLOMON *et al.*, 2007). Ces pertes de MOS entraînent une baisse de production sans changement de technique culturale (EVANS *et al.*, 1999 ; LAHMAR *et al.*, 2012) (tabl. 2).

Tableau 2
Signes de dégradation d'un sol déforesté et cultivé à la main pendant 80 ans :
chronoséquence dans l'ouest du Kenya de 1920 à 2000.

Durée depuis le défrichement	5	10	20	30	40	50	60	80
Score moyen de 3 indicateurs*	12	3+	3	2+	2	2-	2-	1

Source : MARENDA et BARRETT, 2009.

* Combinaison de trois indicateurs de dégradation du sol : le taux de carbone organique dans le sol en % + masse de paille du maïs (kg/ha) + poids des épis de maïs (kg/ha). Les poids de paille et des épis de maïs suivent étroitement la réduction du taux de MOS pendant toute la période, d'abord rapide, puis plus lente.

Autres actions causant la perte de la structure du sol

En plus des pertes de MO liant les particules du sol (racines, champignons et humus), les pluies de forte intensité et le passage des hommes, du bétail et des roues des véhicules sur les sols nus peuvent entraîner le tassement du sol. De même, la réaction du sol poussé vers l'aval par les engins de travail du sol, surtout le labour aux disques lourds, compacte le sol en surface et en profondeur,

écrasant la macroporosité, réduisant la pénétration des eaux de pluie, la circulation du CO₂ dans la zone occupée par les racines et la croissance des plantes (ROOSE, 1996).

Réalisées en condition sèche, ces actions pulvérisent l'horizon de surface et réduisent la porosité et donc la perméabilité, l'infiltration des eaux de pluies au détriment des plantes et du débit des eaux de nappe qui nourrissent les rivières. La dégradation de la structure du sol favorise donc le développement du ruissellement plutôt que l'infiltration des eaux de pluie (ROOSE, 1996).

Le surpâturage et d'autres formes de cultures exportant les résidus de culture et les nutriments

Le rythme de réhabilitation des sols dégradés, simplement par l'altération géologique des roches et autres niveaux profonds du sol, est nettement plus lent si les plantes sont absentes. Elles fournissent des matériaux biologiques riches en carbone grâce aux acides organiques complexes percolant à travers tout le profil.

L'exportation de végétaux par les animaux, le feu et/ou la récolte, à un rythme que les plantes ne peuvent suivre, représente pour le sol une perte potentielle de matières organiques (feuilles, tiges et racines) et des nutriments qui y sont associés.

Les aménagements

Dans les zones sèches, les paysans qui y vivent depuis longtemps ont accumulé progressivement une expérience et des connaissances sur le milieu local qui peuvent servir de point de départ pour l'amélioration des aménagements en vue d'augmenter la productivité durable de leurs sols, plantes et animaux (LAHMAR *et al.*, 2012). « Même en milieu semi-aride des savanes sèches, quand on cesse de perturber le sol, il est possible de reconstituer progressivement le couvert végétal et la matière organique du sol. Là où la demande en résidus de culture est élevée pour nourrir le bétail, il faut gérer la biomasse afin qu'elle améliore la productivité sur une longue période » (A. Kassam, pers. comm. 2012). La clé de la restauration du sol est la gestion de l'eau, des plantes et des MO du sol, chacun renforçant l'action améliorante des autres.

Réduction du travail du sol dès qu'il est en bon état

De cette façon, l'équilibre dynamique se développe et se maintient entre les composantes chimiques x physiques x biologiques x hydrologiques du système sol-plantes.

Tirer profit des légumineuses

En introduisant, encourageant et maintenant des légumineuses capables de fixer l'azote de l'air, on contribue à la nutrition des plantes dans la zone parcourue par les racines.

Introduire et maintenir des rotations

La rotation entre diverses cultures et l'intensification des parcours sont bénéfiques pour maintenir la diversité biologique et limiter les pestes, les maladies et les mauvaises herbes, de la même façon qu'un repos ou une jachère suffisamment longue peut contribuer à rétablir le taux de MO en brisant le cycle de vie des pestes dangereuses, des maladies et des adventices.

Assurer la capture, la rétention et l'infiltration de toutes les pluies

On l'obtient en couvrant toute la surface du sol par les plantes vivantes et leurs résidus disposés perpendiculairement à la pente, jusqu'à atteindre si possible 100 % de sol couvert. Ceci diminue la battance des pluies intenses et la compaction par le passage des gens et des roues. C'est le point de départ des activités biologiques du sol qui réduit les températures extrêmes dans les horizons superficiels, les plus riches en racines. En aménageant des bassins de 20 à 200 cm de diamètre (zaï, tassa, demi-lunes, cuvettes, billonnage cloisonné), on concentre sur une zone limitée au pied des plantes le peu d'eau disponible et on lui laisse le temps de s'infiltrer.

Dans les zones sèches cultivées du Zimbabwe, l'effet positif potentiel de l'usage des engrais est pratiquement contrecarré par le manque d'eau dans le sol, même quand les cultures sont plantées dans des petites cuvettes (WAGSTAFF et HARTY, 2010).

Utiliser les synergies entre les quatre facteurs

Certaines exigences d'un système d'usage du sol peuvent être remplies par les synergies de ces quatre principes appliqués ensemble (tabl. 3). Ces quatre moyens, utilisés ensemble, ont un impact positif sur la santé et les qualités des horizons racinaires. Cela demande du temps (pas seulement une saison) pour réajuster les écosystèmes de sols, mais ensuite ils fournissent de grands avantages même si les conditions climatiques sont variables. L'expression optimale de la productivité des cultures et pâtures dépend aussi de la présence prolongée de taux d'humidité et de nutriments suffisants sous des formes assimilables par les plantes. S'il manque un seul facteur, il va limiter l'impact positif des autres facteurs de production.

Ces principes sont applicables sur les zones cultivées ou pâturées, en milieux secs ou humides. Cependant en milieux cultivés, il faut prévoir des applications spécifiques de fumier et d'engrais minéraux complémentaires. En appliquant ces mesures appropriées pour réaliser les meilleures conditions, ces paysans peuvent être convaincus de pratiquer les usages de l'agriculture de conservation appliqués depuis plus de quarante années au Brésil et plus récemment en Afrique (THIERFELDER *et al.*, 2012). Les bénéfices de telles améliorations ont été perçus et appréciés durant de nombreuses années à l'échelle des fermes, des communautés locales, du bassin versant et de la région entière (PIERI *et al.*, 2002 ; MARONGWE *et al.*, 2011). Lorsque ces principes sont appliqués en même temps que les aménagements physiques adaptés, la production devient plus régulière, même lorsque le climat connaît de grosses variations.

Tableau 3

Améliorer les conditions dans la zone d'enracinement en adoptant quatre principes clés de tout aménagement.

Pour arriver à ces fins → utiliser ces moyens →	Couverture du sol : feuilles d'arbres, résidus de culture, plantes de couverture	NO-TILLAGE perturbation minimale une fois le sol en bon état, semis direct sous litière	Légumineuse pour fixer l'azote de l'air et apporter des nutriments aux plantes	Rotation ou associations pour améliorer la biodiversité (sécurité)
Reconstituer les conditions de dynamique des sols ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Simuler les conditions optimales du sol forestier ⇒	↑↑	↑↑		
Maximiser l'infiltration, réduire le ruissellement ⇒	↑↑	↑↑		
Minimiser la compaction par les averses et l'impact de la circulation des hommes et des machines ⇒	↑↑	↑↑		
Minimiser les pertes en sol par le ruissellement et par le vent ⇒	↑↑	↑↑		
Réduire l'évaporation de l'humidité de la surface du sol ⇒	↑↑			
Réduire l'évaporation des horizons superficiels ⇒	↑↑	↑↑		
Réduire les fluctuations de température à la surface du sol ⇒	↑↑			
Fournir régulièrement en MO = substrat pour la vie microbienne ⇒	↑↑			
Réduire l'oxydation des MO du sol et les pertes de CO ₂		↑↑		
Accélérer la récupération de la porosité du sol par les êtres vivant dans le sol ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Maintenir la structure naturelle en horizons du sol par les actions biologiques	↑↑	↑↑		
Augmenter la CEC de la zone racinaire pour stocker les nutriments épanchés ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Augmenter le taux d'azote dans la zone racinaire ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Augmenter la production de biomasse ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Recycler les nutriments ⇒	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Réduire les pestes				↑↑

Source : KASSAM et al., 2011.

Conclusions

Une approche écologique de cette nature fournit un ensemble de principes pour estimer l'efficacité des efforts fournis jadis pour porter remède aux sols dégradés. En même temps, ces principes suggèrent comment optimiser la planification et l'exécution future des aménagements et de l'utilisation des sols.

Les conséquences des actions de régénération, de protection et de productivité des sols décrits plus haut sont conformes au concept plus large de l'amélioration de la gestion de l'eau et des sols (*better land husbandry* ou la GCES), à l'échelle des paysages (SHAXSON *et al.*, 1989 ; ROOSE, 1996).

De nouvelles recherches démontrent que, lorsque le taux de MO du sol est descendu trop bas, les cultures ne répondent plus à l'application de fumures minérales : la croissance de leur production ne couvre plus le coût des engrais. Ces résultats confirment que le maintien d'un niveau suffisant de MO dans le sol est essentiel tant pour l'infiltration de l'eau et son stockage dans les horizons parcourus par les racines, que pour les êtres vivant dans le sol qui interviennent pour la croissance des plantes (MARENIA et BARRETT, 2009 ; RISHIRUMUHIRWA, 2006 ; ROOSE *et al.*, 2011).

Bibliographie

EVANS J., BANDA A., SEYMOUR J., 2010 – Organic matter – key to agriculture's sustainability. In: *Agriculture for Development* 10 : 13.

DERPSCH R., ROTH C.H., SIDIRAS N., KOPKE U., 1991 – (in portugese) *Controle da erosão no Parana, Brasil*. Sonderpublikation der GTZ, 245, Eschborn, Germany, 272 p.

FAO, 1982 – *World Soil Charter*. 5 p, www.fao.org/docrep/T0389E/T0389E0b.htm.

FAO, 2005a – « The importance of organic matter ». In Bot A., Benites J. (eds) : *Soils Bulletin*, 80, FAO, Rome : 18.

FAO, 2005b – « Drought-resistant soils: optimization of soil moisture for sustainable crop production ». In Bot A., Benites J. (eds) : *Topic 2, item 8, on CD*, Rome, FAO.

FAO, 2008 – An international workshop 'Investing in sustainable crop intensification : the case for improving soil health'. *Integrated Crop Management*, 6 : 90, Rome, FAO.

FAO, 2011 – *Save and grow: a policymakers guide to the sustainable intensification of smallholder crop production*. Rome, FAO, 102 p.

KASSAM A., FRIEDRICH T., SHAXSON F., REEVES T., PRETTY J., DE MORAES SÁ J. C., 2011 – Production systems for sustainable intensification: integrating productivity with ecosystem services. *Technikfolgenabschätzung*, 38-45 : 40, Karlsruher Institut für Technologie.

LAHMAR R., BATIONO B. A., LAMSO N. D., GUÉRO Y., TITTONELL P., 2012 – Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices for soil restoration. *Field Crops Res.*, 132 : 158-167.

MARENIA P., BARRETT C. B., 2009 – State-conditional fertilizer yield response on western Kenyan farms (2002-2009). *American J. Agric. Economics*, 91, 4 : 91-106.

MARONGWE L., KWAZIRA K., JENRICH M., THIERFELDER C., KASSAM A., FRIEDRICH T., 2011

– An African success: the case of conservation agriculture in Zimbabwe. *Intl. J. Agric. Sustainability*, 9, 1 : 153-161.

MOEBIUS-CLUNE B. N., VAN ES H. M., IDOWU O. J., SCHINDELBECK R. R., KIMETU J. M., NGOZE S., LEHMANN J., KINYANGI J. M., 2011 – Long-term soil quality degradation along a cultivation chronosequence in western Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141 : 86-99.

NGWIRA A., THIERFELDER C., LAMBERT D., 2012 – Conservation agriculture, systems for Malawian smallholders: long-term effects on crop productivity, profitability and soil quality. *Renewable Agriculture and Food Systems* : 1-14.

PIERI C., EVERS G., LANDERS J., O'CONNELL P., TERRY E., 2002 – *No-till farming for sustainable rural development*. Washington, World Bank, Agriculture and Rural Development Working Paper, 65 p.

RISHIRUMUHIRWA TH., 2006 – « Lutte antiérosive et recherches en gestion conservatoire de l'eau et des sols au Burundi ». In Ratsivalaka S., Serpantié G., De Noni G., Roose É. (éd.) : *Érosion et GCES*, Paris, Éditions AUF-GB : 57-63.

ROOSE É., 1996 – *Land Husbandry – components and strategy*. Rome, FAO/UN, FAO Soils Bulletin, 70, 380 p.

ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011 – Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (3) : 1-12.

SHAXSON T. F., 2006 – Re-thinking the conservation of carbon, water and soil: a different perspective. *Agronomie*, 26 : 1-9.

SHAXSON T. F., HUDSON N. W., SANDERS D. W., ROOSE É., MOLDENHAUER W. C., 1989 – Land husbandry: a framework for soil and water conservation. Ankeny, (USA) *Soil & Water Cons. Soc. + World Assoc. Soil & Water Cons.*, 64 p.

SOLOMON D., LEHMANN J., KINYANGI J., AMELUNG W., LOBE I., PELL A., RIHA S., NGOZE S., VERCHOT L., MBUGUA D., SKJEMSTAD J., SCHÄFER T., 2007 – Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems : *Global Change Biology*, 13 : 1-20.

THIERFELDER C., CHEESMAN S., RUSINAMHODZI L., 2012 – Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture cropping systems in Southern Africa. *Intl. J. Agric. Sustainability*, 11 (2) : 108-124.

UPHOFF N., BALL A. S., FERNANDES E., HERREN H., HUSSON O., LAING M., PALM C., PRETTY J., SANCHEZ P., SANGINGA N., THIES J. (EDS), 2006 – *Biological approaches to sustainable soil systems*. Boca Raton (USA), CRC Press/Taylor & Francis, 764 p.

WAGSTAFF P., HARTY M., 2010 – The impact of conservation agriculture on food security in three low veldt districts of Zimbabwe. *Trócaire Development Review* : 67-84.

Conclusions de la première partie

La dégradation de la productivité des sols et les types d'érosion

Éric ROOSE

Pour restituer durablement la capacité de production des sols dégradés, il importe d'abord d'évaluer les processus d'érosion et les facteurs en cause.

Dans un premier chapitre, les auteurs ont montré les liens qui existent entre les types d'érosion, les pertes de matières organiques (MO) et la dégradation du sol et de sa productivité, non seulement à court mais à moyen terme, car les sols ont une mémoire (arrière-effet de l'érosion).

Face au risque érosif, il est donc recommandé d'entretenir des systèmes de production intensifs couvrant parfaitement la surface du sol (dissipation de l'énergie des gouttes de pluie) tant pour réduire les pertes de nutriments par érosion que pour enrichir la surface du sol en MO et entretenir les activités de la faune. Il a été démontré que l'érosion en nappe sélective vis-à-vis des particules légères (MO) et fines (argile + limons) est bien plus délétère que le décapage de la surface du sol (à érosion égale). Enfin, on a observé que la battance des pluies sur les sols mal protégés entraîne une dégradation de la structure de l'horizon de surface, le développement de croûtes de battance qui réduisent drastiquement l'infiltration des eaux de pluie, son stockage dans le sol et par conséquent, le rendement des cultures. Il est donc plus facile d'entretenir le sol plutôt que de restaurer un sol dégradé.

Dans un deuxième chapitre, les pertes de nutriments par érosion et drainage ont été mesurées en trois zones agroécologiques : la forêt dense humide (climat humide guinéen), la savane arborée en milieu soudanien semi-humide et la

savane herbacée en milieu semi-aride sahélien. Sous couvert naturel dense, il y a peu d'érosion, mais des pertes significatives de nutriments dans les eaux de drainage. Sous cultures, les pertes dépendent à la fois de l'agressivité des pluies, de la surface dénudée du sol et des pentes, ce qui explique l'acidification et la désaturation en bases des horizons superficiels des sols des zones humides et semi-humides. L'importance des pertes de fumure organique et minérale est telle, qu'en dehors des longues jachères arborées protégées, la restitution des nutriments n'est jamais atteinte sans des apports massifs de fumure organique et de compléments minéraux peu disponibles et rarement rentables.

Dans le troisième chapitre, les liens sont rappelés entre les phénomènes catastrophiques (ravinement, glissement de terrain, inondation) et la couverture végétale cultivée des versants. Le défrichement et la dénudation partielle de la surface du bassin versant entraînent des modifications hydrologiques non seulement à l'échelle des champs, mais aussi des rivières : le ruissellement augmente et provoque des ravinements et des inondations souvent à l'origine des grands glissements de terrain. Là aussi, la mise au point de systèmes de production couvrant bien le sol et produisant beaucoup de biomasse facilite l'infiltration homogène sur toute la surface du bassin et peut apporter des solutions durables aux problèmes hydrauliques causés par les crues à l'exutoire des rivières.

Enfin, en guise de conclusion de ces résultats et de son expérience en divers pays, le Dr Shaxson montre combien il est urgent d'analyser localement les causes profondes de la dégradation des sols, les facteurs sur lesquels on peut compter pour améliorer durablement la productivité d'un terroir dégradé. La mauvaise gestion de la biomasse semble la cause primaire de cette dégradation, mais l'érosion peut à son tour accélérer les transferts de MO. La restauration de la productivité des sols ne peut donc être durable qu'en gérant en même temps la dynamique de l'eau, l'augmentation de la biomasse, la restitution de la fumure organique et minérale. On verra dans la deuxième partie les divers modes possibles de gestion de cette biomasse : le brûlis, la transformation en fumier ou compost, le paillage, l'enfouissement des résidus de culture, les jachères forestières ou de légumineuses, etc.

Partie 2

La restauration des sols par la gestion des matières organiques et minérales des agrosystèmes



< © IRD/É. Roose – Gestion de la biomasse à l'échelle d'un terroir montagnard :
parcours de jour par le troupeau du massif calcaire, parcage de nuit autour
des fermes, puis dispersion du fumier dans les champs cultivés en terrasses.
Les arbres apportent un complément de biomasse aux sols. Rif, Maroc.

Dans la première partie de cet ouvrage, les auteurs ont montré les relations existantes entre la dégradation des sols, la minéralisation et la perte de MO, les divers types d'érosion et la réduction de la productivité des sols.

Dans cette deuxième partie, sont explorés les divers systèmes de gestion de la biomasse produite. Plusieurs problèmes se posent pour optimiser le travail et l'efficacité de la valorisation des MO disponibles.

Tout d'abord la qualité de la biomasse. Faut-il choisir des végétaux riches en cellulose, en eau et en azote (pailles, herbacées, adventices, plantes de couverture, légumineuses, etc.) qui donnent un humus facilement minéralisable, lequel va restituer rapidement les nutriments qui les constituent ? Vaut-il mieux choisir une biomasse plus riche en lignine (arbustes, haies vives, bois raméal fracturés, BRF, tiges de cotonniers, alignement d'arbres et vergers) évoluant progressivement en humus stable (demi-durée de vie de plusieurs dizaines, voire centaines d'années) qui assure la stabilité structurale, la porosité, la perméabilité des horizons humifères, mais bloque plus longtemps les nutriments dans les grosses molécules organiques du sol ? On peut aussi choisir de combiner les deux, par exemple en exploitant les haies d'arbustes légumineuses dont les feuilles et jeunes tiges, riches en azote extrait de l'air, restituent très vite les nutriments constitutifs, tandis que les branchettes aoûtées, plus riches en lignine, évoluent progressivement en humus stable qui améliore la structure et la séquestration du carbone dans le sol. Faut-il disposer directement la biomasse brute sur ou dans le sol ou la transformer d'abord en compost ou en fumier à rapport C/N plus proche de celui du sol ?

Il y a ensuite un problème de quantité de biomasses disponible et de transport. Sous forêt et savane arborée, il tombe chaque année 2 à 15 t/ha/an de litière sans compter le recyclage des racines. Sous cultures de céréales, de coton ou d'arachide, la biomasse résiduelle est comprise entre 0,5 et 5 t/ha/an, mais celle-ci est généralement exportée des champs pour servir de fourrage, de litière pour le bétail, de matériaux de construction, de toitures ou de clôtures, ou simplement brûlée pour détruire les nuisibles et maladies, libérer les nutriments assimilables et rehausser le pH du sol pour réduire les toxicités des métaux lourds (Al., Mn, Fe, etc.). Comme il y a des fuites aux systèmes de restitution des nutriments (exportation des récoltes, érosion, lixiviation, gazéification), il est nécessaire soit d'emprunter les nutriments extraits hors des champs cultivés (c'est le rôle de l'élevage extensif qui prélève la biomasse sur les parcours, zones généralement non cultivables, et restitue une fraction dans le parc de nuit [fumier]), soit de compléter la fumure organique par un complément minéral, en particulier le phosphore peu assimilable dans les sols et les bases nécessaires, pour maintenir le pH du sol.

Enfin, il y a des liens entre le mode de gestion de la biomasse et les techniques de travail du sol. On verra dans la troisième partie que la jachère longue et le brûlis sont liés à un travail minimum du sol, puisqu'il y a peu de concurrence par les adventices. Le fumier, le compost et l'enfouissement des résidus de cultures exigent beaucoup d'énergie pour soulever le sol et enfouir la biomasse. Enfin, les plantes de couverture, le paillage avec le BRF ou les résidus de culture entraînent une réduction du travail du sol à la ligne de plantation ou

l'enfouissement des graines en poquets sous la litière. Les conditions socio-économiques et la disponibilité en main-d'œuvre et en équipement vont influencer le choix entre ces divers modes de gestion de la biomasse disponible.

Dans cette deuxième partie, on va donc explorer les divers modes de gestion de la biomasse et leur efficacité pour restaurer la fertilité des sols et leur potentiel de production :

**** Les jachères, temps de repos et de reconstitution des qualités physiques, chimiques et biologiques des sols après un cycle de cultures***

Nous renvoyons d'abord les lecteurs aux travaux publiés par l'équipe du projet « Jachères » : Floret, Le Floch, Pontanier et Serpantié (1991).

- 5. Ikpe *et al.* présentent les effets favorables de jachères courtes (2 ans) de légumineuses, pâturées ou non, sur les rendements des cultures ultérieures et sur les qualités des sols acides du SE du Nigéria ;
- 6. Razafindrakoto montre l'influence positive sur la capacité d'infiltration du sol et sur le rendement des cultures de l'enfouissement de diverses légumineuses cultivées pendant 5 à 10 ans dans des sols ferrallitiques très acides de Madagascar ;
- 7. Duchaufour a observé qu'au bout de dix ans, les terrains sous culture dense de bananiers du Burundi sont meilleurs que les sols sous friches ;
- 8. Harmand *et al.* ont observé qu'après quatre années de plantations d'essences forestières, les sols sont plus riches sous les arbustes légumineuses que sous les eucalyptus et sous la savane herbeuse voisine ;

**** Le brûlis et les charbons de bois, mode traditionnel tant décrié (slash and burn)***

- 9. Peltier *et al.*, suivent un projet de production de charbon de bois (*Acacia mangium*) associé à la production de manioc sur les terres sableuses à proximité de Kinshasa ;
- 10. Nzila décrit l'écobuage (brûlis de graminées à l'étouffée sous un billon de terre) en zone de savane herbeuse et analyse ses effets sur les propriétés du sol en relation avec sa fertilité, la stabilité de la structure de ces sols argileux du Niari (Congo Brazza) : le C + N moins abondants mais plus assimilables prolonge la période de culture ;
- 11. Rumpel décrit les propriétés du biochar et ses effets bénéfiques sur le stockage des nutriments et de l'eau dans les sols sableux entraînant une amélioration de la production végétale ;

**** L'élevage, la production de fumier et la nécessité d'un complément minéral***

- 12. Guerin et Roose analysent l'ingestion des fourrages, leur digestion et la production de fumier jusqu'à leur transformation en humus du sol, ainsi que les

produits secondaires qui peuvent participer à l'enrichissement du sol en faveur des cultures ;

– 13. *Ganry et Thuriès* précisent les conditions de gestion des fumiers pour restaurer durablement la productivité des sols ;

– 14. *Sabir et Roose* analysent les impacts positifs et négatifs des parcours au Maroc, la dégradation de la structure des deux premiers cm d'un sol brun semi-aride entraînant un fort ruissellement, l'érosion sélective du carbone et des nutriments du sol si la densité du bétail dépasse 1 mouton/hectare ;

– 15. *Rishirumuhirwa et Roose.*, démontrent l'arrière effet de l'érosion sur la restauration de la productivité d'un sol acide du Burundi et l'importance de la fumure organique et minérale sur le potentiel de production de sols soumis à des pressions croissantes de l'érosion en nappe ;

* *Le paillage et la gestion des résidus de culture*

Dans les sols tropicaux pauvres en azote, l'enfouissement des résidus de culture entraîne une faim d'azote et la minéralisation poussée de l'humus du sol (Roose, 1994).

Par contre le paillage léger peut avoir un effet important sur la protection contre la battance des pluies, sur la restauration de la vie de la faune, la porosité et la capacité d'infiltration du sol, sur la séquestration du carbone et la nutrition des cultures.

– 16. Khamsouk et Roose, ont démontré qu'il est possible de cultiver des pentes de plus de 40 % sur les sols volcaniques de Martinique en gérant les résidus de culture d'ananas, cannes à sucre et bananiers perpendiculairement à la pente. Même les pluies intenses des cyclones s'infiltrèrent totalement si le sol est complètement couvert ;

– 17. Roose rapporte le potentiel du paillage pour réduire l'érosion et le ruissellement. Rishirumuhirwa a prouvé que sous les bananiers le ruissellement et l'érosion sont fortement réduits si on range les vieilles feuilles de bananiers en bandes perpendiculaires à la pente. Manlay *et al.* ont estimé le peu de disponibilité de branchages forestiers en zones semi-arides (soudano-sahéliennes et sahéliennes) : ils sont réservés d'habitude à l'élevage comme fourrage en période sèche. Leur transport et leur préparation (coupage en morceaux de qq cm et épandage sur ou dans le sol) est très coûteuse en main d'œuvre et leur teneur en nutriments pas assez élevée pour augmenter sérieusement la production de plantes nourricières. Ils n'ont pas trouvé de différence significative de rendement du sorgho entre le témoin et l'apport de 1,6 t/ha de matières sèches (MS) de rameaux comme de paille. Les meilleurs rendements en grain et paille ont été observés avec complément minéral et 1,2 t/ha de paillage (+ 40 %) ou avec apport de 6 t/ha/an de rameaux (+ 160 à 200 % du témoin sans apport), mais la variabilité spatiale est très forte en liaison avec les activités des termites ;

– 18. Roose *et al.*, ont bloqué le ruissellement et l'érosion d'un versant complètement décapé en Martinique à l'aide d'un épandage de 10 à 30 t de déchets de

canne à sucre. Ils ont relancé la couverture végétale avec des apports de compost et de nutriments minéraux posés dans chaque cuvette ;

*** *Apports de déchets urbains ou d'industries : des composts***

– 19. Masse *et al.*, ont comparés les effets de divers compost urbains à Madagascar, au Burkina Faso et au Mali. Vu la pauvreté chimique de ces composts, il faut en déplacer de grosses quantités pour permettre la protection du sol et la croissance des cultures ;

– 20. Seh *et al.* comparent l'efficacité de l'apport de diverses MO, fumier de poule, compost de ville et compléments minéraux sur la production et la rentabilité de la culture de salade sur un sol alluvionnaire du Cameroun ;

*** *Les cultures associées, les vers de terre et les microbes fixateurs de l'azote de l'air***

– 21. Valet attire l'attention sur l'amélioration de la productivité de diverses plantes nourricières par la culture associée sur un même champ : il met en valeur les interactions positives des plantes entre elles ;

– 22. Duponnois *et al.* ont étudié la fixation de l'azote de l'air par les mycorhizes ;

– 23. Blanchart *et Jouquet* ont étudié la transformation des MO par les vers de terre du Vietnam et leur influence sur l'infiltration, le ruissellement et l'érosion sur les versants des collines ;

– 24. Farinet a étudié la valorisation agricole et énergétique des déchets d'abattoir ;

– 25. Roose *et Kouakoua* présentent l'intérêt de l'utilisation des urines pour nourrir les plantes ;

– 26. Hinsinger analyse les sources et l'importance des apports de phosphates pour l'intensification des cultures. Il conclut sur les risques de pénurie en phosphore assimilable.

Toutes ces approches de la gestion de la biomasse améliorent les sols, mais ont un coût et des limites, du fait du travail et des équipements exigés, et surtout du peu de disponibilité en biomasse pour traiter l'ensemble des zones cultivées du terroir.

Influences de jachères améliorées et pâturées sur le rendement des cultures et les propriétés chimiques de sols ferrallitiques acides dans la région des forêts humides du Sud-Est du Nigéria

Félix IKPE

L. D. GBARANEH

Introduction

Les sols de la zone tropicale humide sont profondément altérés, acides (pH de 3,5 à 6,0) et dominés par des ultisols à argile kaolinitique à faible capacité d'échange de cations ($\text{CEC} < 8 \text{ cmol kg}^{-1}$ de sol), et à faible taux de saturation (JUO et ADAMS, 1986). Leurs taux de matières organiques étant faibles (0,5-3 %), leurs réserves en nutriments sont faibles et déséquilibrées, avec de fortes toxicités en oligoéléments. La perte en MO dans ces types de sols entraîne la compaction, une faible capacité de stockage de l'eau et des nutriments, une faible infiltration et un taux important de lessivage, de ruissellement et d'érosion, provoquant une perte des ressources naturelles et le déclin de la productivité des sols (HULUGALLE *et al.*, 1998).

Le système de culture dominant dans les tropiques a été basé durant des siècles sur le brûlis des jachères forestières ou des brousses arbustives. Ce système a été discuté en détail (NYE et GREENLAND, 1960 ; ALLAN, 1965 ; NAIR, 1986). Pendant des années, on a essayé de produire des légumineuses herbacées

annuelles en engrais vert pour recycler les nutriments disponibles dans le sol en moins de six mois (WEBSTER et WILSON, 1980 ; IKPE *et al.*, 2003), sans grand succès.

Pour tenir compte des aspirations des fermiers à améliorer la fertilité des sols, on en est venu à tester des arbustes (*Tephrosia candida*) qui ont des racines profondes plus aptes à recycler les nutriments pour des jachères de 1 à 5 ans (JAIYEBO et MOORE, 1964). Durant la jachère, la végétation arbustive capte les nutriments à différentes profondeurs, puis les restitue en surface sous forme de litière qui améliore le taux de MO du sol et la production durable de nourriture.

Cette étude évalue le potentiel d'une jachère de légumineuse indigène arbustive à croissance rapide, le *Tephrosia candida*, et du *Lablab purpureus*, une légumineuse herbacée, pour recycler les nutriments des champs épuisés du Sud-Est-Nigeria.

Matériels et méthodes

Les essais ont été réalisés sur une ferme et en station sur un ultisol à Kpite, à 50 km de Port Harcourt (4°45' N, 7°18' E) et à Onne (4°51' N, 7°03' E), au sud-est du Nigeria. C'est une zone de forêts humides dans le delta du fleuve Niger. La pluviosité annuelle moyenne atteint 2 400 mm en une seule saison de mars à novembre. L'humidité relative varie peu de 78 % en février à 88 % en juillet. La température mensuelle moyenne varie de 25 °C en juillet à 27 °C de février à avril.

Un premier essai a été mené en *split-plot* en blocs entièrement randomisés avec quatre répétitions. Le traitement principal est l'âge de la jachère (1 et 2 ans) et le sous-traitement, le type de jachère (*Tephrosia candida* et le recrû naturel). Au milieu de la saison des pluies, le *Tephrosia* fut semé à une densité homogène de 10 000 plants/ha, puis sarclé complètement. À la fin de la première année, les parcelles en « jachère d'un an » de *Tephrosia* furent rasées et la biomasse étalée à la surface du sol ; bois, feuilles et branchettes furent distribués de façon homogène sur toute la surface des parcelles comme un mulch. La même procédure fut appliquée aux parcelles « jachères deux ans ».

Du manioc fut ensuite planté à 1 x 1 m, et le maïs en culture intercalaire sur butte au même écartement, entre les plants de manioc. Les parcelles furent sarclées trois fois par an. Le maïs fut récolté à 90 jours, tandis que le manioc s'est développé pendant un an. Chaque butte a reçu une bouture de manioc de 25 cm ou deux plants de maïs.

Des échantillons de sol (à 0-5, 5-15 et 15-30 cm de profondeur) ont été prélevés en tête des parcelles avant le semis de *Tephrosia* et après un an de culture sur les principaux traitements. Les échantillons ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm dans le laboratoire avant analyses. Le pH a été déterminé avec une électrode de verre, selon la procédure de TEL et RAO (1982). Le carbone

organique a été mesuré par la méthode de l'IITA (1979). L'azote total a été déterminé au Technicon autoanalyzer (Technicon AAII) après digestion avec un mélange orthophosphorique concentré et d'acide sulphurique dans un digesteur Tecator. Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Bray-1 (IITA, 1979) avec un Technicon autoanalyzer. Les cations échangeables ont été extraits avec 1 N (NH₄)AC + 0,01M EDTA au taux de 20/50 du sol/extractant. Les extraits furent analysés avec un spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA), tandis que le taux de potassium et de sodium ont été déterminés au photomètre de flamme. La capacité d'échange de cations effective (ECEC) a été calculée par la somme des cations échangeables et de l'acidité échangeable exprimée en cmol kg⁻¹ sol.

La litière sèche et la biomasse de *Tephrosia* furent tamisées à 1 mm. Ces matières végétales furent digérées dans un mélange concentré d'acide sulfurique et d'eau oxygénée en présence d'un comprimé de catalyseur Kjeldahl dans un Digesteur Tecator pour le taux d'azote total (TEL et RAO, 1982). Le taux de carbone total a été déterminé selon la procédure de l'IITA (1979). Les teneurs en P, Ca, Mg et K des plantes ont été obtenues après digestion selon les procédures du laboratoire de l'IITA (1979).

Dans une deuxième expérience, le plan expérimental fut en *split-plot* avec trois répétitions. Les traitements principaux furent une jachère améliorée (avec Lablab) ou naturelle sur une parcelle de 30 x 15 m. Les sous-traitements consistent en pâturage par des moutons ou non avec des parcelles de 24 x 15 m et 6 x 15 m, respectivement.

Après la préparation du terrain, chaque parcelle principale fut plantée en maïs (var. TZDMR SR-W) à la densité de 40 000 plants/ha en avril avec un espacement de 1 x 0,25 m, ne laissant qu'un pied par poquet. Cependant, les parcelles améliorées ont été coplantées avec *Lablab purpureus* à une densité de 1 333 plants/ha, quatre semaines après le semis du maïs (*relay cropping*) (GBARANEH, 1997). Les autres parcelles n'ont pas reçu de Lablab.

Après la récolte du maïs, les adventices ont envahi le terrain et formé une broussaille jusqu'au démarrage du pâturage, trois mois plus tard. À la récolte du maïs, on a estimé la production sur des quadras de 2 x 2 m, répartis au hasard dans quatre positions différentes à l'intérieur d'une sous-parcelle. Les épis de maïs furent récoltés, dégagés et le poids des grains estimé à 13 % d'humidité. On a aussi mesuré le poids sec des pailles et des adventices. Au début de la saison sèche, en décembre de chaque année, trois moutons de 8 mois et 12 kg, furent introduits sur les parcelles « pâturées ». Ils y restèrent du début décembre jusqu'à fin janvier, tant qu'il restait assez de biomasse.

Un jour par semaine, on a mesuré dans des bacs le poids de leur défécation et leur prise de poids tout au long de la période de pâturage. Ils ont disposé à volonté d'une pierre à sel et d'eau. De plus, on a mesuré la disponibilité fourragère, la consommation totale à la fin de cette période, la production de fumier et la teneur du sol en nutriments.

Analyses statistiques

Les différences des moyennes des rendements du manioc et du maïs, les flux de nutriments et les propriétés du sol en fonction de l'âge et du type de jachères ont été estimés à la précision de 5 % par l'analyse de variance (Anova) selon la procédure GLM de SAS Institute (1998).

Résultats et discussion

Expérience I

La production de biomasse de *Tephrosia candida*

Après 1 et 2 années de jachère, la litière produite par *Tephrosia* était supérieure de 33 % à 150 % par rapport à celle de la jachère naturelle. La biomasse totale (bois + feuilles) après 1 et 2 ans de jachère était supérieure de 30 % à 200 % par rapport à celle récoltée sous jachère naturelle (tabl. 1).

Tableau 1

Influence de l'âge et du type de jachère sur la biomasse (t/ha) produite dans un environnement tropical humide du sud-est du Nigeria (KPITE).

Jachère	Bois	Feuilles	Biomasse totale	Litière
1 an jach.naturelle	1,7	5,2	6,9	3,8
1 an <i>Tephrosia Candida</i>	3,5	6,5	10,0	5,7
2 ans jach.naturelle	3,4	6,8	10,2	10,1
2 ans <i>Teph. Candida</i>	8,5	13,0	21,5	25,0
LSD (0,05)	3,26	4,34	6,50	4,83

Les remontées de nutriments

Les plus fortes remontées en N, P, Ca, Mg, K dans les litières ont été observées dans les parcelles en *Tephrosia candida* depuis deux ans (tabl. 2). Viennent ensuite les litières des jachères naturelles de deux ans et finalement les litières de *T. candida* et de jachères naturelles âgées d'un an. Les plus fortes remontées de cations (Ca + Mg + K) ont été observées dans les litières de *Tephrosia* : les litières de deux années de jachère remontent près du double de celles d'un an. Les apports par les feuilles sont dix à vingt fois plus élevés que les apports par les bois : les feuilles et les jeunes rameaux constituent donc un excellent fourrage pour les brebis. Les teneurs en nutriments diffèrent beaucoup dans les feuilles et les litières. De tous les nutriments, l'azote est le plus important, quels que soient le type et l'âge des jachères. Les teneurs en N, P, Ca, Mg et K sont les plus fortes

dans les feuilles de *Tephrosia* en jachère depuis deux ans : les autres situations ne diffèrent guère statistiquement. On a observé le même scénario pour les nutriments compris dans le bois des plantes des diverses jachères étudiées.

Tableau 2
Effet des jachères sur la remontée des nutriments
dans un environnement tropical humide, Kpité, sud-est du Nigeria.

Jachère	Azote	Phosphore	Calcium Kg ha ⁻¹	Magnésium	Potassium
Litière					
1 an jach. naturelle	64,8	33,3	9,8	10,4	3,5
1 an <i>Teph. Candida</i>	140,5	72,0	21,2	22,6	7,5
2 ans jach. naturelle	204,2	104,6	30,9	32,9	11,0
2 ans <i>Teph. Candida</i>	516,7	264,3	78,0	83,1	27,7
LSD (0,05)	101,7	52,1	15,4	16,4	5,5
Feuilles					
1 an jach. naturelle	238,0	12,0	46,3	10,4	30,7
1 an <i>Teph. Candida</i>	191,4	14,9	57,6	12,9	38,2
2 ans jach. naturelle	248,3	15,5	60,1	13,5	39,8
2 ans <i>Teph. Candida</i>	479,0	29,9	115,8	26,0	76,8
LSD (0,05)	159,9	10,0	38,7	8,7	25,6
Bois					
1 an jach. naturelle	12,70	1,40	2,70	0,70	1,40
1 an <i>Teph. Candida</i>	26,20	2,80	5,70	1,40	2,80
2 ans jach. naturelle	25,30	2,70	5,50	1,40	2,70
2 ans <i>Teph. Candida</i>	62,80	6,80	13,60	3,40	6,80
LSD (0,05)	24,10	2,60	5,20	1,30	2,60

Le rendement des cultures succédant aux jachères

La récolte des racines fraîches de manioc varie de 6,8 à 18,3 t/ha : le meilleur rendement provient de la jachère de deux ans de *Tephrosia*, et la plus faible de la jachère de *Tephrosia* d'un an. La récolte de maïs-grain séché varie de 0,38 à 3,6 t/ha, selon le même scénario que le manioc.

Les résultats des deux essais montrent que les jachères améliorées produisent plus de biomasse pour pailler et supprimer les adventices. Cependant, on n'a trouvé aucune différence significative concernant les propriétés chimiques du sol : après deux ans de jachère, on a obtenu une biomasse et des rendements des cultures plus élevés, car plus de nutriments furent recyclés que dans la jachère naturelle.

Dans un essai annexe avec des sacs à litière permettant de déterminer le taux de minéralisation de *Tephrosia* (mélange de bois, de branchettes et de feuilles), ainsi que les nutriments assimilables, on a trouvé que le *Tephrosia* avait un taux de minéralisation assez lent (0,13 wk et une demi-vie de 6 wk) (Ikpe, non publié). Ceci rend l'élagage de *Tephrosia Candida* très souhaitable pour produire un paillage durable pour lutter contre l'érosion sous un environnement tropical humide comme à Kpité.

Par conséquent, la restitution des nutriments est aussi assez lente. Après 98 jours, seulement 40 % de l'azote initial fut restitué, 50 % du calcium, 70 % du phosphore, 88 % du magnésium et 90 % du potassium (Ikpe, non publié). L'amélioration du rendement en manioc et maïs-grain après deux années de jachère de *Tephrosia* est due probablement à l'effet du paillage abondant sur l'érosion et sur les propriétés physiques du sol (GICHURU, 1991), à l'activité de la faune qui a amélioré les propriétés chimiques et physiques du sol (TIAN, 1992) et au recyclage des nutriments.

Évolution des propriétés chimiques du sol

Après deux années de jachère et une année de culture, le pH, l'azote total du sol et le carbone n'ont pas augmenté par rapport aux teneurs initiales, sauf dans l'horizon superficiel (0-5 cm) des jachères de deux ans (tabl. 3). Le pH, le phosphore, Ca + Mg sont plus faibles sous *Tephrosia* que sous la jachère naturelle. Par contre, l'alumine échangeable est plus élevée sous *Tephrosia* :

Tableau 3
Effets de la jachère (naturelle ou à *Tephrosia candida*) sur les propriétés du sol après deux années de jachère et une année de culture.

Jachère	pH (1:1 (H ₂ O))	Total N (%)	OC	Bray - I (ppm)	PCa	Mg	K (c mol kg ⁻¹)	Na	Al ³⁺ + H ⁺	CEC	BS (%)
Horizon		0-5 cm									
Initiale	4,5	0,100	1,13	46,13	1,10	0,36	0,19	0,16	0,92	2,73	66,2
2 ans J. naturelle	4,9	0,100	1,28	31,50	1,03	0,30	0,10	0,20	0,98	2,60	59,15
2 ans <i>T. candida</i>	4,7	0,103	1,36	31,40	0,85	0,20	0,10	0,20	1,45	2,50	59,10
LSD (0,05)	0,14	0,006	0,08	12,99	0,13	0,04	0,00	0,00	0,36	0,24	11,69
Horizon		5-15 cm									
Initiale	4,5	0,090	1,43	37,27	0,81	0,25	0,08	0,44	1,30	2,54	48,4
2 ans J. naturelle	4,4	0,084	0,93	38,43	0,43	0,43	0,05	0,45	1,83	2,58	29,31
2 ans <i>T. candida</i>	4,0	0,087	0,97	26,88	0,50	0,40	0,04	0,48	1,93	2,76	30,58
LSD (0,05)	0,10	0,004	0,08	7,05	0,60	0,02	0,01	0,03	0,23	0,19	4,52
Horizon		15-30 cm									
Initiale	4,5	0,150	1,04	23,85	0,59	0,17	0,11	0,08	1,53	2,43	30,7
2 ans J. naturelle	4,6	0,066	0,75	20,40	0,53	0,10	0,05	0,20	1,95	2,82	31,19
2 ans <i>T. candida</i>	4,1	0,064	0,73	15,65	0,43	0,10	0,03	0,20	1,88	2,63	29,60
LSD (0,05)	0,25	0,004	0,07	5,52	0,07	0,00	0,01	0,00	0,27	0,29	3,32

curieusement, la capacité d'échange de cations (CEC) a diminué en surface et augmenté en profondeur inversement au taux de carbone organique. Dans l'horizon 0-5 cm des parcelles à *Tephrosia*, le carbone organique est plus élevé et le taux de Ca + Mg est plus faible qu'à l'origine. Le pH a diminué sous *Tephrosia* dans les horizons de 5 à 30 cm.

Les propriétés chimiques diminuent avec la profondeur dans les profils. Globalement, malgré l'apport de nutriments par les litières, les feuilles et les bois, les propriétés du sol n'ont guère été améliorées trois ans après le début des jachères : les nutriments apportés ont été absorbés par les cultures ou perdus par érosion et lessivage lors de la première culture. L'amélioration du sol semble donc limitée dans le temps.

Expérience II

Rendements en maïs-grain

Le rendement en maïs fut influencé significativement par les jachères et le broutage. En 1996, la première année, le rendement après jachères améliorées est 5 % supérieur à celui des jachères naturelles (non significatif statistiquement). Mais après la seconde année (1997), la production de grains a augmenté significativement (18 %) sur les jachères améliorées : ceci proviendrait d'une amélioration du statut des nutriments du sol par les légumineuses (surtout lablab) (SALEEM et OTSYINA, 1986).

Le broutage par les moutons n'a entraîné aucune différence significative la première année (1996), car il s'est fait juste après la récolte du maïs. Par contre la deuxième année, on a observé une différence de 9 % de grains au bénéfice du broutage. Ceci s'expliquerait par l'amélioration chimique du sol par le dépôt de fèces et d'urine des moutons pendant leur séjour sur les parcelles (POWELL et IKPE, 1992 ; IKPE *et al.*, 1999).

L'effet du broutage devint important la seconde année (tabl. 4), car les parcelles broutées ont produit 1,20 t ha⁻¹, représentant 50 % de fourrage en plus par rapport aux parcelles non broutées. La teneur en protéine brute a aussi augmenté de 1,42 g kg⁻¹, représentant 32 % sur les parcelles broutées.

Tableau 4
Influence du broutage sur la production de fourrage (t ha⁻¹)
et sur la teneur en protéine brute (g kg⁻¹) à Onne, Sud-Est-Nigeria.

Année	Types de jachère	Fourrage (t ha ⁻¹)	Protéine brute g kg ⁻¹
1996	Non broutée	2,59	3,65
	Broutée par moutons	2,57	3,80
	LSD (p < 0,05)	Ns	ns
1997	Non broutée	2,06	4,46
	Broutée par moutons	3,26	5,88
	LSD (p < 0,05)	0,175	0,374

ns = non significatif à 5 % de probabilité.

Nutriments dans les fèces et l'urine des moutons

Le poids des fèces déposées par les moutons sur les parcelles broutées est montré au tableau 5. La production de fèces fut supérieure sur les parcelles en jachère améliorée par rapport aux jachères naturelles, broutées toute l'année. La production journalière par mouton fut respectivement 67 et 81 % supérieure en 1996 et 1997, ceci s'explique par la meilleure qualité de la biomasse de lablab. La production de fèces montre aussi une relation positive directe avec la production et l'ingestion de fourrage (tabl. 5). Non seulement la production de fèces et d'urine (non montrée ici), mais aussi les teneurs en nutriments déposés sont plus grandes (tabl. 6). Ces résultats corroborent la meilleure fertilité du sol des parcelles broutées par rapport aux parcelles sous jachère naturelle (données non explicitées ici).

Tableau 5

Fourrage ingéré (t/ha) et production de fèces (g/mouton/jour) par des moutons ouest-africains (DWARF) sur des parcelles en jachère naturelle ou améliorée à Onne, Sud-Est-Nigeria.

Année	Système de jachère	Ingestion de fourrage	Production moyenne journalière
1996	Jachère naturelle	4,19	138
	Jachère améliorée	8,76	231
	LSD (p < 0,05)	2 235	11,92
1997	Jachère naturelle	2,27	120
	Jachère améliorée	6,82	217
	LSD (p < 0,05)	1 565	21,7

Tableau 6

Quantité de nutriments déposés dans les fèces et urines des moutons qui ont brouté les jachères naturelles ou améliorées à Onne, Sud-Est du Nigeria.

Année	Système de jachère	Amendement du sol	Concentrations en nutriments (g kg ⁻¹)					
			C	N	P	K	Ca	Mg
1996	Jachère naturelle	Fèces de moutons	821,4	21,8	3,7	16,4	0,2	0,1
		Urine de moutons	-	7,2	ND	0,6	ND	ND
	Jachère améliorée	Fèces	948,2	27,6	4,7	1,5	0,3	0,2
		Urine	-	9,2	ND	0,8	ND	ND
1997	Jachère naturelle	Fèces	766,8	18,9	3,2	12,3	0,1	ND
		Urine	-	6,3	ND	0,5	ND	ND
	Jachère améliorée	Fèces	872,1	23,0	3,9	1,5	0,3	0,2
		Urine	-	7,8	ND	0,8	ND	ND

ND signifie non détectable.

Conclusions

Les résultats de cette étude montrent que *Tephrosia candida* et *Lablab purpureus* peuvent être utilisés pour réduire la durée des jachères et pour recycler les nutriments dans les systèmes de culture du sud-est du Nigeria. Cependant, les stratégies nécessaires pour réduire l'acidification du sol sous *Tephrosia candida* doivent être recherchées. De plus, l'intégration des cultures et de l'élevage basée sur le semis de légumineuses fourragères à l'intérieur d'un système de cultures associées (*intercropping*) peut renverser la tendance de la dégradation de la fertilité des sols soumis à la culture continue, tout en fournissant du fourrage de qualité pour l'élevage. Cependant, puisque la majorité de l'azote restitué par l'urine animale peut être perdue par volatilisation, il faudrait encore mettre au point des technologies qui recyclent plus efficacement les nutriments.

Bibliographie

- ALLAN W., 1965 – *The African Husbandman*. Edinburgh, UK, Oliver and Boyd : 41-67.
- GBARANEH L. D., 1997 – *Effect of time of lablab undersowing in maize for maximum grain yield and fodder quality*. MSc. Thesis, Rivers State University of Science and Technology, Port Harcourt, Nigeria.
- GICHURU M. P., 1991 – « Residual effect to natural bush, *cajanus cajan* and *Tephrosia candida* on the productivity of an acid soil in Southeastern Nigeria ». In : *Plant-Soil Interactions at low pH*: 417-422.
- HULUGALLE N. R., LAL R., GICHURU M. P., 1998 – Effect of five years of no-tillage and mulch on soil properties, tuber yield of cassava on an acid Ultisol in southeastern Nigeria. *Expl. Agric.* 26 : 235-240.
- IKPE F. N., HAMADINA M. K., ISIRIMAH N. O., 2003 – Relay legume fallowing and the sustainability of soil fertility in the humid lowlands of Southeastern Nigeria. *Nig. J. Res. Prod.* 3 : 47-68.
- IKPE F. N., POWELL J. M., ISIRIMAH N. O., WAHUA T. A. T., NGODIGHA E. M., 1999 – Effect of primary tillage and soil amendment practices on pearl millet yield and nutrient uptake in the Sahel of West Africa. *Expl. Agric.* (UK), 35 (4) : 437-448.
- INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE (IITA), 1979 – *Soil and Plant Analysis Manual Series* (I). IITA, Ibadan, Nigeria, 70 p.
- JAIYEBO E. O., MOORE A. W., 1964 – Soil fertility and nutrient storage in different soil vegetation systems in tropical rainforest environment. *Trop. Agric.*, 41 : 129-136.
- JUO A. S. R., ADAMS F., 1986 – « Chemistry of LAC Soils ». In : *Soil Conservation Service. Proceedings Symposium on low activity clays (LAC) soils. Technical Monograph*, Washington, DC : 37-62.
- NAIR N. F., 1986 – « Agroforestry as an alternative to shifting cultivation ». In : *Improved production systems as an alternative to shifting cultivation*, Rome, FAO, 162 p.
- NYE P. H., GREENLAND D. J., 1960 – *The soil under shifting cultivation*. Technical Communication 51. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, UK.
- POWELL J. M., IKPE F. N., 1992 – Fertilizer factories: nutrient recycling through livestock. *ILEIA Newsletter (Netherlands)*, 8 (3) : 13-14.
- SALEEM M. A., OTSYINA R. M., 1986 – Grain yields of maize and the nitrogen contribution following *Stylosanthes guyanensis* pasture in the Nigerian subhumid zone. *Expl. Agric.*, 22 : 207-214.
- SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM), 1998 – *Procedure guides Release 6.03* Edition. SAS Institute Inc., Garry, North Carolina, USA.

TEL D., RAO P., 1982 – Automated and semi-automated methods for soil and plant analysis. *IITA Manual series* No. 7, Intern. Inst. Trop. Agric. Ibadan, Nigeria.

TIAN G., 1992 – *Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions on plant*

and soil under humid tropical conditions. Ph.D. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands, 114 p.

WEBSTER C. C., WILSON P. N., 1980 – *Agriculture in the Tropics*. London, Longmans : 272-491.

Influences de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar)

Marie Antoinette RAZAFINDRAKOTO

Introduction

Dans la région nord-ouest des hauts plateaux de Madagascar où l'érosivité pluviale est forte et la végétation très dégradée suite aux feux de brousse et aux cultures extensives, il se produit une érosion importante des versants pentus à sols dégradés. Il en résulte une baisse de la productivité des sols aggravant la pauvreté du monde rural.

Une recherche a donc été menée dans cette région pour étudier l'effet de diverses jachères de légumineuses arbustives sur l'amélioration de la dynamique d'infiltration de l'eau dans le sol. Cette recherche a été effectuée dans le but de réduire l'érosion des champs de culture et de restaurer la productivité des sols.

Le témoin de référence servant de comparaison est une steppe à *Aristida* sp. sur un sol dégradé par les feux de brousse annuels.

Milieu d'étude et méthodologie

Présentation du site d'étude

La zone d'étude choisie, Manankazo, est située dans la partie nord-ouest des hauts plateaux de Madagascar. Elle se trouve sur le relief de Tampoketsa dont l'altitude varie de 1 565 m à 1 580 m.

C'est une zone à contextes climatique, pédologique et socio-économique défavorables aggravant la dégradation et l'érosion des sols.

Le climat est agressif, du type tropical humide d'altitude à pluviosité moyenne annuelle de 1 823 mm, répartie sur 114 jours de pluies. La saison des pluies se situe entre novembre et avril, suivie d'une saison sèche de six mois.

La zone de Manankazo présente un indice d'érosivité climatique élevé (Rusa = 508). D'après Souchier, elle se trouve dans la zone d'érosion à forte intensité pluviométrique horaire (jusqu'à 110 mm/h durant une heure). Le relief est constitué de collines à replats sommitaux et à versants pentus convexes-concaves avec présence de lavaka. Les sols sont généralement classés dans le groupe de sols ferrallitiques jaune sur rouge lessivés, à pH bas, sensibles à l'érosion (Ultisols).

Les feux de brousse sont annuels pendant la saison sèche, dans le but d'obtenir un ruissellement pour irriguer rapidement les rizières en saison des pluies ou pour renouveler les pâturages. Ces feux de brousse ont détruit la végétation jusqu'à l'installation généralisée d'une steppe à *Aristida multicaulis*, favorisant les phénomènes d'érosion sur les sols dénudés des fortes pentes. Il ne reste actuellement que quelques vestiges de forêt ripicole primaire, situés sur les zones à haute altitude. Par ailleurs, les pratiques paysannes de cultures traditionnelles sans intrant favorisent aussi dans cette zone de Manankazo la dégradation des sols.

Méthodes expérimentales

Dans notre expérimentation, les meilleures espèces de légumineuses arbustives ont été installées en jachère de longue durée de 5 à 10 ans, afin d'obtenir l'efficacité maximale pour l'amélioration de la conductivité hydraulique à saturation du sol très dégradé, de sa résistance à l'érosion et de sa productivité. Le témoin de référence où on a installé ces jachères est une prairie dégradée brûlée annuellement à *Aristida multicaulis*, très fréquente dans la région.

Ces dispositifs agroforestiers ont été comparés à l'écosystème de forêt naturelle afin d'en déduire le dispositif le plus efficace pour améliorer les propriétés du sol.

Dénomination des divers agroécosystèmes étudiés

Tableau I
Les systèmes observés.

Forêt	Forêt ripicole naturelle
JT7 et JT10	Jachère légumineuse arbustive à <i>Tephrosia vogelii</i> durant 7 et 10 ans
JCALL10	Jachère légumineuse arbustive à <i>Calliandra calothyrsus</i> de 10 ans
JFP5	Jachère légumineuse arbustive pleine à <i>Flemingia congesta</i> de 5 ans
JFL2M	Haies vives de <i>Flemingia congesta</i> de 5 ans à deux rangées
JFC2M	Espace cultural en couloir de 2 m entre deux haies vives de <i>Flemingia congesta</i> 5 ans à double rangée
JFL1M	Haies vives de <i>Flemingia congesta</i> de 5 ans à une rangée
JFC1M	Espace cultural en couloir de 1 m entre deux haies vives de <i>Flemingia congesta</i> à une rangée
PVD	Prairie dégradée à steppe d' <i>Aristida multicaulis</i> sur versant pentu non brûlé depuis 15 ans
PBA	Prairie dégradée brûlée annuellement pendant 15 ans et mise en défens depuis 6 ans (à steppe d' <i>Aristida multicaulis</i>)

Mesure de la conductivité hydraulique du sol à saturation

Pour mesurer la conductivité hydraulique du sol à saturation, nous avons adopté la méthode du monocylindre de ROOSE (1997). Un cylindre de diamètre 10 cm et de hauteur 10 cm est enfoncé dans le sol à 2 cm de profondeur. On le remplit d'eau jusqu'à un niveau de 5 cm et on mesure avec une règle et un chronomètre la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. On remplit chaque fois le cylindre quand le niveau d'eau atteint la surface du sol. L'expérimentation est prolongée jusqu'à l'obtention d'une vitesse d'infiltration minimale constante qui donne la conductivité du sol à saturation (SCHROEDER *et al.*, 1982).

Mesure des autres caractéristiques du sol

Les caractéristiques physico-chimiques du sol qui peuvent influencer la conductivité hydraulique du sol et sa productivité ont été aussi évaluées (taux de matière organique du sol, taux d'azote, densité apparente, porosité, instabilité structurale).

L'évaluation de la présence de pédofaune (vers, termites, fourmis) a été entreprise sur des échantillons de sols prélevés sur 10 cm. Les échantillons sont déposés dans un cylindre fermé par un tamis laissant passer la faune repoussée vers le bas par une source de lumière vive : elle est alors récupérée dans un récipient plein d'eau et comptée devant une loupe binoculaire.

Le rendement de haricot (en grains secs) cultivé après enfouissement de la biomasse de jachère légumineuse a été mesuré pour évaluer la productivité du sol.

Résultats et discussion

L'établissement de la relation entre le rendement agricole et les caractéristiques de fertilité du sol (hydriques, physiques et chimiques) permet d'étudier leur influence, ainsi que l'effet des divers dispositifs agroforestiers sur l'amélioration de la productivité du sol.

Influence des caractéristiques chimiques du sol sur la productivité du sol

D'après les résultats obtenus, le taux de matière organique du sol varie de 4,2 % pour la prairie brûlée dégradée à 8,6 % pour la jachère de *Tephrosia* de 7 ans et à 13,5 % pour la forêt naturelle. Le rendement en grains d'haricot sec varie

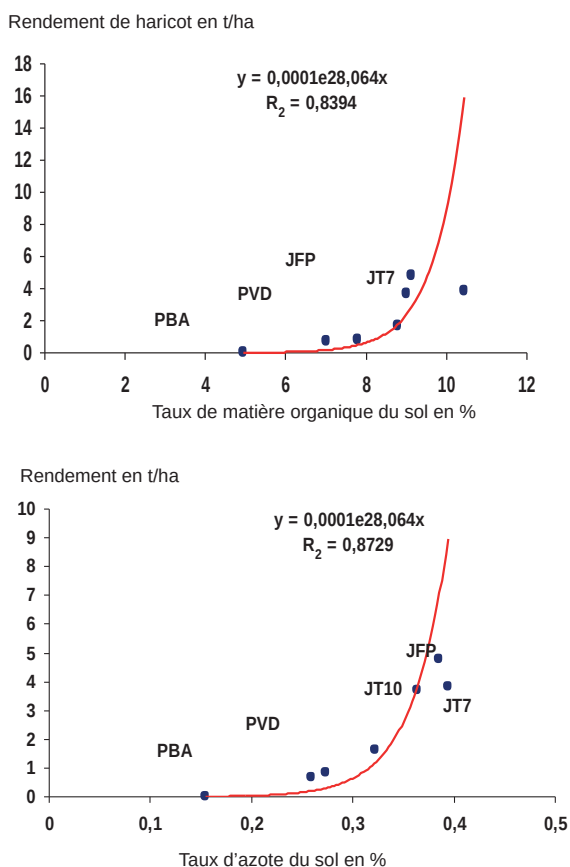


Figure 1

Relation entre le rendement en haricot et les taux de MO et de l'azote du sol.

de 0,003 t/ha pour la prairie brûlée, à 4,8 t/ha pour la jachère de *Flemingia congesta* de 5 ans, après enfouissement de la biomasse.

La figure 1 montre que le rendement en haricot augmente fortement avec le taux d'azote et le taux de matière organique du sol.

Ce sont les agrosystèmes enrichissant le sol en matière organique et en azote qui produisent le meilleur rendement de haricot : jachère de *Tephrosia vogelii* de 7 ans (JT7), jachère de *Flemingia congesta* de 5 ans (JFP5), jachère de *Tephrosia vogelii* de 10 ans (JT10). En effet, la caractéristique essentielle des légumineuses est l'aptitude à la fixation symbiotique d'azote (grâce aux bactéries *Rhizobium*), enrichissant le sol en azote. YOUNG (1989), TASSIN (1992) et RAZAFINDRAKOTO (2004) ont confirmé l'importance de la matière organique et de l'azote produits par les arbres et arbustes légumineux sur l'amélioration de la fertilité des sols.

La prairie brûlée annuellement (PBA), dont le sol est appauvri en matière organique et en azote, a produit un rendement de haricot quasi nul.

Influence des caractéristiques structurales du sol sur la production en haricot

D'après les figures 2a et 2b, le rendement en haricot augmente avec la stabilité structurale et la porosité du sol. Ces caractéristiques du sol engendrent une bonne conductivité hydrique du sol et une bonne aération favorisant la pénétration des racines et la croissance végétale rapide. Ainsi, ce sont les sols ayant une porosité et une stabilité structurale élevées qui produisent les meilleurs rendements agricoles : cas des jachères de 7 ans de *Tephrosia* (JT7), de 5 ans de *Flemingia congesta* (JFP5) et de dix ans de *Tephrosia* (JT10).

La densité apparente du sol sur 10 cm varie de 0,49 pour la forêt ripicole naturelle, à 0,89 pour la jachère de *Tephrosia vogelii* de 7 ans et à 1,25 pour la prairie dégradée brûlée annuellement. La porosité et la stabilité structurale élevées sont dues à un taux de matière organique élevé du sol.

Plusieurs auteurs ont affirmé l'influence positive de la matière organique sur la stabilité structurale des agrégats (LE BISSONNAIS, 1996 ; AMEZKETA, 1999 ; ROOSE *et al.*, 2004 ; RAZAFINDRAKOTO, 2004).

D'après GUCKERT (1973), TISDALL et OADES (1982), certains constituants organiques, et notamment les polysaccharides d'origine microbienne ont, par leur structure moléculaire, leur liaison avec l'argile, leur localisation (paroi des plus gros pores), une efficacité spécifique élevée en accroissant la cohésion des agrégats du sol.

En outre, la richesse du sol en matière organique favorise les activités biologiques qui augmentent la porosité du sol. En effet, la matière organique contribue à la formation d'une structure grumeleuse du sol formée d'agrégats argilo-humiques édifiés par les lombrics. Cette structure confère au sol une bonne porosité (DUCHAUFOR *et al.*, 1994).

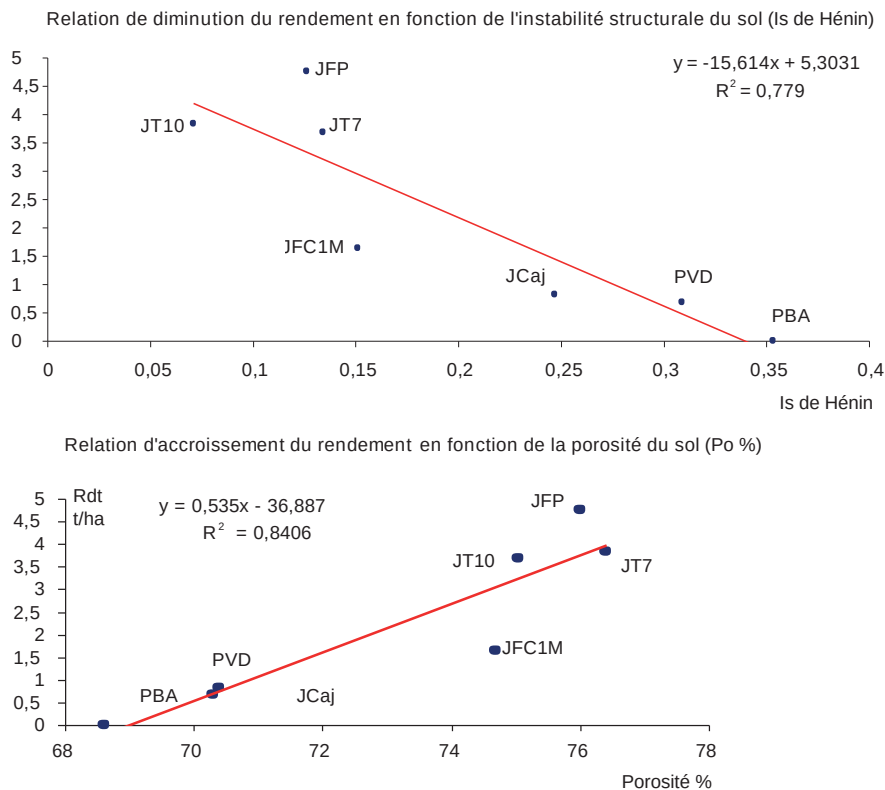


Figure 2a et 2b
Relation entre l'instabilité structurale, la porosité du sol et le rendement en haricot.

Influence de la conductivité hydraulique sur la production en haricot

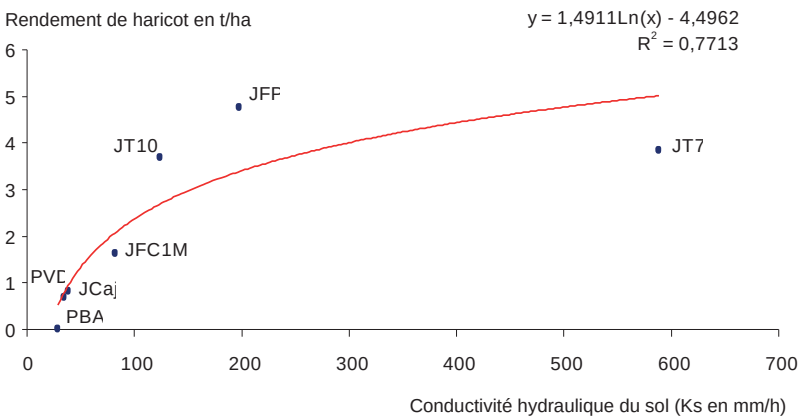


Figure 3
Rendement en haricot en fonction de la conductivité hydraulique du sol (Ks en mm/h).

La conductivité hydraulique du sol à saturation (K_s) varie de 25 mm/h pour la prairie dégradée brûlée annuellement (PBA), à 512 mm/h pour la jachère de *Tephrosia vogelii* de 7 ans et 719 mm/h pour la forêt naturelle dense humide.

La figure 3 présente l'effet des jachères légumineuses arbustives sur l'amélioration de la conductivité hydraulique du sol, engendrant l'augmentation du rendement de haricot après enfouissement de la biomasse.

La conductivité hydrique du sol influence le rendement agricole d'une manière logarithmique croissante. En effet, une bonne capacité d'infiltration de l'eau de pluie par le sol réduit le ruissellement et l'érosion qui causent les pertes d'éléments les plus fertiles du sol et la baisse de la productivité agricole. Ainsi, ce sont les agrosystèmes à meilleure conductivité hydrique du sol qui produisent les meilleurs rendements agricoles : jachère de *Tephrosia vogelii* de 7 ans (JT7), jachère de *Flemingia congesta* de 5 ans (JFP5), jachère de *Tephrosia vogelii* de 10 ans (JT10). Au contraire, la prairie brûlée dégradée (PBA), ayant montré une capacité d'infiltration du sol très faible, présente aussi une productivité médiocre, puisque le sol compact est très susceptible au ruissellement et réduit l'enracinement.

Le rendement obtenu sur ces jachères légumineuses est très élevé et aurait pu encore être meilleur, mais des maladies cryptogamiques ont attaqué les haricots pendant tout le stade cultural. La jachère de *Tephrosia vogelii* de 7 ans (JT7) a été affectée gravement par l'Anthracnose, la jachère de *Flemingia congesta* (JFP5) a été affectée par l'*Isariopsis griseola*, la jachère de *Tephrosia vogelii* de 10 ans (JT10) par *Phaseoisariopsis griseola*.

Évaluation quantitative de la faune fousseuse du sol

La pédofaune totale varie de 160 par m² dans la parcelle de prairie brûlée, à 2 082/m² dans la jachère de *Tephrosia* de 7 ans et jusqu'à 2 351/m² sous la forêt naturelle.

Il existe une relation croissante exponentielle entre la conductivité hydraulique du sol et la quantité de lombrics, termites et fourmis.

$$\text{Lombrics} \quad Y = 20,173 e^{0,0082x} \quad R^2 = 0,833$$

$$\text{Termites} \quad Y = 19,087 e^{0,0081x} \quad R^2 = 0,799$$

$$\text{Fourmis} \quad Y = 13,575 e^{0,0021x} \quad R^2 = 0,834$$

Ces « ingénieurs du sol » contribuent très efficacement à la disparition des litières, au mélange des MO au sol minéral, à la remontée de nutriments en surface, à la production d'agrégats stables (leurs déjections), à la décompaction du sol et à l'augmentation de l'infiltration (ROOSE, 1976 ; LAVELLE et SPAIN, 2001 ; BLANCHART *et al.*, 2004). Ce sont la forêt et la jachère à *Tephrosia* puis les jachères à *Flemingia* (5 ans) et à *Calliandra* (10 ans) qui sont les plus riches en pédofaune, tandis que la parcelle de prairie brûlée ne possède que quelques fourmis.

Conclusions

Cette recherche a montré l'efficacité des dispositifs agroforestiers (culture en couloir et des jachères légumineuses arbustives) pour l'accroissement de la conductivité hydraulique et de la fertilité des sols très dégradés, ce qui induit l'amélioration de la dynamique d'infiltration de l'eau de pluie, la réduction de la susceptibilité des sols à l'érosion et l'augmentation de leur productivité.

Les espèces *Flemingia congesta*, *Calliandra calothyrsus*, et surtout *Tephrosia vogelii* paraissent efficaces pour restaurer les propriétés du sol en 7 à 10 ans, jusqu'à un état proche de la forêt naturelle. Ce fait est dû à la meilleure qualité (richesse en azote) et à l'abondance de la biomasse produisant beaucoup d'humus labile de type Mull. En outre, ce milieu agroforestier favorise la prolifération de la pédofaune fouisseuse dont les activités améliorent l'infiltration et la fertilité du sol superficiel. Pour d'autres auteurs, il est préférable de couper la jachère et de semer directement entre les brindilles sous la litière : ce système simplifié réduit considérablement le travail de préparation du sol et se rapproche des conditions forestières.

La diffusion de ces techniques culturales améliorantes et antiérosives aux paysans pourrait apporter une solution efficace pour augmenter leur production agricole et réduire leur pauvreté. L'application de ces jachères légumineuses arbustives peut être entreprise, avec des variantes, dans les autres zones à sols dégradés de Madagascar et divers pays tropicaux de climat semblable, afin de promouvoir le développement durable.

Bibliographie

AMEZKETA E., 1999 – Soil aggregate stability: a review. *J. Sustainable Agric*, 14 : 83-151.

BLANCHART E. *et al.*, 2004 – Effects of tropical endogenic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104 : 303-315.

DUCHAUFOR PH., BONNEAU M., SOUCHIER B., 1994 – *Pédologie-Constituants et propriétés du sol*. T. II. Paris, Masson, 2^e édition, 654 p.

GUCKERT A., 1973 – *Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation*. Thèse de doctorat d'État, université Nancy I, 124 p.

LAVELLE P., SPAIN A., 2001 – *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publisher, 654 p.

LE BISSONNAIS Y., 1996 – « Soil characteristics and aggregate stability ». In : *Soil erosion, conservation and rehabilitation*, New York, Dekker, Agassim (eds) : 41-60.

RAZAFINDRAKOTO M. A., 2004 – *Évaluation de l'efficience de diverses techniques biologiques de gestion conservatoire de la fertilité des sols*. Thèse doct. d'État es-sciences physiques, université d'Antananarivo, 192 p.

ROOSE É., 1976 – *Contribution à l'étude de l'influence de la pédofaune sur la pédogenèse en milieux tropicaux*. Rapport Orstom, Abidjan, 56 p.

ROOSE É., 1997 – Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et deux simulateurs de pluies – Application

à un versant de la vallée de Godim au Cap-Vert.
Bull. Réseau Erosion, 17 : 282-296.

ROOSE É., DIALLO Dr., BARTHÈS B., ORANGE D., 2004 – Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse*, 15 (1) : 57-64.

SCHROEDER S., SWATZENDRUBER D., FOSTER G., MOLDENHAUER W., MANNERING J., 1982 – Hydraulic conductivity of soil as determined from cumulative runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 : 1267-1278.

TASSIN J., 1992 – Agroforesterie et conservation des sols dans les régions chaudes. Montpellier, Édition Nature et Progrès, 140 p.

TISDALL J., OADES J., 1982 – Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33 141-63.

YOUNG A., 1989 – *Ten hypotheses for soil agroforestry research*. Nairobi, Icrat, *Agroforestry today*, t. I : 13-16.

La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central)

Hervé DUCHAUFOUR

Introduction

Soumis à des conditions climatiques tropicales chaudes et humides, mais tempérées par l'altitude, le Burundi possède des conditions agroécologiques favorables au développement d'une agriculture prospère. La population, essentiellement paysanne (92 % de la population totale, soit 7,2 millions d'habitants), est cependant totalement dépendante des productions vivrières de ses terres et peut se trouver en rupture avec son milieu : diminution des surfaces cultivées par exploitation, disparition des jachères, mise en valeur des terres de plus en plus marginales aux pentes fortes et aux sols moins riches.

Cette évolution pourrait avoir des conséquences dramatiques si les paysans burundais n'avaient su adapter leurs méthodes de production au rythme des changements du milieu, la densité de population n'étant pas un facteur défavorable à l'environnement. Si la manifestation de l'érosion et la baisse de fertilité des sols ont été souvent décriées, il n'en demeure pas moins que la mise en valeur des terres est devenue pour les paysans burundais un enjeu dont peut dépendre leur propre avenir. Ainsi, poussés par leurs propres initiatives, avec ou sans l'aide des chercheurs et des projets, les paysans burundais ont démontré qu'ils pouvaient adapter et faire évoluer leurs pratiques culturelles traditionnelles en les perfectionnant dans leur arrangement structural (différentes strates de production) et leur complexité (associations arbres-herbacées-cultures dans un même espace).

Le cumul du « capital fertilité du sol » par la bananeraie

Les chiffres sur la densité de population présentent de fortes variations inter-régionales : certaines provinces approchent 500 habitants au km², alors que d'autres sont encore en dessous de 100 ; certaines collines dépassent même 1 000 habitants/km². À en croire de nombreux écrits, la relation entre la densité de population, l'érosion et les systèmes agraires devrait suivre une logique : habitat très dispersé, agriculture « de rapine » extensive peu productive, surpâturage, pratique déplorable des feux de brousse et déforestation dans les régions les moins peuplées et inversement habitat regroupé dans un paysage dégradé par la surexploitation des terres et exode vers les pools urbains dans les régions à fortes concentrations humaines. Si cette version peut être facilement contredite, c'est qu'il existe au sein des ménages ruraux burundais des capacités d'adaptation remarquables qui contrecarrent tous les pronostics des experts.

Depuis longtemps, les Burundais ont en effet surmonté les nombreuses crises en gérant mieux leurs ressources sans épuiser le sol. Ils ont augmenté la productivité par une gestion élaborée du « capital fertilité du sol » en intensifiant la bananeraie agroforestière (COCHET, 1993, 2004). Cette dernière permet de faire vivre des familles malgré les pentes fortes ; par sa couverture protectrice, elle prévient les risques graves d'érosion hydrique. Elle est entretenue avec tous les excédents organiques de l'exploitation, enfin elle permet de regrouper et réduire les charges de travail lorsqu'elle est associée au vivrier. Il n'est d'ailleurs pas rare d'observer sous le couvert des plus belles bananeraies agroforestières, des systèmes de culture complexes associant sur la même surface jusqu'à sept cultures différentes. D'autres exploitations, de plus en plus rares, ont su préserver tous les avantages de l'association agriculture-élevage malgré la réduction des surfaces pâturables. Cochet affirme même qu'au fur et à mesure de l'extension de la bananeraie, le bétail devient moins indispensable au maintien d'un capital-fertilité du sol : « Tout se passe comme si l'extension de la bananeraie supplantait progressivement la multiplication du troupeau comme mécanisme fondamental d'accumulation du capital ». Des planteurs disent souvent que « la bananeraie représente symboliquement leur vache » (BENDJEFFAL *et al.*, 1993 ; COCHET, 2004).

Les ingénieurs agronomes belges du temps de la colonie avaient remarqué également les bénéfices de la bananeraie sur l'évolution de la fertilité des sols. À la station de Malungu (Congo RDC), les sols des bananeraies de 10 ans étaient meilleurs que la majorité des terres laissées en friche (HENDRICKX et HENDRICKX, 1948). Ils présentaient tous une couche arable très humifère, spongieuse constituant un obstacle efficace à l'érosion et maintenant un état de fraîcheur remarquable. L'épais horizon grumeleux sous-jacent très humifère et très frais est parcouru par une multitude de racines ; il représente l'ancienne couche arable. Sous la brousse naturelle, l'horizon de surface est relativement grumeleux et humifère, mais sec et l'horizon sous-jacent forme une couche compacte, sèche et sans racine.

Ces auteurs en concluent que la bananeraie présente d'importants avantages par rapport à la friche :

- apport considérable de matières organiques en surface (accumulation de 10 cm de terreau en 10 années, soit 1 cm par an !). Cet enrichissement superficiel constitue un obstacle puissant à l'érosion et une garantie contre l'incinération ;
- couche arable plus épaisse ;
- horizon d'infiltration nettement caractérisé dans le profil sous bananiers. Il est dû vraisemblablement à la pénétration en profondeur de matières humiques formées en grandes quantités par la décomposition des déchets organiques qui recouvrent le sol ;



Bananeraie traditionnelle peu dense mais sol couvert par plusieurs cultures associées.

© H. Duchaufour

– présence de racines à 80 cm de profondeur sous le profil de la bananeraie, alors que le profil de la friche naturelle, les racelles sont présentes en grand nombre dans la couche arable, mais rares dans les horizons inférieurs.

La conclusion de cet examen va donc nettement en faveur de la bananeraie. Les auteurs soulignent même, alors qu'à l'époque les éclaircies étaient recommandées, que de toutes les cultures pratiquées par « l'indigène », celle du bananier abîme le moins le sol. Ainsi, après avoir pris soin d'observer les effets de la bananeraie sur le terrain, ces auteurs proposent « la jachère à bananeraie » comme une technique de préservation du sol à l'érosion et de cumul de fertilité. Il s'agit en effet d'une technologie endogène à l'exploitation burundaise que les agriculteurs burundais ont adaptée à leur manière dans l'idée, bien entendu, de cumuler la fertilité. Hendrickx et Hendrickx suggèrent une mise en valeur d'une friche par débroussaillage suivie de la mise en place de bananiers tous les 2 mètres, lesquels précèdent toute autre plantation. Les cultures suivant une rotation se font entre les bananiers durant deux années en terminant par le haricot si le couvert des bananiers n'est pas encore trop dense.

La bananeraie et son couvert

Dans les régions à forte densité humaine (Mumirwa, Buyenzi et Kirimiro de la figure 1), la bananeraie occupe une place prépondérante de l'espace agricole. Elle correspond à un système cultural complexe où sont associés généralement bananiers, colocases et arbres agroforestiers pour les plus denses, haricots et céréales pour les bananeraies les plus éclaircies et toutes cultures vivrières pour les bananeraies juvéniles. Cependant, il existe des différences importantes selon l'état qualitatif des sols rencontrés. Il faut en effet une fertilité naturelle de départ prépondérante pour obtenir un effet optimal de la jachère améliorée. En conditions desséchantes (sols superficiels) et peu fertiles, la restauration par la bananeraie ne sera pas aussi rapide ni bénéfique qu'en sol profond et naturellement humifère. Les agriculteurs savent parfaitement qu'un bananier ne répondra dans ce cas qu'après avoir apporté massivement de la matière organique. Le bananier s'accommode en revanche parfaitement d'une terre moyenne, s'il fait l'objet d'un minimum de soins culturaux. Les expérimentations réalisées sur parcelles d'érosion en milieu contrôlé confirment ce constat.

Les différentes conduites de la bananeraie et leur impact

De nombreuses études sur plusieurs continents et sous différents climats ont démontré que sous couverts denses, l'érosion est toujours négligeable. Sous forêts ombrophiles, jachères naturelles épaisses ou prairies permanentes non dégradées, elle est de l'ordre de 0,01 à 1,5 t/ha/an avec des ruissellements

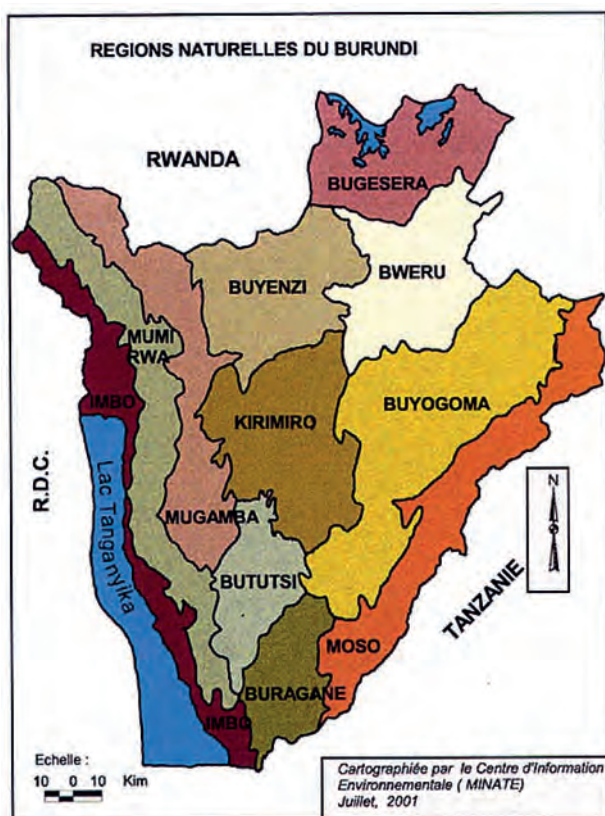


Figure 1
Carte des différentes régions naturelles du Burundi.

compris entre 0,5 et 5 % en moyenne, exceptionnellement plus pour les averses décennales (ROOSE, 1994). L'écran total est donc bien le meilleur moyen de protéger le sol.

Dans un souci de mesurer l'effet protecteur de la bananeraie dans les conditions moyennes de pentes observées (45-50 %) du Mimirwa central, les chercheurs de l'Isabu l'ont comparé aux deux autres couvertures pérennes : une pineraie avec sa litière d'aiguilles de pin et une caféière protégée d'un paillis épais de 7 cm, tel qu'imposé par la législation burundaise.

Les essais réalisés dans une bananeraie d'une vingtaine d'années en milieu réel donnent des résultats intéressants en ce qui concerne l'évolution de l'érosion en milieu rural, puisque cette culture imprime de plus en plus le paysage agraire burundais. Le sol de la station expérimentale (Rushubi I/II dans le Mimirwa central) est constitué d'un épais colluvionnement de sable de 35 cm ($\text{pH} \approx 4,5$ à 5,0 et $\text{CEC} \approx 8 \text{ méq}/100 \text{ g}$ de terre en surface) recouvrant un horizon B argileux ferrallitique développé sur un substrat schisteux.

Tableau I
Comparaison de l'indice du couvert végétal (C)
de trois principaux couverts permanents burundais
(bananeraie, caféière paillée et plantation de pin).

Pédo-paysages	Cultures pérennes	Indice C du couvert végétal
Rushubi I/II	• Bananeraie suivant conduite paysanne	0,03 à 0,24
Rushubi I (pente 50 %)	• Caféière avec paillis épais de 7 cm d'épaisseur	0 à 0,002
	• Boisement de <i>Pinus kesiya</i> avec sa litière d'aiguilles	0 à 0,006
	• Manioc de 1 ^{re} année sur buttes isohypses sous pineraie fortement éclaircie et rangement des aiguilles en courbe de niveau	0,02

Conduite paysanne non intensive avec exportation des résidus (A, 1^{er} système testé)

On constate que la bananeraie peu intensive ne protège pas efficacement le sol. Les pertes mesurées sur des parcelles de 300 m² montrent que le ruissellement est encore important (entre 4 et 16 %). Associées ou non à des cultures sarclées, les pertes moyennes sur cinq années expérimentales correspondent à 40 t/ha/an. En cinq années, 1,3 cm de sol est décapé ; en un siècle, c'est toute la couche arable (25 cm) qui disparaît. C'est bien au-dessus du seuil acceptable pour ces sites vulnérables, du fait de la minceur et de la pauvreté de la couche arable de ces sols, de l'exportation des résidus de la bananeraie sur les caféières et des conditions topographique sévères (45 %).

Conduite expérimentale intensive (B, 2^e système testé)

La bananeraie est une culture affectée par un grand nombre d'agriculteurs burundais qui la conduisent de manière intensive autour de l'habitat en restituant une grande partie ou la totalité des résidus. Elle reçoit la majeure partie du compost et/ou du fumier disponible (RISHIRUMUHIRWA, 1993, 1997), ainsi que les déchets de cuisine. Dans ces conditions qualifiées d'intensives, soit plus de 8 000 pieds par hectare, son couvert est plus important et le paillage plus protecteur. Nous sommes loin des résultats médiocres évoqués ci-dessus, mais proche du modèle de conduite expérimentale qui est vulgarisé par certains projets de développement (SIMONART, 1992) : éclaircissement de la bananeraie pour y cultiver du vivrier en association, disposition de tous les déchets existants en bandes isohypses équidistantes de 3-4 m en prenant le soin de changer à chaque saison leur emplacement et de pratiquer le labour en courbe de niveau. Les ruissellements sont ainsi fortement atténués (de 0,5 à 5 %), de même que les pertes en terre. Nous enregistrons en moyenne sur trois années une érosion de 12 t/ha/an, ce qui correspond à 32 % des pertes de la conduite précédente.

De toute évidence, la performance de ces résultats est due à une pratique qui s'apparente à une jachère à bananeraie dense dont l'amélioration consiste, après éclaircie, en un rangement des résidus en bandes (facteur P moyen de 0,17) et en une restitution des déchets végétaux.

Il est certain que plus on pratique le nettoyage des parcelles et plus on diminue la couverture végétale, plus on augmente les risques d'érosion et on contribue à l'appauvrissement de la fertilité de ces sols acides. Les résultats sur les deux parcelles uniformément paillées montrent que le paillage constitue indéniablement le meilleur moyen de protéger le sol contre le ruissellement : la pineraie, avec son épaisse litière d'aiguilles mortes obtenue dès la deuxième année de plantation, joue un rôle identique à celui du paillage épais de la caféière ou de la forêt dense : pas d'érosion et très peu de ruissellement (0,5 %) malgré la forte pente expérimentale (50 %), même en année très pluvieuse ($R_{am1983-1984} = 591$).

En fin de compte, une bananeraie dense peu cultivée mais régulièrement sarclée, disposant de tout son stock organique (1 à 2 t de MS/ha/an) pour maintenir la fertilité du sol, est certainement le sous-système cultural le plus protégé de tous avec celui du café (DUCHAUFOR, 1993). Le problème s'aggrave sérieusement lorsque cette biomasse est exportée en grande partie sur la caféière ou lorsqu'elle est destinée à l'alimentation pour le bétail. À l'inverse, les pertes dues à l'érosion peuvent être compensées par les apports organiques de l'exploitation bananière (feuilles, peaux de banane et vieux stipes de bananier) s'ils sont normalement restitués au sol et contribuent au redressement de la fertilité organique et structurale des sols.

Les travaux de RISHIRUMUHIRWA (1993 a et b, 1997), dans la région du Kirimiro (carte 1), donnent des résultats comparables pour la bananeraie éclaircie à condition de recourir à une gestion des résidus en bandes et non en cercle autour des bananiers. La biomasse produite dans et hors exploitation converge vers l'habitation où elle est transformée en fumier-compost et en cendres pour être ensuite redistribuée sur les cultures. Les associations bananiers-maïs-haricot permettent à une fumure unique de profiter à plusieurs cultures en même temps. Ses conclusions sont détaillées au chapitre 15.

Performance économique de la bananeraie

Les principaux résultats des études réalisées par l'Adeprina au début des années 1990 montrent que la bananeraie est parmi les mieux placés des systèmes de culture ($VA/are = 730$ à $4\ 000$; $VA/jour\ de\ travail = 200$ à $1\ 600\ Fbu$) et dépasse même la caféière ($VA/are = 500$ à $3\ 000$; $VA/jour = 40$ à $400\ Fbu$), culture de rente de prédilection (COCHET, 1993) : (en Fbu 93 $\text{€} = 275\ Fbu = 1\ \text{€}$).

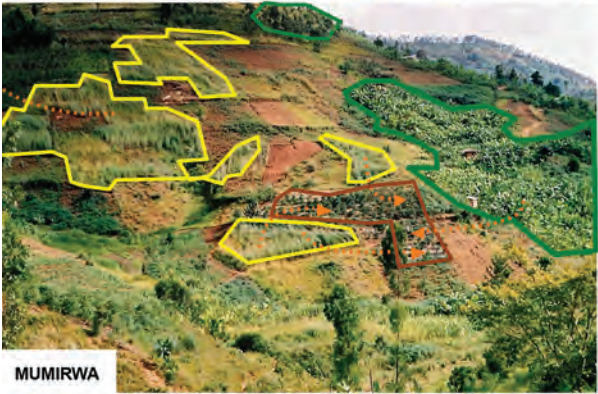
Ces résultats confirment l'intérêt que l'agriculteur burundais porte à sa bananeraie. La valeur ajoutée/actif/are domine dans toutes les régions du pays, même dans le Buyenzi, région caféicole par excellence. Ajoutons à cela que la

valorisation d'une journée de travail est bien plus rentable avec la bananeraie, en particulier dans les régions densément peuplées. PAULTRE (1992), lors de ses enquêtes dans le Mimirwa, estime pour sa part que la bananeraie ne demande que 1,7 jour/are/an alors que la caféieraie exige 5,2 et le manioc 6,2 jours/are/an. Les données du programme Érosion de l'Isabu corroborent les siennes. On peut comprendre pourquoi la bananeraie monopolise tant l'intérêt des Burundi. Ils en tirent de nombreux avantages aussi bien sur le plan monétaire que sur le plan de l'accumulation du capital fertilité, sans oublier celui des relations puisque la bière de banane est le complément indispensable des fêtes et cérémonies. En outre, la part du café dans la valeur ajoutée totale des exploitations agricoles et le revenu des agriculteurs sont généralement orientés à la baisse, contrairement au cas de la bananeraie (COCHET, 1993).

La bananeraie agroforestière : exemples de gestion de la biomasse

Au début du ^{xx}e siècle, la bananeraie n'occupait pas une place aussi importante dans les exploitations agricoles burundaises. Les systèmes de culture étaient plutôt caractérisés par les céréales, les légumineuses et par les cultures associées à l'élevage bovin. À l'époque, les non-propriétaires de bétail pouvaient obtenir par l'*ubugabire* une ou deux bêtes en échange de services rendus. C'est ainsi que les petits cultivateurs parvenaient à maintenir la fertilité en ramassant soigneusement la bouse pour la répandre sur les terres autour de la ferme. Si autrefois les grands éleveurs disposaient d'une main-d'œuvre en suffisance avec les redevances de l'*ubugabire*, elle est devenue aujourd'hui la contrainte limitante pour la plupart d'entre eux. Les transferts latéraux de fertilité se cantonnent aux surfaces assolées ceinturant la ferme et le maintien des grands troupeaux commence à devenir une lourde charge : gardiennage, régression des surfaces pâturables communautaires et disparition des pâtures d'été, servitudes de passage engendrant des conflits, concurrence des élevages rationnels, etc.

La colonisation agraire s'est ensuite rapidement développée sur les pentes du Mimirwa avec l'arbre agroforestier en tant qu'autre source d'accumulation de capital fertilité. Tous ces arbres associés au système des cultures vivrières et à une extension de la bananeraie complètent la panoplie des plantes productives dont les usages artisanaux, alimentaires et rituels sont multiples et permettent une diversification de la production sans trop affecter les plantes des basses strates. L'agriculteur connaît les arrangements qui réduisent les compétitions culturales, anticipe le comportement de son sol en effectuant les amendements suffisants lorsqu'il associe une espèce forestière avec une culture.



- Bananeraie agroforestière traditionnelle (forte densité autour des rugos => **capital fertilité**)
- Cafetière paillée (paillis de 7 cm d'épaisseur imposé par la loi)
- Jachères saisonnières à *Hyparrhenia* sp. destinées au paillage des caféières de proximité
- Exportation de la biomasse => **transfert de fertilité** vers les caféières

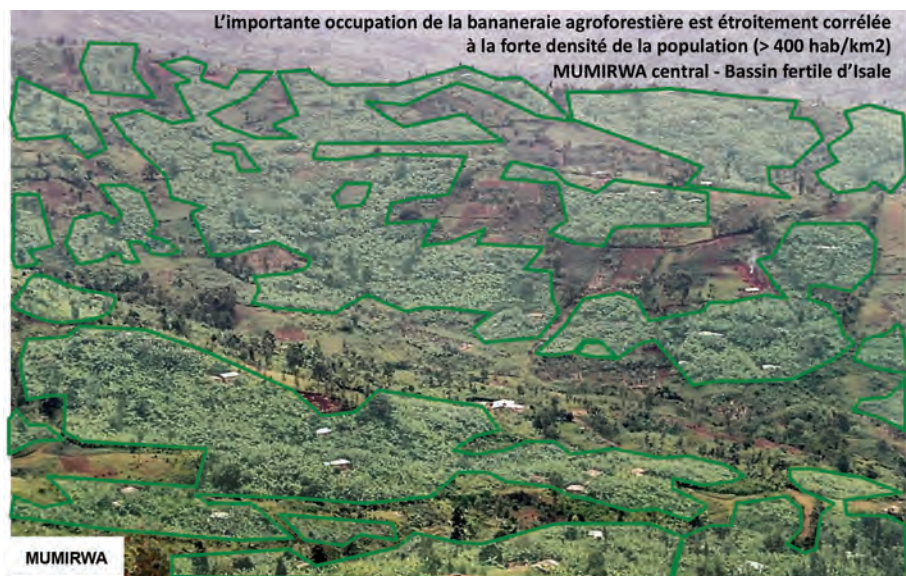


La bananeraie agroforestière dense est composée de trois strates de végétation au sein desquelles le bananier constitue la composante principale. Cet agro-système, typique de l'agriculture burundaise, ceinture les habitations burundaises (rugos) et reçoit tous les déchets organiques de la cuisine. Il offre de nombreux produits indispensables à la vie des familles rurales et, plus encore que la culture caféière, contribue à l'équilibre économique et social sur les collines. Sa conduite intensive associée à une bonne gestion des intrants organiques (disposition des déchets végétaux en andains, fumure organique régulière et suffisante) en fait un couvert protecteur efficace contre l'érosion. La bananeraie constitue par ailleurs un capital transmis d'une génération à l'autre.

Bananeraie agroforestière composée de trois strates autour des habitations, Mumirwa, Burundi.
© H. Duchaufour

Les bananeraies denses associées à des pratiques agroforestières paysannes, que ce soit au niveau des choix des espèces, de leur distribution dans le paysage parcellaire, ainsi que de leurs modes de gestion, peuvent éviter les pièges d'une distribution bien ordonnée des cultures en couloir tant préconisées par la recherche, même sur terrains dégradés. Dans ces situations, tous les arrangements végétaux sont possibles et préférés, l'essentiel étant de couvrir au maximum le terrain afin d'assurer une meilleure conservation de l'eau et du sol. Le paillage inerte constitue un écran protecteur total. Une couverture de faible épaisseur (1 à 2 cm) est suffisante pour dissiper l'énergie du ruissellement. Les résidus, laissés à la surface du sol ou disposés en bandes, sont largement plus efficaces pour réduire l'érosion que les résidus qui sont enfouis dans le sol pour en améliorer sa structure. Une trop grande épaisseur (> 5 cm) est en revanche un luxe coûteux pour le seul objectif de la protection des sols contre l'érosion. L'étalement *in situ* de ces biomasses non transformées par compostage favorise la volatilisation de l'azote, mais la protection du sol de l'érosion hydrique et de l'insolation compense largement ces pertes azotées. Le mulch de la jachère à bananeraie est ainsi une voie simple pour restituer la totalité de la biomasse et les nutriments qui le constituent (K, Ca, Mg et C par lessivage, puis N et P par minéralisation et humification à travers la méso et microfaune). Il peut même ainsi contribuer à un léger gain en fertilisants par rapport à l'enfouissement de matériaux préalablement compostés.

Les études de DUCHAUFOR et PARTY (1988) menées dans les bassins expérimentaux du Mumirwa de l'Isabu ont montré que la fertilité des sols et leur distribution dans le paysage géomorphologique donnent une bonne idée des processus d'enrichissement qui se déroulent. On observe un début de dégradation des hauts de bassin abrupts par appauvrissement physico-chimique (acidification, désaturation du complexe absorbant, apparition d'une toxicité aluminique) et enrichissement des thalwegs concaves à profil arrondi et des replats dans lesquels les pH (6 à 7,5), les concentrations organiques (5 à 8 %) et les CEC (> 20 méq/100 g de terre, saturées) sont plus élevés. Une forte occupation du sol constituée de 5 à 7 associations culturelles différentes est observée dans les zones les plus fertiles. Cette densité est encore plus remarquable dans la concavité des pentes occupées surtout par une bananeraie dense et la colocase. Elle assure ainsi un excellent couvert végétal continu dans le tiers inférieur du bassin qui absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie et du ruissellement. Depuis le démarrage du suivi expérimental des bassins en 1987, la densité du couvert s'est accrue considérablement. La bananeraie couvre, au fil des ans, de plus en plus les parties sommitales et les hauts de pentes (de plus de 60 % de déclivité), tandis que les systèmes culturels ont tendance à se complexifier. L'incidence de cette densification culturelle sur l'évolution physico-chimique des sols n'a pu montrer une cohérence entre les apports réguliers de compost-fumier et l'évolution des critères chimiques et physiques des parcelles, mais il est probable que cette densification accompagnée de méthodes intensives (restitution des résidus de culture et apports réguliers de fumure organique) contribue dans le temps et dans l'espace à restaurer la fertilité des sites les plus dégradés et à



Importante occupation des bananeraies denses associées dans la phase juvénile à diverses cultures vivrières et fourragères, Mumirwa central, Burundi.

© H. Duchaufour

maintenir le niveau de fertilité des zones les plus riches. En se référant à la description des profils pédologiques et à leur analyse physico-chimique, les sols ferrallitiques humifères acides sous couvert de bananeraie dense ont tous développé des caractères anthropiques liés aux techniques culturales associées, au mode de travail et à leur fréquence, au mode de conduite (densité de plantation, apports d'intrants, associations culturales,...) et aux critères de fertilité du milieu. À titre d'exemple, nos recherches sur le suivi de la fertilité d'une parcelle bananière de 10 ares, composée de 5 associations culturales, développée sur un sol ferrallitique très acide ($\text{pH} = 4,6$) chez un exploitant élevant un porc en stabulation permanente, ont montré que l'application régulière de la totalité du lisier récupéré équivalent à 2,2 t/ha de matière fraîche par saison culturale contribue à une teneur en matière organique satisfaisante (3,5 %) et au maintien de la saturation de la CEC en surface (86 %) par un équilibre très satisfaisant en calcium, magnésium et potasse. Tous ces facteurs réunis jouent sur la neutralisation de l'aluminium (pouvoir détoxifiant de la matière organique fraîche) dans l'horizon de surface (Indice de Kamprath $\text{Ik} = 9 \%$). Au-delà de 30 cm de profondeur, les caractères alliques apparaissent ($\text{Ik} = 71 \%$).

Le fumier (ou les simples déjections animales) étant souvent le principal effluent organique restitué au sol, sa production est plus privilégiée par les agriculteurs que le lait ou la viande. Si un exploitant en dispose d'une quantité suffisante, cela lui permet (COCHET, 1993) de faire une plus-value de 450 Fbu (équivalent à 1,65 €) par panier (15 kg), soit un supplément de production deux fois plus élevé que le montant de la valeur ajoutée directement issue de l'élevage (NEUVILLE, 1992).

Les résultats de RISHIRUMIRWA et ROOSE (1998) ont ainsi conduit à proposer des méthodes optimisées de production et de gestion des exploitations traditionnelles basées sur la diversification des sources de résidus et l'intensification de la production agricole. Cela suppose notamment l'introduction de l'agroforesterie dans les systèmes culturaux, l'intégration du petit élevage dans le système d'exploitation, notamment pour le recours à la fumure organique et, si possible, à l'apport d'engrais minéraux. C'est le concept de la gestion durable de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) introduit au Rwanda par ROOSE *et al.* (1988).

Conclusion

Agrosystème typique de l'agriculture burundaise, la bananeraie agroforestière dense est composée de trois strates de végétation au sein desquelles le bananier constitue la composante principale, tandis que les arbustes de légumineuses apportent la litière riche en azote qui couvre le sol sous les cultures vivrières. Elle ceinture les habitations et reçoit tous les déchets organiques de la cuisine. Dans les conditions de fortes pentes du Mumirwa central, sa conduite intensive

associée à une bonne gestion des intrants organiques (restitution et disposition de tous les déchets végétaux en andains ou en paillis léger sur toute la surface, fumure organique régulière et suffisante) en fait un couvert protecteur efficace contre l'érosion. La bananeraie constitue ainsi un capital transmis d'une génération à l'autre et permet d'offrir de nombreux produits indispensables à la vie des familles rurales ; elle contribue par ailleurs à l'équilibre économique et social sur les collines en dégageant une valeur ajoutée largement supérieure au café.

Même si les conditions montagneuses du Burundi ne simplifient pas le développement de l'agriculture, l'agriculteur connaît, quant à lui, ses limites même si parfois dans certaines régions, comme le Mumirwa, il cultive sur des pentes que les experts qualifient d'extrêmes (≥ 60 à 80%). La diversité culturelle et biologique associée à la bananeraie présente toutes sortes d'alternatives qui sont pour certaines très simples, non coûteuses et ne demandant aucun effort particulier et dont la densité du couvert végétal, à la fois aérienne et au sol, exerce un impact améliorant sur la fertilité et positif sur l'érosion et sur le ruissellement.

En définitive, contrairement aux recommandations de différents séminaires et missions, il s'avère parfaitement utopiste de limiter l'agriculture burundaise à un seuil d'inclinaison qu'il convient de ne pas dépasser. Si autrefois, les ingénieurs prescrivaient des pentes limites de 40% , aujourd'hui grâce à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, les familles rurales burundaises ont pu démontrer qu'elles pouvaient s'adapter aux conditions extrêmes en s'appuyant sur la gestion raisonnée de l'eau et des nutriments du sol pour maximaliser la productivité des terres et en associant la fumure organique et minérale aux techniques antiérosives.

Bibliographie

BENDJEFFAL B., DIALLO A., DUCHAUFOR H., LORMANN C., NGOUAKA F., 1993 – *Contribution au diagnostic des systèmes de production de la province de Muyinga (Burundi). Analyse de la problématique de la fertilité des terres*. Icrta et Isabu Édit., 95 p. + annexes.

COCHET H., 1993 – *Étude sur la dynamique des systèmes agraires au Burundi*. Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Adeprina, 200 p.

COCHET H., 1996 – Gestion paysanne de la biomasse et développement durable au Burundi. *Cah. Orstom, sér. Sci. Hum.*, 32 (1) : 133-151.

COCHET H., 2004 – Agrarian dynamics, population growth and resource management: the case of Burundi. *Geojournal. An international journal on human geography and Environment sciences*, 60 :

111-122, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

DUCHAUFOR H., 1993 – *Stratégie de développement régional. Une approche spatiale de l'environnement rural des bassins versants de la Ntahangwa et de Muha*. Montpellier, Cirad-SAR, 52/93, 70 p.

DUCHAUFOR H., PARTY J. P., 1988 – *Étude de la conservation des eaux et des sols dans le Mumirwa. Cas de deux bassins versants. Commune d'Isale*. Mission d'appui technique à l'Isabu, 42 p. + annexes + planches couleurs.

HENDRICKX F. L., HENDRICKX J., 1948 – « La jachère à bananiers ». Conférence Africaine des Sols, Goma, Congo Belge, 8-16 novembre : 1701-1712.

ISABU, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992 – Institut des sciences agronomiques du Burundi. Rapports annuels, Programmes Agroforesterie, Sylviculture et Érosion, Bujumbura.

ISABU, 1993 – *Rapport annuel 1992-1993*. Atelier régional de recherche du Buyenzi, 97 p.

NEUVILLE A., 1992 – *Diagnostic du système agraire du Buyenzi (Burundi)*. Mémoire de DAA, chaire d'agriculture comparée, INAPG, Paris.

OPDECAMP L., MUSONI I., GOURDIN J., 1988 – Effets stimulants et toxiques de l'aluminium sur la croissance des plantes cultivées dans les sols humifères acides du Burundi. *Publication Isabu*, 129, 26 p.

PAULTRE V., 1992 – *La sous-région agricole du Mumirwa central : diagnostic et alternatives de développement*. Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise en politique, programmes et projets de développement agricole et rural, chaire d'agriculture comparée, INAPG, Paris.

RISHIRUMUHIRWA T., 1993A – Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol. *Bulletin Réseau Érosion*, 13, Orstom Montpellier : 63-70.

RISHIRUMUHIRWA T., 1993B – Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 367-383.

RISHIRUMUHIRWA T. 1997 – *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations*

agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro-Burundi). Thèse de doctorat en sciences techniques, École polytechnique de Lausanne (EPFL, Suisse), 224 p.

RISHIRUMUHIRWA T., ROOSE É., 1998 – « The contribution of banana farming systems to sustainable land use in Burundi ». In Blume H., Eger H., Fleishauer E., Hebel H., Reij C., Steiner K. (eds) : *Towards sustainable land use*, Catena publisher, Germany, *Advances in Geo Ecology*, 31 : 1197-1204.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO*, 70, 420 p.

ROOSE É., NYAMULINDA V., NDAYIZIGIYE F., BYIRINGIRO E., 1988 – La GCES, une nouvelle stratégie antiérosive pour le Rwanda. *Bull. Agricole du Rwanda*, 4 : 264-277.

SIMONART T., 1992 – *La conservation des sols en milieu paysan burundais, étude et hiérarchisation des stratégies antiérosives*. Université catholique de Louvain La Neuve (Belgique) et Isabu-Bujumbura, 141 p. + annexes et planches photos.

SIMONART T., DUCHAUFOR H., BIZIMANA M., MIKOKORO C., 1994 – La conservation des sols en milieu paysan burundais. Étude et hiérarchisation des stratégies antiérosives. *Cahier d'Outre-Mer*, 47 (185).

Effets de jachères agroforestières sur la réhabilitation et la productivité de sols ferrugineux tropicaux des savanes soudaniennes du Nord-Cameroun

Jean-Michel HARMAND

Clément FORKONG NJITI

France BERNHARD-REVERSAT

Robert OLIVER

Régis PELTIER

Introduction

En zone de savane d'Afrique subsaharienne, la nécessité de nourrir une population croissante tout en préservant l'environnement, en particulier le capital sol, constitue un enjeu majeur, et il y a une nécessité, dans de nombreux cas, de restaurer des sols très dégradés suite à des cultures continues à faible niveau de fertilisation minérale et organique. Certains travaux agronomiques ont montré que la seule fertilisation minérale ne permet pas sur le long terme, un maintien ou une augmentation du rendement des cultures, suite à une diminution des stocks organiques des sols et à une dégradation de toutes les propriétés physiques, chimiques et biologiques qui y sont liées (PIERI, 1989). L'introduction de

pratiques agroforestières sous forme de jachères ligneuses améliorées, qui permettraient à la fois de maintenir ou de restaurer la fertilité (en agissant sur l'ensemble des cycles biogéochimiques) et de produire du bois ou un autre produit tel que la gomme arabique, apparaît comme une des alternatives prometteuses pour gérer durablement la fertilité des terres.

La situation des sols ferrugineux du bassin de la Bénoué au Nord-Cameroun a servi de cadre à cette étude dont l'objectif était de comparer l'effet de diverses espèces ligneuses sur la fertilité du sol et de comprendre les processus écologiques en jeu par l'analyse du fonctionnement biogéochimique de chaque peuplement de jachère. Une jachère spontanée herbacée protégée contre le feu et le pâturage, et des jachères protégées et plantées en *Acacia polyacantha* (Mimosacée), *Senna siamea* (Caesalpinacée) ou en *Eucalyptus camaldulensis* (Myrtacée) ont été comparées à une culture continue.

Matériels et méthodes

L'étude s'est appuyée sur un dispositif expérimental réalisé dans le village de Ngong au sud de Garoua (Nord-Cameroun). La pluviosité moyenne annuelle du site a été de 1 050 mm au cours de l'étude. Le sol, de type ferrugineux, formé sur des grès du Crétacé moyen, est pauvre en matière organique (MO), très sableux en surface et plus argileux en profondeur. Si dans l'horizon 0-10 cm, le taux d'argile + limons fins est inférieur à 10 %, à 1 m de profondeur, il est de 40 %. Selon la capacité des espèces végétales à exploiter cette richesse minérale en profondeur, les bilans organique et minéral de la jachère seront modifiés.

Dans leur jeune âge, les arbres plantés ont été associés aux cultures : arachide en 1^{re} année et cotonnier en 2^e année. Ensuite, le terrain a été laissé sans culture pendant 5 ans jusqu'à exploitation des arbres alors âgés de 7 ans. Lors de la coupe des arbres, le bois de diamètre supérieur à 3 cm a été sorti des parcelles et les résidus d'exploitation ont été étalés, puis brûlés avec la litière. Le labour en traction animale a été effectué dans de bonnes conditions malgré les racines et les souches des arbres, et la rotation de cultures maïs-coton a été pratiquée pendant 3 ans.

Dans cette étude, les méthodes classiques d'étude des cycles biogéochimiques (RANGER et TURPAULT, 1999) ont permis de quantifier les flux et les bilans organiques et minéraux à l'échelle des agro écosystèmes, sur une base saisonnière, annuelle et pluriannuelle.

Le stockage des bioéléments dans la végétation ligneuse et herbacée des jachères a été évalué en distinguant les compartiments de biomasse aérienne, de biomasse racinaire et de litière. Les flux de bioéléments au sein des agro écosystèmes ont été étudiés, en incluant les retombées de litière d'arbres et d'herbe et la



*Étude expérimentale du fonctionnement des jachères
à Acacia polyacantha, Senna siamea, Eucalyptus camaldulensis
et Andropogon près de Garoua, Nord-Cameroun.
© J.-M. Harmand*

décomposition des litières. Quelques flux majeurs du cycle de l'azote (minéralisation de l'azote du sol *in situ* et fixation de N_2 par la légumineuse) ont également été estimés.

L'évolution des caractéristiques physiques et chimiques du sol a été étudiée avec une analyse particulière de la dynamique des fractions organiques du sol. Cette approche a été complétée par une analyse du comportement des cultures après jachère.

Résultats et discussion

En comparaison de la jachère herbacée, l'introduction d'arbres à croissance rapide dans la jachère a augmenté grandement l'accumulation de matière organique et de nutriments dans la biomasse aérienne et souterraine (HARMAND *et al.*, 2004a). De plus, les espèces *A. polyacantha* et *E. camaldulensis* ont nettement accru la productivité de la jachère. En augmentant l'évapotranspiration du système, les arbres limitent le drainage profond et permettraient ainsi une réduction de la lixiviation et une meilleure rétention des éléments minéraux apportés par la pluie.

Le stockage des éléments dans le sol et la biomasse souterraine a revêtu une importance particulière

Dans un contexte de forte exploitation de la biomasse aérienne et de systèmes de culture à faibles apports d'intrants, le stockage de l'azote et des bioéléments dans les compartiments souterrains (MO du sol et phytomasse racinaire) est un processus majeur dont l'importance conditionne l'efficacité agronomique de la jachère. En effet, ces compartiments souterrains feront l'objet de dégradation biologique et de libération des nutriments lors des cultures succédant à la jachère. Du point de vue de l'économie de l'azote, le stockage souterrain de cet élément est d'autant plus important que le brûlis des résidus est la pratique courante avant mise en culture de la jachère. Le stockage de l'azote dans le système racinaire d'*A. polyacantha* à 7 ans (340 kg N/ha) équivalait au stockage d'azote dans la biomasse totale et la litière des autres espèces. D'autre part, le système racinaire de l'eucalyptus ne représentait que 18 à 27 % de l'accumulation des différents nutriments majeurs dans sa biomasse et sa litière, alors que ces proportions étaient de 39 % à 52 % pour *S. siamea* et de 32 % à 47 % pour *A. polyacantha* (HARMAND *et al.*, 2004a). Par conséquent, *A. polyacantha* a présenté de loin les meilleurs atouts, *S. siamea* s'est montré au moins aussi favorable que la jachère herbacée ; par contre *E. camaldulensis* n'a pas présenté les qualités requises pour une bonne jachère.

Amélioration du statut carboné et azoté

Par la fixation symbiotique et le recyclage de l'azote, *A. polyacantha* a amélioré le statut carboné et azoté du sol. Les différences significatives de teneur en carbone et azote du sol entre les types de jachère ont été limitées à la profondeur de 20 cm, et pour l'ensemble des modes de gestion du sol incluant la culture continue, à la profondeur de 40 cm.

Le peuplement d'*A. polyacantha* a été la seule jachère montrant une amélioration significative du statut organique du sol, avec une augmentation du stock de carbone de 2,5 t/ha (+ 28 %) en 6 ans (4 ans de jachère) dans l'horizon 0-20 cm (approche diachronique). Cette amélioration était essentiellement due aux

fractions organiques grossières (50-2000 μm), donc vraisemblablement à la présence de débris organiques peu évolués. Une augmentation de la teneur en C et N de la fraction organominérale (0-20 μm) a aussi été observée, indiquant une humification des débris végétaux (HARMAND *et al.*, 2004b) ; ce processus a déjà été mis en évidence par BERNHARD-REVERSAT (1987) pour *Acacia seyal* à 14 ans au Sénégal. Dans le même temps, le stock de C du sol en culture continue a décru significativement de 1,9 t/ha.

La fixation d'azote atmosphérique par *A. polyacantha*, évaluée à 90 kg/ha/an (HARMAND, 1997), et son recyclage important par l'intermédiaire de la litière en décomposition rapide, ont favorisé son stockage dans les différents compartiments de l'agroécosystème, en particulier dans les compartiments sol et racines. Le taux de minéralisation de l'azote du sol à 6 ans a été de quatre à sept fois plus important que dans les autres jachères (HARMAND et NJITI, 1998).

Prélèvement des éléments minéraux du sol

E. camaldulensis prélève les éléments minéraux du sol et restitue peu en raison d'une forte accumulation de litière au sol

Chez *E. camaldulensis*, à 7 ans, la forte accumulation d'éléments minéraux dans la biomasse et la litière au sol a été à l'origine d'un effet dépressif sur les caractéristiques chimiques du sol, ce qui a correspondu à une désaturation du complexe absorbant et à une baisse significative de CEC (résultats obtenus par HARMAND et NJITI (1998), en utilisant l'approche diachronique). À l'échelle du dispositif, les caractéristiques du complexe absorbant de l'horizon 0-10 cm : CEC, somme des bases, teneurs en Mg et Ca échangeables sont corrélées positivement avec le C du sol. La faible incorporation de MO au sol sous eucalyptus (tabl. 1) est associée à une plus faible porosité de l'horizon de surface que dans les autres jachères (HARMAND et NJITI, 1998) et à un développement limité du système racinaire en surface (HARMAND *et al.*, 2003). Les effets défavorables des jeunes plantations d'*Eucalyptus* sur les caractéristiques chimiques du sol ont déjà été évoqués par différents auteurs : POCHON *et al.* (1959) au Maroc, BERNHARD-REVERSAT (1987, 1988) au Sénégal, BERNHARD-REVERSAT (1996) au Congo. Plus généralement, les effets néfastes des jeunes plantations forestières sur les caractéristiques chimiques du sol en surface sont une tendance pour de nombreuses espèces ligneuses. Au Nigeria, CHIJCKE (1980) note une baisse du taux de MO du sol sous *Gmelina arborea* comparativement à la strate herbacée environnante. Aux Philippines, OHTA (1990) constate une dégradation des caractéristiques organiques (C et N) et de la CEC sous *Acacia auriculiformis* de 5 ans, ainsi qu'une baisse du taux de MO et une acidification du sol sous *Pinus kesiya* de 8 ans. Au Congo, BERNHARD-REVERSAT (1996) constate, sous *A. auriculiformis* et *Acacia mangium*, à l'âge de 7 ans, une plus faible teneur en bases échangeables du sol (K, Ca, Mg) que dans la strate herbacée environnante.

Tableau 1
Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon 0-10 cm
(âge des peuplements de jachère : 6 ans).

Traitement	C total %	N total %	P Olsen mg g ⁻¹	pH	Ca	Mg	K	CEC
					Méthode cobaltihexamine (cmol kg ⁻¹)			
Culture continue	2,6 c	0,27 b	12,1 a	6,05 b	0,85	0,19 c	0,06	1,26 b
Jachère herbacée	3,4 b	0,34 a	5,62 b	6,41 a	1,13	0,35 ab	0,07	1,67 ab
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	3,1 bc	0,34 a	5,65 b	6,45 a	1,15	0,30 b	0,10	1,74 a
<i>Acacia polyacantha</i>	4,1 a	0,38 a	5,38 b	6,33 a	1,19	0,41 a	0,07	2,00 a

Source : d'après HARMAND et NJITI, 1998.

Dans une colonne, deux valeurs indexées d'une même lettre ne diffèrent pas à P = 0,05.

La dégradation des caractéristiques chimiques du sol sous de jeunes plantations forestières serait due à l'augmentation de la minéralisation de la MO initiale et au prélèvement d'éléments minéraux par les arbres. Ces pertes ne seraient compensées que lentement par des apports liés à la décomposition des litières. Néanmoins, avec le temps, les auteurs observent en général une amélioration des caractéristiques du sol. Il existe une période de latence, variable selon l'espèce, entre la plantation et l'augmentation des taux de carbone et d'azote sous couvert. Dans notre étude, les espèces ligneuses ont influencé chacune différemment le cycle des bioéléments avec des effets favorables ou défavorables sur certaines caractéristiques du sol.

Les arbres associés au brûlis ont remonté les éléments minéraux dans les couches supérieures du sol

Dans cette étude, les arbres se sont montrés supérieurs aux herbacées dans le transfert d'éléments minéraux (calcium en particulier) qui sont passés des couches du sol plus profondes que 40 cm, dans la phytomasse. Ce phénomène a permis, lors de l'exploitation et du brûlis des résidus, d'améliorer les caractéristiques minérales de l'horizon de surface du sol des jachères ligneuses par rapport à la jachère herbacée, ceci malgré les exportations de bois. En effet, la jachère herbacée a montré un plus faible taux de Ca échangeable et une plus faible somme des bases au moment de la remise en culture (HARMAND et NJITI, 1998) (tabl. 2). Le brûlis de la litière et des résidus d'*E. camaldulensis*, dont la masse représentait deux fois celle des autres précédents arborés, a amélioré amplement l'effet de l'arbre sur le complexe absorbant, en particulier sur le pH, la CEC, les taux de Ca échangeable et de P assimilable (tabl. 1 et 2). L'effet du brûlis a été moins net avec les autres espèces ligneuses utilisées dans la jachère et au final, les caractéristiques du complexe absorbant différaient peu entre les précédents arborés au moment de la remise en culture (OLIVER *et al.*, 2000). Aussi l'intensité d'exploitation de la biomasse aérienne influence directement la conservation des nutriments du système et leur



*Jachère d'Eucalyptus, graminées fauchées
et enfouies par labour aux bœufs : Garoua, Cameroun.
© J.-M. Harmand*

restitution à la surface du sol. Pour l'eucalyptus, l'écorçage des troncs sur le site aurait permis de réduire l'exportation de Ca de 70 % et de Mg de 43 % (HARMAND *et al.*, 2004a).

Tableau 2
Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon 0-10 cm avant remise en culture, après brulis des résidus d'exploitation et labour (âge des peuplements de jachère : 7 ans).

Traitement	C total %	N total %	P Olsen mg g ⁻¹	pH	Ca	Mg	K	CEC Méthode cobaltihexamine (cmol kg ⁻¹)
Culture continue	3,0 b	0,32 b	13,5	6,0 c	0,95 d	0,27 c	0,08	1,31 b
Jachère herbacée	4,7 a	0,41 a	6,0	6,5 b	1,35 c	0,43 ab	0,11	2,00 a
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	4,2 a	0,39 ab	14,5	7,7 a	2,22 a	0,39 b	0,11	2,41 a
<i>Acacia polyacantha</i>	4,9 a	0,44 a	10	6,6 b	1,77 b	0,48 a	0,08	2,35 a

Source : d'après HARMAND et NJITI (1998).

Dans une colonne, deux valeurs indexées d'une même lettre ne diffèrent pas à P = 0,05.

L'acacia a permis un transfert d'azote et une augmentation du rendement de la céréale cultivée après jachère

Sans apport d'engrais, les deux premières années de remise en culture ont montré un effet supérieur très net du précédent *A. polyacantha* sur la production du maïs. En première année, on observe un triplement de la production en comparaison des autres précédents (2,4 t/ha de maïs-grain après *A. polyacantha* contre 0,6 à 0,8 après les autres jachères et 0,45 t/ha en culture continue) et en deuxième année, un doublement de la production (4 t/ha de maïs-grain après *A. polyacantha* contre 1,7 à 2,1 après les autres jachères et 1,3 t/ha en culture continue) (OLIVER *et al.*, 2000). En troisième année, l'arrière-effet d'*A. polyacantha* a été surtout montré par le poids de grain par pied de maïs, nettement supérieur à celui des autres précédents. En revanche, au cours des trois années étudiées, les autres précédents ont montré peu de différence avec la culture continue. On a observé pour les trois années une meilleure alimentation en azote et en magnésium du maïs après *A. polyacantha* (OLIVER *et al.*, 2000).

Par rapport aux autres systèmes étudiés, la plus grande capacité d'*A. polyacantha* à stocker de l'azote facilement minéralisable, à la fois dans la MO du sol et la phytomasse racinaire très développée en surface, explique son effet supérieur sur le comportement des cultures après jachère. Le pic de production de la culture pourrait coïncider avec la libération des nutriments par les débris végétaux et le système racinaire qui disparaît à 80 % durant les deux premières années de remise en culture, en particulier sous l'action des termites (OLIVER *et al.*, 2000).

La fertilité du sol, une fois améliorée, doit être conservée

La jachère ligneuse améliorée peut être utilisée comme une technique agroforestière de réhabilitation de sol, à laquelle succéderait un système de culture conservateur de la fertilité du sol de type agriculture sous parc arboré ou agriculture sous mulch. Le parc arboré pourrait être constitué, en partie, par les arbres de la jachère. Parmi les espèces de notre étude, il ressort que, seule *A. polyacantha* (légumineuse fixatrice d'azote) permet une amélioration rapide du statut organique du sol et une augmentation significative du rendement des cultures après jachère. Dans le cas de cette espèce, des arbres pourront être conservés en phase de culture afin de fournir de l'azote facilement minéralisable aux plantes cultivées. L'élagage partiel de ces arbres permettra de réduire les éventuels effets néfastes qu'auraient sur les cultures, l'ombrage et la concurrence racinaire. Ainsi taillés, ces arbres fourniront du bois de service, comme cela se pratique sur les monts Mandara au Nord-Cameroun. Cependant, l'inconvénient d'*A. polyacantha* est sa faible production non contrôlée de gomme arabique, faisant, pour l'instant, seulement l'objet de cueillette. Un autre acacia, d'origine sahélienne : *Acacia senegal*, se montre adapté aux conditions de pluviométrie de la zone soudanienne et fournit, dès l'âge de 4 ans, une gomme dure en quantité intéressante après saignée de l'arbre (50 à 250 kg/ha/an) (HARMAND *et al.*, 2012). Cette espèce fixatrice d'azote améliore les teneurs en C et N du sol (GAAAFAR *et al.*, 2006) et représente un enjeu économique motivant sa plantation en milieu rural (PELTIER *et al.*, 2012).

Conclusion

Pour caractériser l'impact des jachères sur la fertilité du sol, l'étude des compartiments organiques et des processus biologiques, tels que la dynamique du carbone et de l'azote du sol et le recyclage des nutriments, s'est révélée plus pertinente que les analyses chimiques de sol effectuées couramment en début de cycle cultural. En effet, l'action singulière d'*A. polyacantha* n'est pas montrée par les caractéristiques du complexe absorbant, mais par les compartiments organiques du sol influencés par la fixation symbiotique de l'azote et son recyclage. L'aptitude agronomique des espèces ligneuses en jachère pourrait être évaluée par différents indicateurs comme l'aptitude à fixer l'azote, la production et la qualité des litières, les caractéristiques racinaires (biomasse et renouvellement) et les activités biologiques du sol liées aux cycles du carbone et de l'azote. Dans leur synthèse, NYGREN *et al.* (2012) ont montré qu'en zone tropicale, la capacité des légumineuses arborées ou arbustives à soutenir la production agricole est souvent sous-estimée et sous-utilisée.

Bibliographie

BERNHARD-REVERSAT F., 1987 – Litter incorporation to soil organic matter in natural and planted tree stands in Senegal. *Pedobiologia*, 30 : 401-417.

BERNHARD-REVERSAT F., 1988 – Soil Nitrogen Mineralization under a *Eucalyptus* Plantation and a Natural *Acacia* Forest in Senegal. *Forest Ecology and Management*, 23 : 233-244.

BERNHARD-REVERSAT F., 1996 – Nitrogen cycling in tree plantations grown on poor sandy savanna soil in Congo. *Applied Soil Ecology*, 4 : 161-172.

CHIJICKE E. O., 1980 – *Impact on soils of fast-growing species in lowland humid tropics*. FAO For. Pap., 21, 30 p.

GAAFAH A. M., SALIH A. A., LUUKKANEN O., EL FADL M. A., KAARAKKA V., 2006 – Improving the traditional *Acacia senegal* crop system in Sudan: the effect of tree density on water use, gum production and crop yields. *Agroforestry Systems*, 66 : 1-11.

HARMAND J. M., 1997 – *Rôle des espèces ligneuses à croissance rapide dans le fonctionnement biogéochimique de la jachère. Effets sur la restauration de la fertilité des sols ferrugineux tropicaux (bassin de la Bénoué au Nord-Cameroun)*. Thèse doct., univ. Paris-VI, soutenue le 6 octobre 1997, Cirad-Forêt, Irad, 213 p.

HARMAND J. M., NJITI C. F., 1998 – Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. *Agriculture et développement, Spécial sols tropicaux*, 18 : 21-29.

HARMAND J. M., DONFACK P., NJITI C. F., 2003 – Tree-root systems and herbaceous species-characteristics under tree species introduced into grazing lands in subhumid Cameroon. *Agroforestry Systems*, 59 : 131-140.

HARMAND J. M., NJITI C. F., BERNHARD-REVERSAT F., PUIG H., 2004A – Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 188 (1-3) : 249-265.

HARMAND J. M., NJITI C. F., BERNHARD-REVERSAT F., OLIVER R., FELLER C., 2004B – « Changes in below ground carbon stocks during

the rotation "tree improved fallow-crops" in the dry tropics of Cameroon ». Book of Abstracts: 1st World Congress of Agroforestry, 27 June to 2 July 2004, Orlando, Florida, USA, 182 p.

HARMAND J. M., NTOUPKA M., MATHIEU B., FORKONG NJITI C., TAPSOU J. M., BOIS J. C., THALER P., PELTIER R., 2012 – Gum arabic production in *Acacia senegal* plantations in the Sudanian zone of Cameroon: effects of climate, soil, tapping date and tree provenance. *Bois et forêts des tropiques*, 311 : 21-33.

NYGREN P., FERNÁNDEZ M. P., HARMAND J. M., LEBLANC H. A., 2012 – Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94 : 123-160.

OHTA S., 1990 – Initial soil changes associated with afforestation with *Acacia auriculiformis* and *Pinus kesiya* on Denuded Grasslands of the Pantabagan Area, Central Luzon, the Philippines. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 36 (4) : 633-643.

OLIVER R., NJITI C. F., HARMAND J. M., 2000 – Analyse de la durabilité de la fertilité acquise suite à des jachères arborées au Nord-Cameroun. *Étude et Gestion des Sols*, numéro spécial, 7 (4) : 287-309.

PELTIER R., HARMAND J. M., MONTAGNE P., PALOU MADI O., 2012 – Étude de cas n° 6 : Plantation de jachères ligneuses légumineuses, régénération naturelle assistée des parcs arborés et plantation de haies pour la restauration de la fertilité des sols. Réussite et limite des projets DGPT et ESA au Nord-Cameroun. [S.l.] : [s.n.], [9] p.

PIERI C., 1989 – *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, Cirad (FRA), 444 p.

POCHON J., DE BARJAC H., FAIVRE-AMIOT A., 1959 – L'influence de plantations d'eucalyptus au Maroc sur la microflore et l'humus du sol. *Annales de l'Institut Pasteur*, 97 (3) : 403-406.

RANGER J., TURPAULT M. P., 1999 – Input-Output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 122 : 139-154.

Agriculture sur brûlis de jachères à acacias

Est-ce durable sur les sables du plateau Batéké, en République Démocratique du Congo ?

Régis PELTIER

Franck BISIAUX

Émilien DUBIEZ

Jean-Noël MARIEN

Vincent FREYCON

Le contexte, Kinshasa et le plateau

En République Démocratique du Congo (RDC), l'exode rural, aggravé par l'insécurité et les guerres civiles, a gonflé les villes et en particulier, Kinshasa (population estimée entre 8 et 10 millions d'habitants). Le bois énergie est la principale source d'énergie pour 90 % de sa population urbaine et une partie des industries : il représente 4,8 millions de m³ et emploie plus de 300 000 personnes (SCHURE *et al.*, 2011). Or, dans un rayon de 200 km autour de Kinshasa, il n'y a que très peu de massifs forestiers susceptibles de fournir ce bois énergie : la savane est la formation dominante avec quelques galeries forestières autour des rivières qui sont en voie de dégradation rapide (GOND *et al.*, 2016). La majorité de cette zone est occupée par le plateau Batéké d'une altitude moyenne de 700 m. Les sols sont sableux (Arénosols). Le climat est tropical chaud et humide (1 400 mm/an), avec une saison sèche de 4 mois (de juin à septembre). Les températures annuelles moyennes varient autour de 25 °C.

Le projet Mampu : du reboisement industriel à l'agroforesterie

Un modèle de jachère améliorée, inspiré du système traditionnel de culture par abattis-brûlis

En 1984, le projet Mampu a réalisé une plantation industrielle d'*Acacia auriculiformis*, sur 8 000 ha, avec un financement du Fonds européen de développement (FED). À partir de 1994, la plantation fut divisée, avec l'appui de la Fondation Hanns Seidel (FHS), en lots de 25 ha qui ont été attribués à des agriculteurs. Ceux-ci devaient gérer leur plantation suivant un modèle agroforestier inspiré du modèle traditionnel de culture par abattis-brûlis (*slash-and-burn*).

En effet, si le terme « système agroforestier » a un sens très large d'association entre arbre, culture et élevage, dans l'espace et/ou dans le temps (BAUMER et WOOD, 1986), on peut parler de « système agroforestier séquentiel » quand il s'agit d'alternance dans le temps, sur une même parcelle, entre culture et jachère forestière. C'est le cas pour l'amélioration de l'agriculture itinérante par la « jachère améliorée (*improved fallow*) ». La parcelle n'est pas abandonnée après les quelques saisons de culture, mais on ensemeence (ou on plante, ou on facilite la régénération naturelle) dans la jachère des arbres fixateurs d'azote, qui sont censés rétablir un sol de bonne qualité plus vite que les espèces spontanées. À Mampu, chaque année, l'« agrisylviculteur » exploite une parcelle d'environ 1,5 ha, transforme le bois en charbon, brûle les résidus en début de saison pluvieuse et met en place sa culture mélangée de maïs et de manioc. Il faut noter qu'*A. auriculiformis* ne rejette pas de souche, après la coupe. Le passage superficiel du feu lève la dormance des graines d'acacia qui germent en grand nombre. Lors des sarclages de ses cultures, l'agriculteur les préserve sur les lignes qui joignent les souches mortes. Au besoin, il peut regarnir les zones où les semis sont trop rares. Quatre mois après le feu, à la récolte du maïs, les acacias ont environ 1 m de haut ; 18 à 24 mois après le feu, à la récolte du manioc, les acacias ont environ 3 m de hauteur. Ce gaulis peut se développer sans autre intervention humaine, en dehors d'une éventuelle éclaircie, de la protection contre le feu et de l'élimination de quelques espèces arborées envahissantes. Il peut s'agir d'*Anthocleista schweinfurthii* ou de *Vernonia* sp. Douze ans plus tard, il peut revenir à nouveau exploiter sa parcelle et recommencer une nouvelle rotation.

Un inventaire réalisé en 2008 (DUCENNE, 2009) dans des parcelles plantées de 19 ans, a évalué des volumes variant entre 190 et 340 m³/ha, soit un accroissement annuel moyen de 10 à 18 m³/ha/an et une moyenne de 12 m³/ha/an. En principe, une parcelle de 12 ans pourrait contenir 144 m³/ha, soit environ 86 t de bois sec à l'air, qui donnerait 15,5 t de charbon/ha (avec une densité de 0,6 et un rendement de carbonisation de 18 %) soit 260 sacs de 60 kg de charbon/ha.

Des charbonniers de plus en plus performants

La carbonisation est de mieux en mieux maîtrisée par les agrisylviculteurs de Mampu avec un rendement qui varie entre 16 et 18 %. Ce rendement est satisfaisant par rapport aux rendements maximaux de 23 % que l'on trouve dans la littérature pour la carbonisation en meule. D'autre part, les accidents (incendie de la meule, brûlures des charbonniers) se font heureusement de plus en plus rares.



Meule de carbonisation de bois d'*Acacia auriculiformis* : projet Mampu, Congo RDC.

© R. Peltier

Des agriculteurs très productifs vue la pauvreté initiale du milieu

Alors que l'agriculture traditionnelle par abattis-brûlis exercée par les Téké ne s'applique qu'aux galeries forestières, c'est au contraire sur des sols de savane, considérés comme pauvres, qu'ont été installées les plantations d'*Acacia auriculiformis*, puis développé le système agroforestier de Mampu.

Ces sols de savane, des sols sableux (93 % de sable) classés comme des Arenosols, ont une faible valeur agronomique : ils sont acides ($\text{pH} = 5,5$), ont une faible capacité d'échange cationique ($\text{CEC} = 2,8 \text{ cmol}^+/\text{kg}$), une somme de bases échangeables très faible ($\text{S} = 0,43 \text{ cmol}^+/\text{kg}$), une teneur en carbone faible ($\text{C} = 1,2 \%$), et une teneur en azote très faible ($\text{N} = 0,5\%$). Seule leur teneur en phosphore

disponible est satisfaisante ($P = 33$ ppm) pouvant être expliquée par une faible quantité d'oxydes de fer et d'aluminium sous forme cristallisée.

Pourtant, les niveaux de production sont de l'ordre de 20 t/ha/an de manioc et de 1,5 t/ha/an de maïs-grain. Sachant que sur le périmètre total, il existe 320 exploitations de 25 ha et qu'un agrisylviculteur ouvre chaque année 1,5 ha pour produire du manioc et du maïs, la production totale du périmètre peut alors être



*Reboisement en acacia auriculiformis suivi d'une plantation de manioc
sur les sols sableux du plateau Batéké, Congo RDC.*

© R. Peltier

estimée à environ 10 000 t/an de manioc et 750 t/an de maïs, qui peut être majorée à 1 200 t/an, grâce aux cultures réalisées sur certains pare-feux. L'utilisation très fréquente par les agrisylviculteurs de boutures de manioc améliorées, en particulier résistantes à la mosaïque, et de semences de maïs améliorées, favorise certainement ces niveaux de production. Mais comme ils n'apportent pas d'intrants (ni engrais, ni chaulage), ces niveaux de production ne peuvent pas s'expliquer sans avoir étudié l'évolution des caractéristiques du sol lors du passage de la savane au système agroforestier.

Résultats

Des sols qui évoluent positivement et négativement

En 2012, nous avons comparé les sols après une pratique de 23 ans du système agroforestier, où les arbres étaient de 1^{re}, 2^e ou 3^e génération (fig. 1), avec un sol voisin qui est resté sous savane.

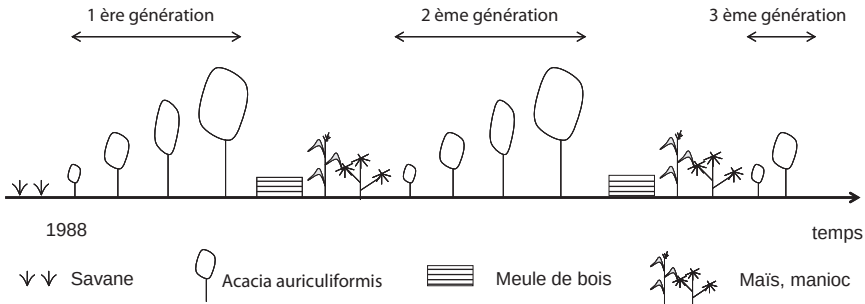


Figure 1

Les différentes étapes au cours du temps du système agroforestier de Mampou (RDC).

Ces sols ont évolué positivement sur les caractéristiques suivantes (tabl. 1) : légère augmentation de la teneur en carbone (1,2 à 1,4 %), de la teneur en azote (0,5 à 0,8 ‰) et de la CEC (2,8 à 3,8 cmol⁺/kg), légère diminution du rapport C/N (21 à 18). Par contre, ces sols ont aussi évolué négativement sur les caractéristiques suivantes : baisse du pH (5,5 à 4,6) conduisant à des sols plus acides, baisse de la somme des bases échangeables (0,43 à 0,18 cmol⁺/kg) et du taux de saturation (15 à 5 %), augmentation de l'aluminium échangeable (0,54 à 1,02 cmol⁺/kg).

Ces évolutions à la fois positives et négatives sont probablement dues aux trois causes suivantes. Premièrement, le passage de la savane au système agroforestier a eu comme effet d'augmenter la biomasse végétale produite. Une partie de cette biomasse, en retournant dans le sol par la décomposition

Tableau 1

Caractéristiques moyennes des sols de surface (entre 0 et 20 ou 25 cm de profondeur) du système agroforestier de Mampu appliqué depuis 1989 sur le lot J2. Mesures effectuées après 17 ans (d'après KASONGO et al., 2009), après 23 ans (2012) et comparées avec un sol voisin resté en savane. Pour les sols du système agroforestier après 23 ans, les valeurs entre parenthèses représentent des écarts-types.

Le test correspond à un test de conformité de moyenne : pour chaque caractéristique du sol, il compare la moyenne des 18 échantillons du système agroforestier après 23 ans avec la valeur de la savane considérée comme connue. Les résultats du test sont donnés avec un niveau 0,05 (* : test significatif ; NS : test non significatif).

	n	pH eau	C (%)	N (‰)	C/N	P ^a (ppm)	Al ^b (cmol ⁺ .kg ⁻¹)	S ^c	CEC ^d	TS ^e (%)
Témoin savane	1	5,5	1,2	0,5	21	33	0,54	0,43	2,8	15
Système agroforestier										
Après 17 ans (KASONGO et al., 2009)	12	4,6	2,0	1,8	12	-	1,50	0,65	3,8	17
Après 23 ans	18	4,6 (0,2)	1,4 (0,3)	0,8 (0,1)	18 (1)	32 (9)	1,02 (0,09)	0,18 (0,03)	3,8 (0,4)	5 (1)
Test		*	*	*	*	NS	*	*	*	*

^aPhosphore disponible (méthode Bray2). ^bAl échangeable avec 1 M KCl. ^cSomme des bases échangeables (Ca + Mg + K + Na). ^dCapacité d'échange cationique à pH7 (méthode Metson). ^eTaux de saturation.

de la litière, a conduit à augmenter la teneur en carbone du sol et par conséquent la CEC qui est fortement liée dans les sols tropicaux à la teneur en carbone. Par contre, le processus d'humification d'une plus grande quantité de litière a produit une plus grande quantité d'acides organiques, ce qui explique en partie la baisse du pH. Deuxièmement, la présence de l'*Acacia auriculiformis*, une Fabacée (ex. Légumineuse) fixatrice d'azote, a permis d'augmenter la teneur en azote du sol et en parallèle à diminuer le rapport C/N. Troisièmement, les cultures de manioc et de maïs ont conduit à exporter du système sol-plante des éléments minéraux, ce qui a diminué la teneur en bases échangeables dans le sol et donc le pH.

Enfin, notre étude s'étant focalisée sur les caractéristiques chimiques du sol, on ne sait pas si l'évolution du sol a été positive ou négative pour la microfaune du sol (vers de terre, mycorhize, ...). *A priori*, le passage de la savane au système agroforestier a favorisé les vers de terre au détriment des termites, et amélioré la porosité du sol et l'infiltration de l'eau.

Diversification et valorisation des produits du système agroforestier

Depuis 2004, la nouvelle équipe du projet encourage la diversification et la transformation sur place des produits du périmètre. C'est ainsi que l'apiculture a été introduite pour valoriser le fort potentiel mellifère des acacias. La

production a atteint 6 000 kg en 2008, elle a été vendue à 2,10 dollars américains par kg (USD/kg, monnaie utilisée localement), soit un revenu brut de 12 600 USD/an. Alors que le manioc était vendu en tubercules (très coûteux à transporter en raison de leur forte teneur en eau), le séchage sous-forme de cossettes (3-5 cm de diamètre) ou de micro-cossettes (2-3 mm de diamètre) a été encouragé.

Des agrisylviculteurs aux revenus exceptionnels pour la RDC

En théorie, les meilleurs agrisylviculteurs de Mampu ont des revenus beaucoup plus élevés que la moyenne des agriculteurs de la zone. La coupe de 1,5 ha/an d'une plantation d'acacias âgée de 12 ans permet la fabrication de 260 sacs de charbon de 60 kg, dont 6,5 USD reviennent au propriétaire, soit environ 1 700 US\$an (sur un sac vendu 20 USD à Kinshasa, on peut estimer grossièrement que 9 USD vont à la main-d'œuvre et 4,5 USD aux transports et taxes). À ces revenus, il faut ajouter les productions agricoles de maïs (3,75 t/ha/an) et manioc (30 t/ha/an). Pour certains propriétaires, il faut également compter le miel et des suppléments de revenus, s'ils transforment leur manioc en micro-cossettes ou s'ils réalisent les coupes, la carbonisation et la vente du charbon par eux-mêmes. Certains ménages peuvent donc gagner de l'ordre de 2 400 USD/an, soit 200 USD/mois, ce qui, en RDC, est le salaire d'un cadre.

Discussion

Des incertitudes sur la durabilité de la fertilité des sols

Nous avons constaté des évolutions positives et négatives des caractéristiques chimiques du sol après une pratique de 23 ans du système agroforestier. Ces évolutions se sont dégradées par rapport à celles observées en 2009 sur la même parcelle, après une pratique de 17 ans du système agroforestier (tabl. 1) En effet, pour la teneur en carbone, en azote, et le rapport C/N, alors que KASONGO *et al.* (2009) observaient des évolutions positives très nettes par rapport au sol de savane, nous avons observé seulement une légère évolution positive. De plus, pour les bases échangeables, alors que KASONGO *et al.* (2009) observaient une évolution positive par rapport à la savane, nous avons observé une évolution négative. Ces différences de résultats pourraient s'expliquer par le fait qu'entre 17 et 23 ans de pratique agroforestière, il y a eu, dans certains cas, une récolte supplémentaire de manioc et de maïs. Des éléments minéraux ont alors été exportés hors du système sans avoir été compensés par des apports d'engrais.

Cette incertitude sur la durabilité de la fertilité des sols est aussi à relier à la baisse du pH dans le sol de la plantation d'acacia par rapport au sol de savane. En effet, cette baisse va jusqu'à une valeur moyenne de 4,6 qui est en dessous de la valeur seuil de 5, où l'aluminium devient soluble et peut être fixé sur le complexe d'échange. Même si les plantes tropicales sont en général adaptées à des sols très acides, de fortes quantités d'aluminium échangeable peuvent conduire à des problèmes de toxicité aluminique et/ou à une baisse du rendement des cultures. Cette baisse du pH a été observée malgré la pratique du brûlis qui a comme effet positif de libérer les éléments minéraux qui sont contenus dans la biomasse végétale. Mais cet effet a été certainement de courte durée et n'a pas suffi pour équilibrer l'exportation des éléments minéraux qui sont contenus dans le bois et les récoltes de manioc et maïs.

Enfin, l'incertitude sur la durabilité de la fertilité des sols provient de la pratique du brûlis des rémanents aériens (feuilles, brindilles). Ce brûlis a certes un effet positif sur le sol, puisqu'il permet de faciliter l'accès, d'éliminer les adventices et les parasites, de libérer une partie des éléments minéraux stockés dans ces rémanents et de remonter temporairement le pH. Mais il a aussi un effet négatif, puisqu'il altère l'état de surface du sol (sol plus compact et moins filtrant), augmente l'érosion hydrique si le sol n'est pas rapidement couvert et augmente les pertes d'azote sous forme gazeuse (GIGOU, 1995 ; DEMBÉLÉ *et al.*, 1997).

Une piste à explorer pour améliorer la durabilité de la fertilité des sols

Des agrisylviculteurs et des techniciens du projet estiment qu'il est très important de brûler les rémanents aériens par un feu courant de début de saison des pluies (qui carbonise plus qu'il ne consume) et de fabriquer le charbon de bois au sein des parcelles. Ils observent notamment, sur les anciennes meules, une taille des cultures et des arbres plus grande qu'en dehors des meules, ce qui suggère une meilleure fertilité chimique du sol. Cette observation est à rapprocher des travaux sur les terres noires d'Amazonie (nommées *Terra preta de Indios* ou *Dark earths*) qui ont montré que ces sols, témoins d'une ancienne occupation amérindienne et très riches en charbons de bois, ont encore aujourd'hui une bien meilleure fertilité chimique que les sols ferrallitiques typiques des tropiques. La gestion du charbon de bois (nommé « biochar ») dans les sols tropicaux commence alors à être préconisée pour maintenir, voire améliorer et la fertilité du sol et les rendements des cultures (GLASER *et al.*, 2002 ; MAJOR *et al.*, 2010 ; voir Rumpel dans cet ouvrage, chapitre 11). Pour marquer ce changement de paradigme, LEHMANN *et al.* (2003) ont préconisé de réhabiliter le système de culture sur abattis-brûlis (*slash and burn*), en adoptant le nouveau nom de culture sur charbon (*slash and char*).

Lors des prochaines années, il serait pertinent d'essayer de répartir sur les parcelles les particules de charbon trop fines pour être commercialisées, que

l'on retrouve mélangées à la terre sablonneuse, sur les plateformes de carbonisation. Ce pourrait être un moyen pour améliorer la durabilité de la fertilité du système agroforestier de Mampu.

Incertitudes sur les prochains cycles de plantation/production (rotations) d'acacias obtenus par semis naturel assisté

La visite des parcelles en deuxième ou troisième rotation montre des situations bien contrastées. Dans certaines parcelles, les arbres sont denses, avec une croissance correcte, alors que dans d'autres, les arbres sont clairsemés, très irréguliers et très branchus avec une forte densité de *Chromolaena odorata* et d'espèces invasives (*Vernonia* sp., *Anthocleista schweinfurthii*, etc.) concurrençant l'acacia. Il faudrait déterminer si la cause est principalement due au savoir-faire de l'agrisylviculteur ou à des problèmes de feu, d'épuisement du sol dû à une mauvaise gestion (érosion du sol, etc.) ou d'érosion génétique des peuplements.

Un projet de développement qui confirme les résultats de la recherche et qui ouvre des perspectives régionales

Il est instructif de constater que les résultats actuels du projet Mampu confirment sur une grande superficie (près de 8 000 ha) les résultats obtenus de 1990 à 1994 à Oumé, en Côte d'Ivoire (RCI) par un projet de recherche européen sur une petite parcelle d'essais (de l'ordre d'un ha), les hypothèses des chercheurs de l'époque (PELTIER *et al.*, 1995) et celles émises par la suite (HARMAND *et al.*, 2004). Ceux-ci avaient en effet montré qu'il était possible d'obtenir de bonnes productions de bois et de céréales, sur des sols relativement pauvres, par un système de jachères plantées en légumineuses arborées. On peut s'étonner que ces résultats se soient très peu vulgarisés en milieu rural en RCI Côte d'Ivoire (en dehors de quelques centaines d'hectares près d'Oumé et de Korhogo) et qu'ils n'aient pas été apparemment connus par les agronomes qui ont redécouvert le système de Mampu en RDC, en s'inspirant probablement du système Taungya, développé en Asie depuis plus d'un siècle (IMO, 2009).

Le projet Mampu a également contribué à la diffusion de l'agroforesterie à *Acacia auriculiformis* sur le plateau Batéké. C'est le cas d'une initiative assez récente de plantation d'acacias (400 ha début 2009) à proximité de Mampu (Ibi village) pour la fixation de carbone, par la société privée Novacel. Les techniques initiées dans ce boisement proviennent du projet Mampu.

Le projet Makala, un appui pour l'avenir du projet Mampu

Lancé en février 2009, le projet Makala avait pour objectif de rechercher des solutions pour « Gérer durablement la ressource bois énergie en RDC », il était financé par l'Union européenne jusqu'en juin 2013. Il a tiré, entre autres, un

bilan plus précis de l'expérience de Mampu et a promu son extension auprès de diverses sources de financement. Celle-ci pouvant se faire, soit sous sa forme actuelle de grands blocs sur des plateaux « vides », soit sous des formes beaucoup plus diffuses, dans l'espace rural approprié et régulièrement cultivé. Début 2013, un nouveau projet de plantations agroforestières a été mis en œuvre à Ntsio, sur un bloc d'environ 5 000 ha sur les plateaux Batéké, par la Fondation Hanns Seidel.

D'autres modèles agroforestiers méritent d'être testés

Le modèle Mampu est une réussite adaptée aux plateaux Batéké, mais presque partout actuellement en RDC, on se réfère hélas à ce seul modèle. On tente de l'appliquer dans des régions où le couvert forestier naturel existe et où une simple mise en défens suffirait pour retrouver une couverture végétale naturelle abondante. Par exemple, les *Nkunku* sont un type de jachère améliorée ou assistée, résultat de l'intervention séculaire des populations Batandu habitant les districts des Cataractes et de la Lukaya (NSIMUNDELE *et al.*, 2010). Celles-ci aboutissent, dans certains cas de protection continue sur une longue période, à la création de véritables agroforêts. Elles contiennent une grande diversité d'espèces locales (et parfois exotiques) qui y sont protégées et parfois réintroduites pour leurs multiples usages (production de fruits, feuilles d'emballage, feuilles consommées par les animaux domestiques ou les chenilles comestibles, support de champignons, fleurs butinées par les abeilles, pharmacopée et, en éclaircie ou exploitation sanitaire, bois de feu et d'œuvre). Le projet Makala étudie ces agroforêts traditionnelles et détermine les conditions techniques et socio-économiques de leur enrichissement et diffusion.

D'autre part, sur le plateau Batéké, le projet Makala a commencé à tester les méthodes de Régénération naturelle assistée (RNA) dans les derniers lambeaux de forêts galeries, avec la collaboration des populations qui les mettent en culture. Avant la défriche, des arbres utiles sont sélectionnés pour être protégés. Puis, pendant la période de cultures agricoles, la germination et la multiplication par rejets de souche et drageons des espèces forestières locales préexistantes (DIOWO *et al.*, 2015) sont favorisées par des pratiques de sarclage sélectif, d'éclaircie et d'élagage. Le suivi de ces tests montre une faible survie des arbres conservés lors du défrichement pour les cultures, car ces arbres sont affectés par les feux lors du brulis, ce qui limite l'applicabilité de la technique proposée (PELTIER *et al.*, 2014). Par contre, les rejets de souche et les drageons des espèces forestières naturelles protégés par RNA au moment des sarclages ont montré une croissance rapide qui permet, à faible coût, d'installer rapidement une jachère ligneuse, technique testée et déjà appréciée par de nombreux agriculteurs. On espère ainsi mettre en place un système agroforestier, inspirée des pratiques anciennes, qui conservera mieux les sols et la biodiversité, tout en augmentant les ressources des agriculteurs.



a : sélection d'un rejet naturel dans un champ après brûlis et mise en culture.

© R. Peltier

b : rejet d'Oncoba sélectionné par la méthode du RNA, 9 mois après sa protection. Projet Mampu, Congo RDC.

© R. Peltier

Bibliographie

- BAUMER M., WOOD P., 1986** – « Agroforestry research and development: agroforestry practices for the solution of food, fodder and fuel shortages ». In Carlson L. W., Shea K. R. (eds) : *Increasing productivity of multipurpose lands*, Nairobi, IUFRO research planning workshop for Africa Sahelian and North Sudanian zones, 1 UFR : 22-88.
- BISIAUX F., PELTIER R., MULIELE J.-P., 2009** – Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, en République démocratique du Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 301 (3) : 21-31.
- DEMBÉLÉ F., MASSE D., YOSSIS H., 1997** – « Rôle des feux de brousse sur la dynamique des adventices et sur la qualité des sols au cours des premières années de jachères dans les régions soudanaises du Mali ». In Floret C., Pontanier R. (éd.) : *Jachère et maintien de la fertilité*, Bamako, Mali, IER/Orstom : 33-39.
- DIOWO MUKUMARY S., PROCES P., DUBIEZ E., MARIEN J.-N., PELTIER R., BELLEFONTAINE R., 2015** – Caractérisation partielle de la régénération naturelle d'*Albizia adianthifolia* sur le plateau Batéké (République Démocratique du Congo). *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Regards/Terrain, 2015, mis en ligne le 21 janvier 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15446>
- DUCENNE Q., 2009** – *Évaluation des actions agroforestières développées à Mampou, RDC*. Cardno Agrisystems Ltd. Vol. I : Synthèse finale, 32 p. Vol. II : Rapport final, 83 p.
- GIGOU J., 1995** – « La dynamique de la matière organique et de l'azote dans les sols tropicaux des zones humides et très humides ». In Pichot J., Sibelet N., Lacoëuilhe J. J. (éd.) : *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides*, Montpellier, France, Cirad/ministère de la Coopération : 194-206.
- GLASER B., LEHMANN J., ZECH W., 2002** – Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biol. Fertil. Soils*, 35 : 219-230.
- GOND V., DUBIEZ E., BOULOGNE M., GIGAUD M., PEROCHEA A., PENNEC A., PELTIER R., 2016** – Forest cover and carbon stock change dynamics in the Democratic Republic of Congo: Case of the wood-fuel supply basin of Kinshasa. *Bois et Forêts des Tropiques*, 327 (1) : 19-28. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_327_19-28.pdf
- HARMAND J.-M., NJITI C. F., BERNHARD-REVERSAT F., PUIG H., 2004** – Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *For. Ecol. Manage.*, 188 : 249-265.
- IMO M., 2009** – Interactions amongst trees and crops in taungya systems of western Kenya. *Agroforestry Systems*, 76 : 265-273.
- KASONGO R. K., VAN RANST E., VERDOODT A., KANYANKAGOTE P., BAERT G., 2009** – Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Bateke plateau, DR Congo. *Soil Use and Management*, 25 : 21-27.
- LEHMANN J., DA SILVA J. P., STEINER C., NEHLS T., ZECH W., GLASER B., 2003** – Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249 : 343-357.
- MAJOR J., RONDON M., MOLINA D., RIHA S. J., LEHMANN J., 2010** – Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333 : 117-128.
- NSIMUNDELE NKONDO L., DIANSAMBU MAKANUA I., DUBIEZ E., PROCES P., MARIEN J., PELTIER R., VERMEULEN C., 2010** – Conserver ou manger la forêt ? Le paradoxe des paysans en périphérie de Kinshasa, RDC. Aires protégées traditionnelles du Bas-Congo. *Le Flamboyant*, 66/67 : 33-37.
- PELTIER R., BALLE P., GALIANA A., GNAHOUE G. M., LEDUC B., MALLET B., OLIVER R., OUALOU K., SCHROTH G., 1995** – « Produire du bois énergie dans les jachères de zone guinéenne. Intérêts et limites à travers l'expérience d'Oumé en Basse Côte d'Ivoire ». In : *Actes du séminaire Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides*, Montpellier, France : 219-227.

PELTIER R., DUBIEZ E., DIOWO S., GIGAUD M., MARIEN J.-N., MARQUANT B., PEROCHES A., PROCES 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

SCHURE J., INGRAM V., AKALAKOU-MAYIMBA C., 2011 – *Bois énergie en RDC : Analyse de la filière des villes de Kinshasa et de Kisangani*. Projet Makala-Cifor, Kinshasa, RDC, 85 p. http://makala.cirad.fr/les_produits/publications/rapport/analyse_de_la_filiere_bois_energie_des_villes_de_kinshasa_et_de_kisangani_2011

Influences de l'écobuage sur la restauration de la productivité des sols argileux acides de la vallée du Niari (Congo RDC)

Jean de Dieu NZILA

Introduction

L'écobuage est une pratique culturelle qui consiste à brûler les végétaux enfouis sous une mince couche de terre rassemblée en billons ou en buttes. Longtemps pratiquée, puis abandonnée en Europe dans la première moitié du XIX^e siècle, cette pratique culturelle est encore utilisée dans les pays tropicaux, notamment en Afrique où diverses variantes existent en fonction des conditions locales.

Au Congo, cette pratique est utilisée dans les départements des Plateaux, du Pool et de la Bouenza qui est traversée par la vallée du Niari (SAUTTER, 1955). La vallée du Niari est un vaste géosynclinal dont le soubassement est constitué de formations sédimentaires précambriennes carbonatées surmontées par des formations gréseuses dont l'altération a conduit à des sols ferrallitiques fortement désaturés remaniés (Ferralsols, Acrisols, Nitisols) qui sont caractérisés par une altération complète des minéraux primaires, une texture argileuse (40 à 70 % d'argile en surface), une structure fragile sous cultures, un complexe d'échange pauvre en bases, une forte acidité ($\text{pH} < 5$) et des toxicités manganique et aluminique (PREVOT *et al.*, 1955 ; MARTIN, 1963, 1970). Abandonnés par les compagnies concessionnaires au cours de la première moitié du XX^e siècle, ces sols continuent à être exploités par des agriculteurs qui ont mis en place un système de culture performant appelé *maala*. Ce système associe différentes

cultures vivrières : maïs, igname, courge, pois d'Angole la première année, arachide et manioc, la deuxième année. Après la récolte du manioc en troisième année, s'installe une jachère naturelle de 4 à 6 ans (NZILA, 1992).

Au Congo, les études consacrées à l'écobuage sont rares (NZILA, 1992 ; NZILA et NYÉTÉ, 1996 ; MBOUKOU-KIMBATSA, 1997 ; MOREAU *et al.*, 1998).

Les résultats présentés ici portent sur les modifications morphologiques, physiques, chimiques et biologiques du sol qui résultent de l'écobuage au moment de l'installation des cultures de la première année.

Matériel et méthodes

Les sols ferrallitiques acides occupent près de 90 % de la superficie de la République du Congo. Ce sont souvent des sols profonds qui sont dotés, selon la nature de la roche-mère, des textures sableuses ou argileuses. Ils sont tous caractérisés par une pauvreté chimique et une dégradation rapide lors de leur mise en valeur mécanisée pour la plupart des cultures (arachide, manioc, maïs, coton).

L'étude est réalisée dans une savane arbustive à *Hyparrhenia diplandra*, près de Tenzi, dans la vallée du Niari, sous climat équatorial de transition (pluviosité 1 200 mm/an en 8 mois). Le sol est de type ferrallitique, fortement désaturé, sur calcaire marneux. C'est un sol argileux profond, acide, avec des teneurs en aluminium échangeable notables au-dessous de 5 cm de profondeur (TSA > 50%). De petites concrétions manganiques y sont fréquemment observées. La fraction argileuse est principalement constituée de kaolinite, avec de la goéthite alumineuse et du quartz. L'écobuage est étudié sur un champ de mise en culture traditionnelle d'environ 400 m². Au cours de la combustion finale, les variations de température sont mesurées toutes les 3 heures pendant 78 heures, avec des thermocouples placés verticalement tous les 5 cm, jusqu'à 50 cm et reliés à un thermomètre de lecture Eirelec Ltd Beta.

Les analyses sont réalisées sur le sol tamisé à 2 mm : granulométrie au Sédigraph 500 ET après dispersion à l'hexamétaphosphate ; minéraux argileux par diffractiométrie Rx (Siemens 500) ; stabilité structurale d'après l'indice Is de Hénin (HÉNIN, 1956) ; carbone et azote total par l'analyseur élémentaire CHN 600-LECO ; N-NH₄ et N-NO₃ respectivement extraits par NaCl 10 % à pH 2,5 et par CuSO₄.5H₂O, dosages par spectrométrie d'absorption ; pH(H₂O) sur suspension sol/solution = 2,5 ; bases échangeables extraites par CH₃CO₂NH₄M à pH7, dosages par spectrométrie d'émission et d'absorption atomique ; CEC par saturation avec CaCl₂ tamponné à pH 7 (PELLOUX *et al.*, 1971) ; Al échangeable extrait par KCl N, dosage colorimétrique ; Mn facilement réductible extrait par CH₃CO₂NH₄ M avec 0,2 %

de ClH , NH_2OH , dosage par absorption atomique (GAMBELL et PATRICK, 1982) ; P total extrait par KClO_4 concentré (OLSEN et DEAN, 1965) et P assimilable par FNH_4 et CO_3HNa (DABIN, 1967), dosage colorimétrique (MURPHY et RILEY, 1962).

Résultats et discussion

La savane à *Hyparrhenia diplandra* est dense et haute de plus de 2 mètres.

La préparation du terrain de culture est réalisée au début juillet (confection des andains et séchage des herbes) et en septembre, à la fin de la grande saison sèche (recouvrement des andains par une mince couche de terre raclée entre les andains et mise à feu).

Élévation de température et différenciation morphologique du sol

En fonction des températures maximales atteintes, quatre phases (P_1 , P_2 , P_3 et P_4) constituent le billon d'écobuage, au-dessus du sol en place (fig. 1). La phase P_1 est une couche de terre motteuse, peu épaisse (1-2 cm), à la surface du billon. Les températures maximales y ont été modérées (95-150 °C) et le sol a été peu affecté par l'écobuage. P_2 est la phase la plus importante à l'intérieur du billon, avec des températures maximales variant de 225 à 305 °C. Il n'y a pas de débris végétaux ; la couleur noire traduit une combustion incomplète. La phase P_3 correspond aux plus fortes températures maximales (325 à 420 °C) et marque les endroits où la concentration de végétaux et les conditions de combustion étaient optimales. Une subdivision a été réalisée pour l'échantillonnage : P_{3a} sans présence de cendres, P_{3b} avec des cendres blanchâtres accompagnant la terre rougeâtre. La phase P_4 est un matériel végétal charbonneux mélangé à de la terre noire. La structure initiale des tiges de *Hyparrhenia* carbonisées y est conservée. Parfois, les végétaux sont restés intacts au contact du sol ou des cendres sombres peuvent être présentes. Les caractères charbonneux, mais hétérogènes de P_4 résultent du mélange des végétaux et de la terre qui s'est effectué avant et au cours du brûlage ; la carbonisation des végétaux est associée à une aération réduite à ce niveau. Sous la phase P_4 , les températures maximales n'ont pas atteint 100 °C et le sol en place (A11) ne paraît pas modifié. La terre rassemblée dans les billons provient de A11 qui disparaît plus ou moins régulièrement entre les billons (fig. 1).

Les échantillons de sol ont été prélevés dans les différentes phases constitutives du billon d'écobuage (P_1 , P_2 , P_{3a} , P_{3b} , et P_4) et dans l'horizon de référence A11 du sol en place sous le billon (SE 0-5) et du sol non écobué sous savane (SAV 0-5).



3a : formation d'un andain d'herbes entrelacées (*Hypparhenia diplandra*) de la savane.

© J.D. Nzila

b : recouvrement des andains avec une couche de terre raclée entre les andains.

© J.D. Nzila

c : coupe d'un andain après brûlis : vallée du Niari, Congo, Brazzaville.

© J.D. Nzila

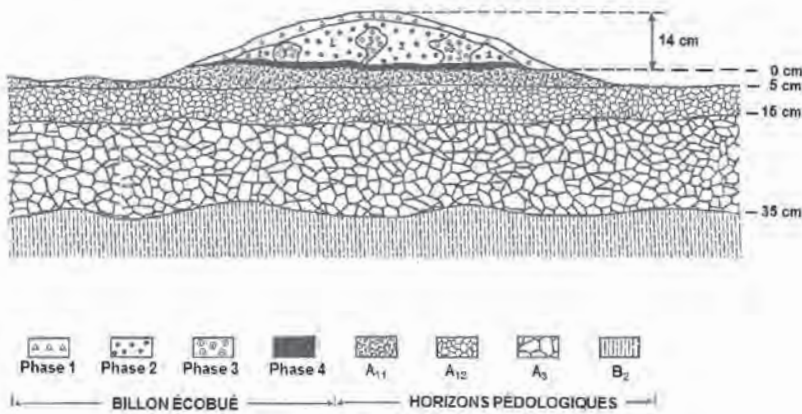


Figure 1

Schéma d'un profil représentatif du sol après écobuage.

Modifications physiques et chimiques

En P_2 et surtout en P_3 , on perçoit un caractère plus sableux de la texture du sol avec l'élévation de la température, ainsi que l'augmentation de la stabilité structurale. Ces modifications résulteraient d'une pectisation des particules argileuses (tabl. 1) devenant difficilement dispersables (pseudo-sables) (NISHITA et HAUG, 1972 ; GIOVANNINI *et al.*, 1988).

Les valeurs de l'indice d'instabilité (I_s) de Hénin (1958) diminuent fortement dans les phases écobuées, à l'exception de la phase 1 (P_1) qui a une valeur plus élevée ($I_s = 0,5$). Les valeurs I_s sont de 0,32 sous savane (SAV 0-5) et sous le billon écobué (SE 0-5), alors qu'elles sont inférieures ou égales à 0,1 dans les phases P_2 et P_3 . L'écobuage contribuerait ainsi à améliorer la stabilité du sol en donnant aux agrégats du sol une meilleure résistance à la dispersion.

La transformation de la goéthite en hématite (rouge) mal cristallisée débute à partir de 250 °C en P_2 et devient plus accomplie en P_3 où l'hématite est l'oxyde de fer prépondérant (tabl. 1). La dégradation de la kaolinite n'apparaît qu'en P_3 à partir de 300 °C : cette valeur relativement faible pourrait traduire l'existence d'impuretés et de défauts de cristallisation fragilisant la kaolinite du sol étudié.

Le carbone et l'azote diminuent dans des proportions différentes (tabl. 2). Le bilan global apparent au niveau des billons écobués (P_1 , P_2 , P_3 et P_4) aboutit à une perte de C total de l'ordre de 30 % par rapport à l'horizon A11 du sol en place. Les pertes en N total du sol écobué sont plus réduites (- 20 %) et le rapport C/N diminue fortement en passant de P_1 à P_2 et P_3 : ces pertes, qui ne dépassent pas 50 % pour les températures maximales les plus élevées en P_3 , sont aussi plus faibles que dans le cas du sol calciné où l'azote disparaît totalement à 300 °C. Le sol écobué s'enrichit par contre en N minéral sous forme de $N-NH_4$, résultant de la décomposition thermique des acides aminés du sol (JUSTE et DUREAU, 1967 ; DE BANO *et al.*, 1979).

Tableau 1
Modification des caractères minéralogiques et physiques du sol sous l'effet de l'écobuage
(intervalle de confiance à 95 %).

Types de sols	Températures maximales TM	Minéraux argileux*	Argile %	Sable grossier %	Instabilité structurale Is
SAV 0-5, brun	30	K5-G3	44 ± 4	11 ± 1	0,3
SE 0-5, brun	40-75	K5-G3	46 ± 8	10 ± 2	0,3
P ₁ , brun	95-155	K5-G3	45 ± 4	11 ± 3	0,5
P ₂ , noir	225-305	K5-G2-H2	36 ± 3	15 ± 1	0,1
P ₃ , noir ou rouge	325-420	K4-G1-H3	30 ± 3	21 ± 3	0,1

*K : Kaolinite ; G : Goethite ; H : Hématite ; 1 < 5 % ; 2 : 5-10 % ; 3 : 10-20 % ; 4 : 30-40 % ; 5 : 50-80 %.
SAV = sol sous savane ; SE = sol sous billon écobué.

Tableau 2
Variation des caractères chimiques du sol sous l'effet de l'écobuage
(intervalle de confiance à 95 %).

	SAV 0-5	SE 0-5	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
					a	B	
C total (*)	37,7	38,2	26,7	20,0	4,5	12,2	60,1
N total (*)	2,2	2,4	1,8	1,9	1,2	1,6	2,4
C/N	17,1	15,9	14,8	10,5	3,8	7,6	25,25
N minéral (*)	0,019	0,157	0,101	0,165	0,058	0,078	-
Nm/Nt (%)	0,9	5,8	5,9	7,5	4,8	4,6	-
pH (H ₂ O)	5,1	5,1	5,3	6,5	6,8	7,2	6,8
Ca éch. (**)	3,65	3,74	3,89	5,63	5,74	6,93	6,48
Mg éch. (**)	0,65	0,66	0,69	0,84	0,83	1,12	3,59
K éch. (**)	0,56	0,56	0,64	0,71	0,80	0,99	2,59
CEC (pH7)**	13,91	13,15	11,55	10,80	7,78	9,70	24,0
Mn facilement réductible**	1,15	1,11	1,22	0,92	0,80	0,74	-
P assimilable*	0,45	0,42	0,33	0,52	0,63	0,89	1,37
P ass/P total	0,15	0,14	0,14	0,18	0,24	0,30	0,42

*en mg/g de sol ; ** en cmol (+) kg-1. SAV = sol sous savane (sol témoin) ; SE = sol sous billon écobué ; P1 à P4 = phases constituant le billon écobué ; P3a sans cendre et P3b avec cendres.

Le pH (H₂O) s'accroît de plus d'une unité en P₂ et davantage en P₃ et P₄ : ces phases s'enrichissent aussi en bases échangeables (tabl. 2). Les valeurs les plus élevées en P_{3b} sont liées à la présence de cendres. En P₄, les valeurs de Mg et K échangeables atteignent des ordres de grandeur supérieurs, marquant l'influence prépondérante de l'apport végétal dans cette phase. La CEC diminue avec l'élévation de température, en rapport avec la diminution du taux de carbone : la phase charbonneuse P₄ se distingue par une valeur de CEC de près du double de celle du sol superficiel (SE 0-5).

Le manganèse facilement réductible décroît en fonction de l'élévation de température particulièrement dans P₂ et P₃ (tabl. 2), réduisant les risques de toxicité manganique qui peuvent apparaître sous culture mécanisée sur ce type de sol (MARTIN, 1970). Le billon écobué reste exempt d'aluminium échangeable de même que l'horizon A11.

La teneur en phosphore assimilable et le rapport P assimilable/P total augmentent dans les phases P₂, P₃ et P₄, en fonction de l'élévation de température et de l'importance du matériel végétal présent ; ce dernier facteur étant prépondérant en P_{3b} et surtout en P₄.

Les rendements des principales plantes cultivées avec le système de culture comportant l'écobuage sont nettement plus élevés que ceux obtenus avec le brûlis à feu courant. Pour les cultures du manioc et de l'igname, principaux aliments de base dans la région, la pratique de l'écobuage paraît la technique la mieux adaptée en donnant des rendements plus importants que la culture mécanisée (tabl. 3).

Tableau 3
Rendements (t/ha) des principales plantes cultivées avec la pratique de l'écobuage comparée au brûlis à feu courant et au système intensif.

Système de culture	Arachide en gousse (t/ha)	Maïs en grains (t/ha)	Manioc en tubercules (t/ha)	Igname
Brûlis à feu courant	1,20	0,72	11,1	-
Écobuage	1,70	2,88	22,0	5,6
Culture mécanisée	2,01	3,30	19,0	-

Tableau 4
Biomasse (g/m²) des peuplements de macro-invertébrés dans différents systèmes de culture de la vallée du Niari.

Système de culture	1 ^{re} année	2 ^e année	3 ^e année
Écobuage <i>maala</i>	74	14	9
Brûlis à feu courant	11	-	-
Savane	8	-	-
Plantation de canne à sucre	3	1	-

Source : MBOUKOU-KIMBATSA, 1997.

Sur le plan biologique, l'écobuage *maala* favorise l'activité des macro-invertébrés du sol (vers de terre, termites, fourmis) qui restent abondants dans les sols écobués jusqu'à la troisième année après écobuage (tabl. 4), alors que dans les champs ayant subi le brûlis à feu courant, les peuplements de macro-invertébrés sont proches des faibles valeurs de la savane (MBOUKOU-KIMBATSA, 1997).

Conclusion

Malgré une réduction du stock carboné et azoté et de la capacité d'échange qui lui est liée, les effets de l'écobuage s'avèrent bénéfiques pour le développement des cultures, en particulier pour les plantes à tubercules : élévation du pH et des teneurs en nutriments (N, P et bases), réduction des risques de toxicités manganique et aluminique, préservation des qualités structurales du sol. Ces modifications restent appréciables après 3 à 4 années de culture, tandis que l'appauvrissement en carbone n'est plus mis en évidence. Bien qu'étant très contraignant, le *maala* reste le système d'exploitation le plus performant, accessible à l'agriculture familiale dans la région de la vallée du Niari et sur les sols sablo-argileux des plateaux Batéké. C'est une forme traditionnelle d'intensification culturale n'impliquant pas de transfert de fertilité à l'échelle du terroir villageois et qui est digne d'intérêt pour conduire une évolution raisonnée des pratiques existantes, en recherchant des systèmes de culture mieux adaptés aux conditions actuelles. En effet, l'écobuage permet d'améliorer les propriétés physiques (stabilité structurale, structure, porosité), les propriétés chimiques (augmentation du pH, enrichissement du complexe absorbant, réduction des toxicités manganique et aluminique) et les propriétés biologiques (minéralisation de l'azote, biomasse des macro-invertébrés) des sols.

Par ailleurs, cette pratique permet une succession de plusieurs cultures (maïs, igname, pois d'Angole, légumes divers, manioc, arachide) sur un même champ pendant 3 à 4 ans d'exploitation.

L'évolution du système *maala* doit forcément conduire à l'allègement du travail pénible nécessaire pour la préparation du terrain et à l'augmentation de la productivité sur les espaces cultivés. Dans cette perspective, différentes améliorations peuvent s'envisager, portant notamment sur l'adoption d'un outillage mieux adapté (éventuellement avec une motorisation légère), sur l'efficacité des opérations d'écobuage (homogénéité des billons) et d'entretien des cultures (démariage, désherbage) et sur la prolongation de la période de culture (succession culturale, gestion des résidus de culture, fertilisation d'appoint). Il convient aussi d'améliorer l'efficacité de la jachère : gestion des feux et de la biomasse, semis de légumineuses et gestion de la jachère à *Chromolema odorata*.

Bibliographie

- DABIN B., 1967** – Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25 nov., I, IRAT* : 99-115.
- DE BANO L. F., EBERLIN G. E., DUNN P. N., 1979** – Effects of burning on Chaparral soils: I. Soil nitrogen. *Soil Sci. Am. J.*, 43 : 504-509.
- GAMBELL R. P., PATRICK W. H., 1982** – Manganese. In: *Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties. Part 3.* Page A.L., Miller R. H., Keeny D. P. (eds) : *Agronomy 9, 2nd edition, ASA-SSSA* : 313-322.
- GIOVANNINI G., LUCCHESI S., GIACHETTI M., 1988** – Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146, 4 : 255-261.
- GREENLAND I. D. J., 1974** – Evolution et mise au point des différents systèmes d'agriculture itinérante. In : *L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique. Bulletin Pédologique FAO*, 24 : 6-15.
- GUILLOT B., 1973** – La terre Enkou. Recherches sur les systems agraires du plateau Koukouya (Congo). *Ecole Pratiques des Hautes Etudes et Mouton & Co.*, Paris, 126 p.
- HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958** – Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 1, 71-90.
- JUSTE C., DUREAU P., 1967** – Production d'azote ammoniacal par décomposition thermique d'acides associés à un sol argilo-limoneux. *C. R. A. S.*, Paris, série D, t. 265 : 1167-1169.
- MARTIN G., 1963** – Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 2 : 8-14.
- MARTIN G., 1970** – Synthèse agro-pédologique des études Orstom dans la vallée du Niari en république du Congo-Brazzaville. *Cahiers Orstom, sér. Pédol.*, 8, 1 : 63-79.
- MBOUKOU-KIMBATSA I., 1997** – *Les macro-vertébrés du sol dans différents systèmes d'agriculture au Congo : cas particulier de deux systèmes traditionnels (écobuage et brûlis) dans la vallée du Niari.* Thèse doct., université Paris-VI, 151 p.
- MOREAU R., NZILA J. D., NYÉTÉ B., 1998** – *La pratique de l'écobuage maala et ses conséquences sur l'état du sol au Congo.* 18^e Congrès Mondial des Sols, Symposium n° 45, 8 p.
- MURPHY P., RILEY J. P., 1962** – A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chemical Acta*, 27 : 31-36.
- NISHITA H., HAUG R.M., 1972** – Some physical and chemical characteristics of heated soils. *Soil Science*, 113, 6 : 422-430.
- NZILA J. D., 1992** – *Étude des transformations structurales et physico-chimiques d'un sol ferrallitique acide de la vallée du Niari (Congo) soumis à la pratique de l'écobuage.* Thèse doct., université Paris-XII-Val de Marne : 192 p.
- NZILA J. D., NYÉTÉ B., 1996** – « Pratiques culturelles paysannes au Congo : influence de l'écobuage sur l'évolution de la fertilité des sols de la vallée du Niari ». In Pichot J., Sibelet N., Lacoeyille J. J. (éd.) : *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides.* Colloques, Cirad, Montpellier : 245-248.
- OLSEN S. R., DEAN L. A., 1965** – Phosphorus. In: *Methods of soil chemical analysis, Part 2.* Black C. A. et al. (eds). *Agronomy 9, Am. Soc. of Agron., Inc.*, Madison, Wis. : 1035-1049.
- PANSU M., GAUTHEYROU J., LOYER J. Y., 1998** – *L'analyse du sol. Échantillonnage, instrumentation et contrôle.* Paris, Masson, 497 p.
- PELLOUX P., DABIN B., FILLMANN G., GOMEZ P., 1971** – Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. *Série Initiations-Documentations Techniques*, 17, Paris, Orstom, 117 p.
- PREVOT P., OLLAGNIER M., AUBERT G., BRUGIÈRE J.M., 1955** – Dégradation du sol et toxicité manganimique. *Oléagineux*, 10^e année, 4, 239-243.
- SAUTTER G., 1955** – Notes sur l'agriculture des Bakamba de la vallée du Niari (Congo). *Bull. Inst. d'Études centrafricaines, n^{le} série*, 9 : 67-105.
- SAUTTER G., 1966** – *De l'Atlantique au Fleuve Congo : une géographie du sous-peuplement. République du Congo. République Gabonaise.* Paris, La Haye, 2 vol., Mouton & Co., 1103 p.
- SIGAUT F., 1975** – *L'agriculture et le feu. Rôle et place du feu dans les techniques de préparation du champ de l'ancienne agriculture européenne.* Paris, La Haye, Mouton & Co, 320 p.

Importance des charbons de bois dans la restauration de la fertilité des sols tropicaux : une revue

Cornelia RUMPEL

Introduction

En région tropicale, où les sols lessivés peu fertiles, pauvres en nutriments et en matière organique (MO) dominant, l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires est souvent limitée à cause des coûts qu'elle représente pour les agriculteurs. La qualité des sols dépend en grande partie de leur teneur en matières organiques, qui est un élément clef déterminant la fonction du sol de production des aliments et de la biomasse (LAL, 2004). Généralement, un sol agricole s'appauvrit rapidement en MO s'il n'est pas fertilisé ou amendé en MO.

L'enfouissement de biochar pour amender et fertiliser les sols tropicaux est une technique issue d'une coutume ancestrale, qui a été mise en évidence en Amazonie (LEHMANN, 2007), où on trouve quelques îlots de sols noirs caractérisés par une grande fertilité parmi des sols peu productifs. Les rendements élevés de ces sols ont été expliqués par la présence du carbone provenant des charbons de bois (STEINER *et al.*, 2008). L'enfouissement de matières biologiques incinérées (biochars) dans les sols semble avoir un grand potentiel non seulement pour améliorer leur fertilité, mais également pour séquestrer du carbone, car les biochars se caractérisent par des temps de résidence très élevés par rapport à d'autres MOS (SCHMIDT *et al.*, 2002). Ils ont donc probablement résisté aux processus de dégradation très intenses dans ces milieux tropicaux qui mènent à la minéralisation rapide des autres matières organiques.



*Ensachage du charbon de bois : projet Mampu, Congo RDC.
© R. Peltier*

L'objectif de ce chapitre est d'analyser la bibliographie sur ce thème et de discuter les applications dans les sols tropicaux, en particulier :

- les propriétés chimiques et physiques de différents biochars et leur devenir dans les sols ;
- l'effet de l'ajout des biochars sur les propriétés des sols ;
- les techniques mises en œuvre pour améliorer la fertilisation des sols tropicaux en utilisant les biochars.

Propriétés chimiques et physiques de différents biochars

En règle générale, l'effet des hautes températures sur la biomasse végétale a pour conséquence une cascade de pertes des différentes structures chimiques et la condensation de celles qui restent en cycles aromatiques. Une exclusion d'oxygène lors de la pyrolyse, technique fréquemment utilisée pour la production des biochars, ralentit ces changements et empêche une perte complète de biomasse même à des températures très élevés (ASCOUGH *et al.*, 2008).

La structure chimique des biochars est hautement aromatique et peut exister sous plusieurs formes avec des réactivités différentes (QUÉNÉA *et al.*, 2006), qui pourraient se traduire par des temps de résidence différents dans les sols. Il a été montré que la composition chimique des biochars, leur degré de condensation et leur réactivité envers des oxydations chimiques et leur hydrolyse, dépendent de leur forme physique et probablement également du type de biomasse de départ (NOCENTINI *et al.*, 2010). Ceci a été montré en utilisant des biochars produits par des feux, qui constituent un continuum allant des biomasses partiellement brûlées aux charbons hautement condensés de type graphitique (MASIELLO, 2004). L'existence d'un continuum de biochars produits par des feux naturels est due aux conditions variables de température et de présence d'oxygène. D'ailleurs, les informations données par différents auteurs concernant la dégradation des biochars dans les sols sont souvent contradictoires (ROBERTSON et MORGAN, 1995 ; ZIMMERMAN *et al.*, 2010). BIRD *et al.* (1999) ont analysé la dégradation des charbons représentés par le carbone résistant à une oxydation chimique (Orec) dans les sols tropicaux en comparant deux sites soumis à des fréquences de feu différentes. Ils ont conclu que les charbons intègrent les fractions fines après dégradation.

Pour les biochars produits par des processus de pyrolyse contrôlée, les conditions de pyrolyse, ainsi que la biomasse de départ sont déterminantes pour leurs caractéristiques. Les biochars produits par pyrolyse contrôlée ont des propriétés plus homogènes que ceux produits par les feux. Toutefois, il est bien connu maintenant que les biochars possèdent une fraction relativement facile à dégrader par la biomasse microbienne (LEHMANN *et al.*, 2009), mais actuellement, une quantification systématique de cette fraction pour des biochars produits selon différents protocoles standardisés manque cruellement. De plus, la dégradation des biochars peut être accélérée en présence d'un cosubstrat (*priming effect* ; KUZYAKOV *et al.*, 2009).

Certains auteurs ont signalé que les biochars peuvent être protégés dans les agrégats des sols (BRODOWSKI *et al.*, 2005) ou par interaction avec les minéraux des sols. Toutefois, dans des Andosols régulièrement affectés par des feux, une telle protection n'a pas été mise en évidence (RIVAS *et al.*, 2012). La composition chimique des biochars est susceptible de changer au cours du temps. LIANG *et al.* (2006) ont caractérisé des biochars anciens isolés des Terra Preta. Les processus d'oxydation semblent avoir augmenté le degré d'oxydation de leur surface, ainsi que leur capacité d'adsorption des cations. La dégradation de différents types de biochars, l'altération de leur structure par les micro-organismes, ainsi que la capacité des biochars altérés à interagir avec d'autres composantes minérales et biologiques des sols au cours du temps nécessitent de plus amples investigations.

La forme particulière des biochars et des charbons peut être un facteur négatif, une fois appliquée aux sols, car ils sont exposés aux processus d'érosion. Dans les fractions fines des sols, les particules de biochars les plus fines peuvent être lessivées avec les particules d'argile dans les horizons profonds.

Généralement, les biochars se trouvent préférentiellement dans la fraction légère (densité $< 1,6 \text{ g cm}^{-3}$) des matières organiques. Les biochars déposés à la surface du sol sont aussi susceptibles d'être érodés par le vent et par l'eau (RUMPEL *et al.*, 2006b ; MAJOR *et al.*, 2010). En outre, il a été montré que les biochars subissent une migration verticale qui amène leur incorporation aux sols (RUMPEL *et al.*, 2009). Les biochars ainsi transportés dans la matrice des sols tropicaux sont susceptibles d'y résider pour des temps prolongés (RUMPEL *et al.*, 2008).

Les facteurs déterminant le comportement des biochars dans un sol donné restent méconnus. La susceptibilité des biochars apportés aux sols aux processus de transport dépend de leur forme physique (taille, densité), ainsi que du type de sol (sableux, argileux). Les relations entre type de biochar, type de sol et leur potentiel de transport dans les sols ont été peu étudiées.

Toutefois, grâce à leur structure aromatique difficilement dégradable par la biomasse microbienne des sols, les biochars pourraient être préservés sélectivement dans beaucoup d'environnements et donc représenter une partie notable de la matière organique (MO) stabilisée dans les sols (LEHMANN *et al.*, 2009). Les biochars pourraient en effet constituer une grande partie du carbone enfoui dans les sols lorsque les taux de production sont élevés (KUEHLBUSCH et CRUTZEN, 1995). Une étude récente montre que moins de 3 % des biochars appliqués aux sols ont été perdus par minéralisation dans un climat tropical deux ans après leur enfouissement dans les sols (MAJOR *et al.*, 2010). Il a été montré que les sols subissant des brûlis réguliers contiennent déjà jusqu'à 30 % de leur carbone sous forme biochar. Cette présence des biochars dans les sols subissant la technique des abattis sur brûlis (*slash and burn*) réguliers influence grandement la structure chimique, ainsi que la teneur du carbone dans les sols (RUMPEL *et al.*, 2006b) et la dynamique de l'azote (WARDLE *et al.* 1998). D'après une étude récente, une meilleure connaissance du taux de biochars des sols pourrait modifier sensiblement notre compréhension du cycle global du carbone (LEHMANN *et al.*, 2008). Mais aujourd'hui, aucune méthode de routine pour quantifier les biochars dans les sols n'est réellement opérationnelle à des coûts raisonnables. Il semble que les méthodes spectroscopiques ont le potentiel de déterminer la teneur des biochars dans les sols, car ils permettent de détecter la présence des structures aromatiques. La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) est une méthode quantitative, mais très coûteuse. Les autres techniques spectroscopiques infrarouges (MIRS et SPIRS) nécessitent une calibration à l'aide des méthodes statistiques avant toute quantification (RUMPEL *et al.*, 2001) pour déterminer la teneur en biochars. Récemment, une combinaison de différentes méthodes spectroscopiques a été proposée afin d'obtenir une caractérisation plus complète de la structure des MOS des sols et leur teneur en biochars (CECILLION *et al.*, 2012). Une méthode de dégradation chimique basée sur la quantification et la caractérisation des acides benzenecarboxyliques a été développée (GLASER *et al.*, 1998), qui semble indiquer de façon fiable la teneur et le degré de condensation des biochars présents dans les sols (MCBEATH *et al.*, 2011).

Effet de l'ajout des biochars sur les propriétés des sols

Les biochars ont une capacité élevée d'adsorption des cations par unité de carbone comparés à d'autres types de MOS (LIANG *et al.*, 2006). GLASER *et al.* (1998) ont montré que la présence de biochar pouvait augmenter la fertilité de certains sols par une augmentation de leur capacité d'échange, de la rétention des nutriments, et de leur disponibilité. Ceci est probablement dû à leur surface spécifique plus grande, à une plus grande charge négative et à une plus forte densité de charges (LIANG *et al.*, 2006). Contrairement aux autres types de MOS, les charbons peuvent adsorber le phosphate, malgré sa forme anionique (LEHMANN, 2007). Toutes ces propriétés font des biochars des substances uniques, qui retiennent des nutriments échangeables dans les sols et qui peuvent diminuer la pollution environnementale générée par le lessivage de ces nutriments (MAJOR *et al.*, 2009). Ceci est particulièrement important dans des régions tropicales et méditerranéennes, où les sols sont souvent dégradés et possèdent des faibles propriétés d'échange. Dans ces sols, l'ajout des biochars en combinaison avec des engrais ou des autres substrats organiques permettrait d'améliorer la nutrition des plantes (STEINER *et al.*, 2008). Ainsi, un amendement des sols tropicaux en Colombie avec 20 t/ha de biochar (en une seule dose) a augmenté le rendement en grains de maïs de 30 à 140 % dans les trois années qui ont suivi l'amendement (MAJOR *et al.*, 2010). L'ajout des biochars aux sols peut aussi influencer le cycle de l'azote. L'adsorption d'ammonium, ainsi que du nitrate a été observée (SPOKAS *et al.*, 2012). Plusieurs études ont également montré une réduction des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) en présence de biochar (VAN ZWIETEN *et al.*, 2010), mais les mécanismes sous-jacents et les conditions de validité de ces observations sont encore inconnus. L'amélioration de la productivité des sols dégradés au Kenya par l'ajout des biochars a été démontrée. On n'a pas pu expliquer les meilleurs rendements uniquement par l'augmentation de la disponibilité des nutriments, mais aussi par une augmentation de la teneur en MOS (KIMETU *et al.*, 2008). L'augmentation des rendements de maïs dans des sols tropicaux en Colombie a été expliquée par une plus forte disponibilité de Ca et Mg et un effet pH (MAJOR *et al.*, 2010). Le pH des biochars varie entre 4 et 12 en fonction des biomasses de départ et des conditions de pyrolyse (CHANG, 2009). En général, les biochars produits par pyrolyse sont alcalins, et le pH augmente avec la température de production. L'ajout des biochars augmente le pH des sols, effet particulièrement utile pour améliorer des sols tropicaux fortement altérés et souvent acides. Les capacités d'adsorption des biochars pourraient également être bénéfiques pour la rétention de l'eau des sols et pour leur capacité de fournir de l'eau aux plantes pendant les périodes de sécheresse (SOHI *et al.*, 2009). La capacité de rétention en eau, ainsi qu'en nutriments a été améliorée grandement dans des sols sableux après l'ajout des biochars (UZOMA *et al.*, 2011).

Enfin, nous pensons que l'ajout des biochars pourrait être une solution pour restaurer la fertilité des sols dégradés des régions affectées par des sécheresses

fréquentes. Les biochars semblent moins appropriés pour améliorer les sols alcalins, où ils pourraient affecter négativement la disponibilité de l'azote (LENZ et IPPOLITO, 2012).

Grâce à leur faible densité, les charbons sont susceptibles d'améliorer la densité apparente des sols (MAJOR *et al.*, 2010) et de réduire leur sensibilité au tassement. Mais actuellement, peu d'études ont été effectuées sur le potentiel des biochars à améliorer les propriétés physiques des sols.

L'ajout de biochars aux sols change leurs propriétés microbiologiques. Plusieurs études ont montré que la composition des communautés bactériennes est contrastée dans des sols amendés avec des biochars par rapport aux sols témoins sans biochars. Les biochars et les charbons en général constituent d'ailleurs un habitat privilégié pour les micro-organismes du sol. Une émission de gaz éthylène durant la dégradation des biochars par la biomasse microbienne des sols a également été observée. L'éthylène stimule ensuite la croissance des racines.

Une question importante concerne la généralisation des propriétés agronomiques et environnementales des biochars décrites plus haut dans des pédoclimats contrastés, ainsi que leur validité pour des biochars issus de différents procédés de pyrolyse, et de différentes matières premières comme les résidus de culture, les effluents d'élevage, ou les débris ligneux (SOHI *et al.*, 2009). Compte tenu du fort potentiel des biochars à mitiger le changement climatique, et à améliorer la croissance des plantes dans différents contextes, mais compte tenu également des incertitudes précitées et du caractère irréversible d'une application de biochar au sol, une évaluation complète des externalités de cette solution technique est indispensable dans chaque situation pédoclimatique où son application est envisagée.

Techniques de restauration de la fertilité des sols par les biochars

Dans les pays du Sud, l'utilisation des biochars apparaît comme potentiellement crédible d'un point de vue socio-économique, car elle répond aux contraintes locales. Des biochars sont déjà disponibles dans le commerce à un faible prix (0,30 €/kg pour des charbons de bois au Vietnam, par exemple). Ils peuvent ainsi concurrencer la fertilisation organique traditionnelle peu disponible, souvent onéreuse et surtout moins durable, car nécessitant des apports plus fréquents. De plus, des pyrolyseurs de petite dimension (adaptés à la superficie des exploitations locales) peuvent également servir de foyers de cuisson mutualisés à l'échelle de villages. De telles solutions innovantes permettant d'obtenir à moindre coût des biochars de qualité en optimisant le bilan énergétique, environnemental et social sont actuellement en test dans divers pays

du Sud. S'ils sont produits de cette façon, les biochars ont l'avantage d'être moins coûteux que les engrais chimiques dont les doses d'application pourraient être réduites s'ils sont utilisés en même temps que les biochars (KIMETU, 2008). Récemment, des fours domestiques ont été développés, qui permettent la production des biochars en utilisant la biomasse végétale. L'utilisation de ces fours dans les foyers aurait plusieurs avantages : (1) réduire les émissions de CO₂ et le bilan énergétique, (2) améliorer la santé des voies respiratoires, car ils limitent les fumées et (3) produire des biochars pour l'enfouissement dans les sols afin d'en améliorer la fertilité. Pour générer des biochars, qui ont des propriétés optimales et adaptées aux situations locales, des tests sont nécessaires, en utilisant plusieurs types de biomasse, ainsi que plusieurs conditions de pyrolyse.

Les conditions techniques de l'application des biochars aux sols restent à préciser : aucun itinéraire technique en fonction des caractéristiques des sols n'existe aujourd'hui (BLACKWELL *et al.*, 2009), et la compatibilité des amendements de biochar aux sols en système de semis direct n'a pas été examinée.

L'ajout des biochars aux sols ne peut pas être vu comme une fertilisation, parce qu'ils sont extrêmement appauvris en azote et phosphore par rapport au carbone. Ceci peut conduire à des rapports C/N et C/P très élevés, ce qui pourrait être un frein à leur dégradation. De plus, il a été démontré que la forme d'azote présent dans les biochars consiste en structures hétérocycliques probablement peu dégradables par la biomasse microbienne. L'« azote noir » a été soupçonné d'être responsable en partie de la stabilité des biochars (KNICKER, 2010). Toutefois, une étude récente a montré à l'aide d'un marquage isotopique de l'azote que l'azote présent dans les biochars est susceptible de participer aux cycles biogéochimiques des sols (de LA ROSA

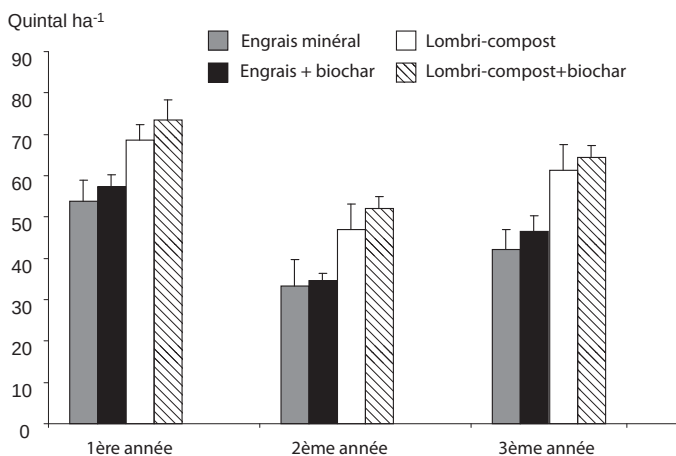


Figure 1

Rendements de maïs pendant trois ans après amélioration des sols tropicaux avec de l'engrais minéral et du lombri-compost, avec ou sans biochars.

Source : Jouquet P., Doan T., Ngo P.T., non publié.

et KNICKER, 2011). Néanmoins, dû à leur faible teneur en nutriments disponibles, il est recommandé d'apporter des nutriments conjointement avec des biochars. En général la présence des biochars réduit les pertes d'azote (STEINER *et al.*, 2008), ce qui est très intéressant pour l'amélioration des sols tropicaux. Il a été suggéré que l'association des composts avec des biochars pourrait être bénéfique pour la fertilité des sols. Toutefois, une application de 7 t/ha de biochars en association avec de l'engrais minéral ou de lombricompost (20 t/ha/an) au pied des plantes (technique 'zai') n'a pas augmenté significativement les rendements de maïs.

1). Ceci pourrait être dû à l'absence d'interaction directe avec la phase minérale du sol ou à la dose de biochar plutôt faible comparé avec l'autre substrat organique. En ce moment, des études sont effectuées pour examiner l'interaction de ces deux substrats.

Conclusions

Les biochars présentent un substrat organique difficilement dégradable et donc un puits de carbone après application aux sols.

Ils pourraient être utiles comme amendement organique pour conditionner certaines propriétés des sols : réduction de l'acidité des sols pauvres, amélioration de la capacité d'échange de divers nutriments (y compris de l'azote et du phosphore), de la capacité de stockage de l'eau et résistance à la compaction.

Malgré leur rôle possible dans la nutrition des plantes, les biochars ne sont pas des fertilisants. Leur potentiel à améliorer les sols tropicaux pauvres en nutriments mérite d'être testé plus en détail. L'application d'un cosubstrat serait nécessaire afin de fournir aux plantes une source complémentaire d'azote et de phosphates.

D'après les études bibliographiques déjà réalisées, il serait raisonnable d'appliquer dans les sols ferrallitiques ou ferrugineux sableux désaturés (ultisols) 10-20 tonnes/ha de biochar en une seule fois, de les enfouir au moins superficiellement dans l'horizon labouré pour réduire leur perte par érosion et de compléter cet amendement par l'apport complémentaire de NPK en fonction des cultures et de leur potentiel de production. Cet amendement unique devrait augmenter le potentiel de production de ces sols pauvres de 30 % dans les années suivant l'apport. Toutefois, afin que l'utilisation d'une telle quantité de charbon soit abordable pour les petits paysans et ne conduise pas à la destruction des forêts, il faudra continuer à développer des techniques de carbonisation en utilisant des biomasses résiduelles ou des déchets organiques. L'idéal serait de produire les charbons à l'échelle de la ferme pour une utilisation directe par l'agriculteur.

Bibliographie

- ALEXIS M. A., RUMPEL C., KNICKER H., LEIFELD J., RASSE D., PÉCHOT N., BARDOUX G., MARIOTTI A., 2010 – Thermal alteration of organic matter during shrubland fire: a field study. *Organic Geochemistry*, 41 : 690-697.
- ASCOUGH P. L., BIRD M. I., WORMALD P., SNAPE C. E., APPERLEY D., 2008 – Influence of production variables and starting material on charcoal stable isotopic and molecular characteristics. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 72 : 6090-6102.
- BIRD M., MOYO C., VEENENDAAL E. M., LLOYD J., FROST P., 1999 – Stability of elemental carbon in a savanna soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 13 : 923-932.
- BLACKWELL P., RIETMÜLLER G., COLLINS M., 2009 – « Biochar application to soil ». In Lehmann J., Stephen J. (eds) : *Biochar; Environmental Management*, Earthscan : 207-227.
- BRODOWSKI S., AMELUNG W., HAUMAIER L., ABETZ C., ZECH W., 2005 – Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Geoderma*, 128 : 116-129.
- CÉCILLON L., CERTINI G., LANGE H., FORTE C., STRAND L. T., 2012 – Spectral fingerprinting of soil organic matter composition. *Organic Geochemistry*, 46 : 127-136.
- CHANG K. Y., XU Z., 2009 – « Biochar: nutrient properties and their enhancement ». In Lehmann J., Joseph S. (eds) : *Biochar for environmental management*, London, Earthscan : 67-84.
- DE LA ROSA J. M., KNICKER H., 2011 – Bioavailability of N released from N-rich pyrogenic organic matter: an incubation study. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 : 2368-237.
- GLASER B., HAUMAIER L., GUGGENBERGER G., ZECH W., 1998 – Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. *Organic Geochemistry*, 29 : 811-819.
- KIMETU J. M., LEHMANN J., NGOZE S. O., MUGENDI D. N., KINYANGI J. M., RIHA S., VERCHOT L., RECHA J. W., PELL A. N., 2008 – Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems*, 11 : 726-739.
- KNICKER H., 2010 – “Black nitrogen” – an important fraction in determining the recalcitrance of charcoal. *Organic Geochemistry*, 41 : 947-950.
- KUHLBUSCH T. A. J., CRUTZEN P. J., 1995 – Towards a global estimate of black carbon on residues of vegetation fires representing a sink of atmospheric CO₂ and a source of O₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 9 : 491-501.
- KUZYAKOV Y., SUBBOTINA I., CHEN H. Q., BOGOMOLOVA I., XU X. L., 2009 – Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by C-14 labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 : 210-219.
- LAL R., 2004 – Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304 : 1623-1627.
- LEHMANN J., 2007 – Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and Environment*, 5 : 381-387.
- LEHMANN J., SKJEMSTAD J., SOHI S., CARTER J., BARSON M., FALLOON P., *et al.*, 2008 – Australian climate-carbon cycle feedback reduced by soil black carbon. *Nature Geoscience*, 1 : 832-835.
- LEHMANN J., CZIMCZIK C., LAIRD D., SOHI S., 2009 – « Stability of biochar in the soil ». In Lehmann J., Joseph S. (eds) : *Biochar for environmental management*, London, Earthscan : 183-205.
- LENZ R., IPPOLITO R. A., 2012 – Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environmental Quality*, 41 : 1033-1043.
- LIANG B., LEHMANN J., SOLOMON D., KINYANGI J., GROSSMAN J., O'NEILL B., SKJEMSTAD J. O., THIES J., LUIZAO F. J., PETERSEN J., NEVES E. G., 2006 – Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70 : 1719-1730.
- MAJOR J., STEINER C., DOWNIE A., LEHMANN J., 2009 – « Biochar effect on nutrient leaching ». In Lehmann J., Joseph S. (eds) : *Biochar for environmental management*, London, Earthscan : 271-287.

- MAJOR J., LEHMANN J., RONDON M.; GOODALE C., 2010 – Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 16 : 1366-1379.
- MASIELLO C. A., 2004 – New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 92 : 201-213.
- MCBEATH A. V., SMERNIK R. J., SCHNEIDER M. P. W., SCHMIDT M. W. I., PLANT E. L., 2011 – Determination of the aromaticity and the degree of aromatic condensation of a thermosequence of wood charcoal using NMR. *Organic Geochemistry*, 42 : 1194-1202.
- NOCENTINI C., CERTINI G., KNICKER H., FRANCIOSO O., RUMPEL C., 2010 – Nature and reactivity of charcoal produced and added to soil during wildfire are particle-size dependent. *Organic Geochemistry*, 41 : 682-689.
- QUÉNÉA K., DERENNE S., RUMPEL C., ROUZAUD J.-N., GUSTAFSSON O., CARCAILLET C., MARIOTTI A., LARGEAU C., 2006 – Black carbon quantification in forest and cultivated sandy soils (Landes de Gascogne, France). Influence of change in land-use. *Organic Geochemistry*, 37 : 1185-1189.
- RIVAS Y., MATUS F., RUMPEL C., KNICKER H., GARRIDO E., 2012 – Black carbon contribution in volcanic soils affected by wildfire or stubble burning. *Organic Geochemistry*, 47 : 41-50.
- ROBERTSON F. A., MORGAN W. C., 1995 – Mineralization of C and N in organic materials as affected by the duration of composting. *Australian Journal Soil Research*, 33 : 511-524.
- RUMPEL C., JANIK L., SKJEMSTAD J. O., KÖGEL-KNABNER I., 2001 – Quantification of lignite carbon in soils using Mid-infrared Partial Least Squares. *Organic Geochemistry*, 32 : 831-839.
- RUMPEL C., CHAPLOT V., PLANCHON O., BERNADOUX J., VALENTIN C., MARIOTTI A., 2006A – Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture. *Catena*, 65 : 30-40.
- RUMPEL C., ALEXIS M., CHABBI A., CHAPLOT V., RASSE D. P., VALENTIN C., MARIOTTI A., 2006B – Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. *Geoderma*, 130 : 35-46.
- RUMPEL C., CHAPLOT V., CHABBI A., LARGEAU C., VALENTIN C., 2008 – Stabilisation of HF soluble and HCl resistant organic matter in tropical sloping soils under slash and burn agriculture. *Geoderma*, 145 : 347-354.
- RUMPEL C., BA A., DARBOUX F., CHAPLOT V., PLANCHON O., 2009 – Erosion budget of fire resistant carbon at meter scale and process selectivity. *Geoderma*, 154 : 131-137.
- SCHMIDT M. W. I., SKJEMSTAD J. O., JÄGER C., 2002 – Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: black charnozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 : 1123-1131.
- SOHI S., LOPEZ-CAPEL E., KRULL E., BOL R., 2009 – Biochar's roles in soil and climate change: a review of research needs. *CSIRO Land and Water Science Report*, 05/09, 64 p.
- SPOKAS KURT A., NOVAK JEFF M., VENTEREA RODNEY T., 2012 – Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Plant and Soil*, 350 : 35-42.
- STEINER C., GLASER B., TEIXEIRA W. G., LEHMANN J., BLUM W. E. H., ZECH W., 2008 – Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171 : 893-899.
- UZOMA K. C., INOUE M., ANDRY H., ZAHOOR A., NISHIHARA E., 2011 – Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9 : 1137-1143.
- VAN ZWIETEN L., KIMBER S., MORRIS S., DOWNIE A., BERGER E., RUST J., SCHEER C., 2010 – Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol. *Australian Journal of Soil Research*, 48 : 555-568.
- WARDLE D. A., ZACKRISSON O., NILSSON M.C., 1998 – The charcoal effect in boreal forests: mechanisms and ecological consequences. *Oecologia*, 115 : 419-426.
- ZIMMERMAN A. R., GAO B., AHN M.-Y., 2010 – Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 : 1169-1179.

Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale

Points de vue d'un zootechnicien et d'un agro-pédologue

Hubert GUERIN

Éric ROOSE

Introduction

Dans les régions semi-arides soudano-sahéliennes africaines, la restauration de la fertilité des sols a été longtemps assurée par l'abandon des champs cultivés à une longue jachère, par la vaine pâture, contractuelle ou non, par le parcage nocturne des animaux sur les surfaces cultivées, par l'épandage sur les champs de poudrettes de parc de nuit, et, parfois, depuis quelques décennies, par la fabrication de fumiers. Les fumures organiques et minérales ont été promues pour les cultures industrielles (coton et arachide principalement) et ont profité indirectement aux cultures vivrières. Mais l'accroissement démographique et la pression foncière qui en découle dépriment les systèmes traditionnels de gestion de la fertilité. Les évolutions économiques restreignent l'emploi des engrais

minéraux devenus très chers. Une gestion plus performante des résidus organiques et minéraux produits par les systèmes de culture et d'élevage est donc une priorité.

Les matières fécales et les urines émises par le bétail, les biomasses végétales naturelles et cultivées, mélangées ou non, en sont les matières premières. La



a : bovins au piquet sur litière de mil : poudrette de parc imprégnée d'urine.

© D. Friot

b : stockage des pailles de sorgho et d'arachide près de la case, Sénégal.

© H. Guerin

densité et la mobilité du bétail, les modalités de collecte, de stockage, de traitement, d'épandage de ces excréments, les caractéristiques des sols et des cultures qui les reçoivent sont les principaux déterminants de leur impact sur la fertilité. Des référentiels de recommandations techniques pour la fabrication de fumier en régions tropicales ont été élaborés (chapitre 13, Ganry et Thuriès).

La diversité et l'intensité des usages des biomasses végétales aux échelles des exploitations et des terroirs limitent cependant les disponibilités fourragères et en conséquence, les restitutions animales. Des arbitrages peuvent être faits entre restitution directe au sol, paillage et affouragement. C'est le cas dans les exploitations qui adoptent des systèmes de culture sous couvert végétal (SCV) (chapitre 13, Ganry et Thuriès ; chapitre 30, Dugué *et al.*)

Pour diagnostiquer les marges de progrès d'un système de fumure animale, il est utile d'évaluer les restitutions par le bétail. Elles sont directement liées à son système alimentaire : le prélèvement fourrager résulte des disponibilités en ressources végétales, de la pression animale sur celles-ci, de la conduite des troupeaux sur le parcours et du comportement alimentaire des animaux.

La variabilité des restitutions découle aussi directement des processus physiologiques chez l'animal. Des repères qualitatifs et quantitatifs relatifs à ces différents aspects du système « fumure animale » sont nécessaires pour évaluer les facteurs limitant la valorisation des déjections.

Les fourrages et les produits de leur digestion

Ils sont constitués de matières organiques et minérales.

Composés organiques

D'un point de vue agronomique et environnemental, la matière organique (MO) est la forme biologique de stockage des nutriments et du carbone ; d'un point de vue zootechnique, elle correspond à l'énergie nutritionnelle et aux apports protéiques des animaux.

Les principaux constituants organiques des fourrages sont génériquement classés en « fibres », et en « matières azotées ».

Les fibres

Le terme de fibres recouvre plusieurs types de composants : celluloses, hémicelluloses, associées à des lignines. Une fraction variable des fibres (40 à 70 %) est fermentée dans le rumen, transformée en nutriments énergétiques absorbés dans

le tube digestif et en méthane et gaz carbonique libérés dans l'atmosphère (LECOMTE *et al.*, 2004). La fraction non dégradée lors du transit digestif est retrouvée dans les fèces. Elle contient une partie des fibres dont la quasi-totalité des lignines considérées indigestibles. Constituant l'essentiel de la matière organique non digestible, les fibres sont plus concentrées dans les fèces (50 à 60 % de la matière sèche) que dans les aliments (30 à 50 %) (GUERIN *et al.*, 1990).

Tableau 1

Quantités de matière organique (MO), de fibres (assimilées à la ligno-cellulose – Acid Detergent Fiber – ADF – Van Soest), de lignine et d'azote fécales émises par des petits ruminants et des bovins sur parcours agro sylvo-pastoral sahélo-soudanien.

Quantités dans les fèces par période (kg)													
(kg/petit ruminant 30 kg*) (kg/Bovin 250 kg*)													
Ovins, O ; Caprins, C													
		MO		Fibres		Azote		Matière organique		Fibres		Azote	
				Ligno cellulose		Lignine				Ligno cellulose		Lignine	
				O C									
D'après Guérin et al. 1990	Saison des Pluies (3 mois)	17	10	4	6	0.7	130	70	35	5			
	Saison sèche post récolte (3 mois)	28	13	7	9	0,9	200	110	50	5 à 7			
	Pleine saison sèche (6 mois)	68	47	21	28	1,6	330	200	85	5 à 8			
	TOTAL ANNUEL	113	70	32	44	3.2	660 à 830**	380 à 470**	170 200 -	15 à 18*			
	Par 100 kg poids vif pour comparaison entre espèces												
Totaux annuels		330	230	110	145	10	270 à 330**	150 à 180**	70 à 80**	6 à 7**			

* Par petit ruminant moyen de 30 kg PV ou par bovin de 250 kg PV – UBT – et par 100 kg PV pour faciliter les comparaisons entre espèces.

** Les valeurs en italiques indiquées pour les bovins en saison sèche correspondent à des systèmes fourragers plus riches ou améliorés par la complémentation alimentaire des animaux avec des sous-produits de récolte (fanés de légumineuses, pailles de céréales de bonne qualité) ou des foin. Les petits ruminants, plus mobiles et plus sélectifs s'adaptent mieux aux faibles disponibilités fourragères quand ils sont élevés sur parcours.

Noter les différences significatives entre espèces (rapportées à 100 kg de poids vif) et contrastées suivant les saisons des teneurs en fibres (ligno-celluloses et lignines), en particulier en lignine des fourrages ligneux pour les caprins qui en consomment beaucoup. Les teneurs en fibres et leur lignification déterminent leur digestibilité et celle de l'azote partiellement « bloqué » dans la lignocellulose (GUERIN *et al.* 1988 et 1990). Ces caractéristiques des fibres contenues dans la matière organique rapportée au sol sont aussi parfois considérées comme facteur des dynamiques de leur humification (FELLER, 1979 et SVEN *et al.*, 2013).

Les matières azotées

La plus grande partie de l'azote végétal est sous forme protéique. Les équivalents nutritionnels sont exprimés en matières azotées totales et digestibles (N x 6,25 exprimées en g/kg MS).

La teneur en azote des fourrages dépend de leur origine botanique, de la saison, du stade phénologique, de l'âge de la plante depuis le semis ou sa dernière exploitation par coupe ou pâturage et du sol. Les teneurs en azote des graminées diminuent rapidement au cours de leur cycle de végétation : de l'ordre de 2,5 % dans la matière sèche en début de croissance jusqu'à des niveaux très faibles inférieurs à 1 % quand elles sont à l'état de pailles sèches sur pied. Ces faibles teneurs peuvent être corrigées en saison sèche par l'ingestion de repousses de graminées vivaces, de légumineuses herbacées plus riches en N même à l'état de pailles, de fourrages ligneux (1,5 à 3 %), de résidus de culture de légumineuses comme l'arachide (1 à 2,5 % suivant l'importance relative des feuilles et des tiges).

Certains fourrages, ligneux principalement, sont riches en azote, mais ils contiennent aussi des lignines qui l'emprisonnent dans les fibres indigestibles et des tanins qui le bloquent chimiquement. Une part de cet azote n'est donc pas disponible pour l'animal.

La digestibilité de la matière organique

Le taux de digestion de la matière organique des fourrages par les ruminants est fonction de leurs teneurs en fibres, qui augmentent et se lignifient quand les plantes vieillissent. Cette dégradation de la digestibilité est accentuée par les très faibles teneurs en azote fréquentes dans les pailles soudano-sahéliennes, car un faible niveau d'azote limite la digestion microbienne dans le rumen (RICHARD *et al.*, 1989).

Le bilan azoté chez l'animal et ses conséquences pour les restitutions

Le bilan azoté est le solde de l'azote ingéré, de celui excrété dans les urines et les fèces, et de l'azote retenu par l'animal. Hormis l'azote réellement indigestible du fait de son association aux fibres ou des tanins, l'essentiel de l'azote excrété est d'origine endogène (renouvellement des tissus du tube digestif, produits du métabolisme azoté).

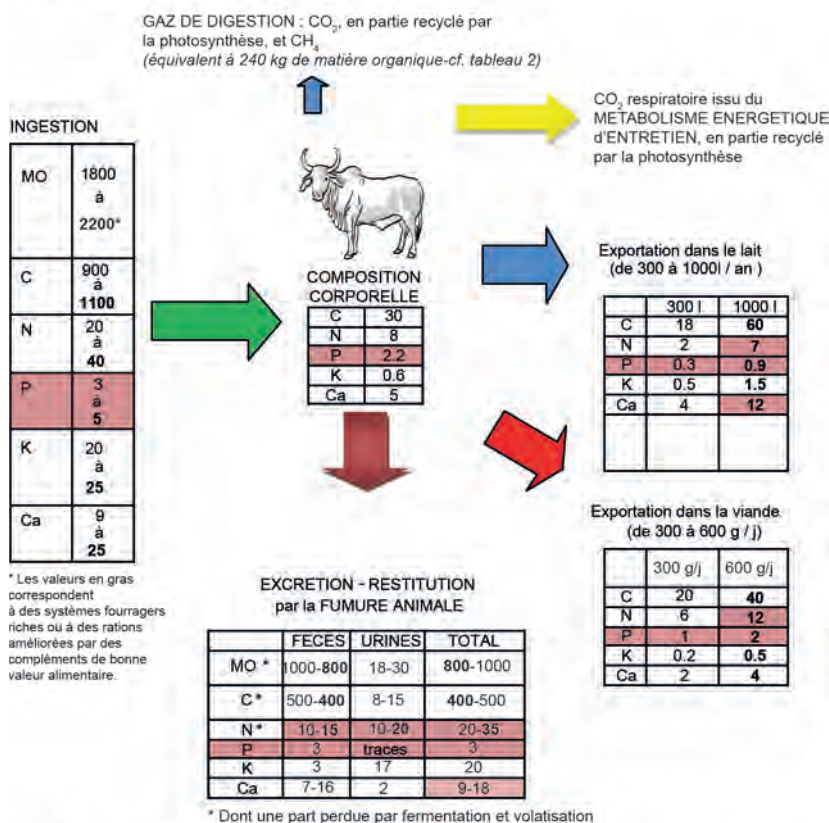
La teneur en azote non digestible varie donc peu pour la majorité des fourrages (de 0,65 à 0,8 % de la matière sèche). La quantité d'azote fécal excrétée est surtout proportionnelle aux quantités ingérées. Les écarts de digestibilité expliquent alors les concentrations variables dans les fèces entre 1,5 et 2,5 %.

Pour les régimes qui contiennent beaucoup de fourrages ligneux, en particulier ceux des caprins, l'azote protégé de la digestion par les lignines et les tanins est plus abondant dans les fèces (tabl. 1).

En milieu agropastoral, les teneurs en azote des bouses de bovins varient de 1 à 3 % de la matière sèche (avec des minima à 1 % sur paille pauvres de graminées), celles des crottes de petits ruminants entre 2 et 4 %. Les ovins sont intermédiaires entre les bovins et les caprins (adapté d'après une revue de LANÇON, 1978).

Pour une année et à l'échelle d'une UBT bovine¹, les quantités ingérées d'azote sont de l'ordre de 30 kg, celles excrétées dans les fèces de l'ordre de 15 kg et dans les urines de 10 à 20 kg. L'azote des urines sous diverses formes chimiques est dilué à raison de 10 à 20 g/litre dans 1 000 à 2 500 litres par an suivant les conditions climatiques et la teneur en eau des fourrages. L'azote des urines composé à 75 % d'urée est rapidement volatilisé s'il est déposé sur un sol sec et peu argileux.

(En kg par UBT-250 kg de poids vif-et par an)



Principaux éléments critiques limitant les performances ou pouvant donner lieu à carence nutritionnelle

Figure 1

Bilan annuel (en kg par an) de l'utilisation de la matière organique, du carbone, de l'azote et des principaux minéraux pour un ruminant sahélo-soudanien. Cas d'un zébu à l'entretien, en production modérée de système extensif (300 l de lait par an ou 300 g de gain de poids vif journalier) ou semi-intensif (1 000 l de lait par an ou 600 g de gain de poids vif). (en kg par an par UBT - 250 kg de poids vif - et par an).

1. UBT : Unité Bovin Tropical. Unité animale référence correspondant à un bovin de 250 kg de poids vif. Les biomasses animales correspondant aux cheptels des différentes espèces exploitant les parcours peuvent être exprimées avec cette unité (en anglais TLU : Tropical Livestock Unit).

Tableau 2
Quantités de matière organique (MO), de carbone (C), d'azote (N) et de minéraux contenues dans les compartiments « sol », « fourrage », « bétail », des restitutions par les « fèces » et les « urines » et des exportations par les « produits animaux ».

	Compartiments			Flux Animal-Terroir				Exportations	
	Sol horizon 20 cm	Fourrage (par tonne MS)		Animal UBT	Ingéré 2T MS / UBT/an	Restitution par excréta (animaux à l'entretien)		Produits animaux	
	kg/ha	Herbes annuelles parcours naturels - paille céréale	Fane légumineuse	250 kg Poids vif	Kg/UBT/an	Fèces	Urines	100 kg poids vif	1000 l de lait
MO ^{a b}	22 000	900	900	70	1 800	800	+		
N	1 000	6	17	8	20-40	15 ^c	15 ^c	3	7
P assimilable	13	1	2	2,2	3-4	2-3 ^c	0,5 ^c	1	1
K	100	15	11	0,6	20-25	3 ^c	22 ^c	0,25	1,3
Ca	700	2,7	10	5	12	11 ^c	1 ^c	2	12
Mg	200	2,2	6,4	0,1	10	9 ^c	1 ^c	0,05	0,1
Na	-	0,6	0,6	0,4	1,2	1,2	1,2	0,15	0,43

a) La matière organique du sol contient environ 50 % de carbone (ROOSE, 1981).
b) Les fermentations liées à la digestion microbienne dans le rumen produisent des gaz contenant en moyenne 5 % du carbone ingéré dans du méthane, deux fois plus dans du gaz carbonique équivalent au total à 15 % de la matière organique ingérée soit 250 kg par UBT et 70 kg par ha dans l'exemple pris ici (VERMOREL, 1995 ; LECOMTE et al., 2005). À cela s'ajoute le carbone contenu dans le gaz carbonique issu de la respiration. À noter que le CO₂ est en grande partie recyclé dans les végétaux par la photosynthèse. En comparaison, les pertes en MO liées à la fermentation et à la minéralisation dans le sol sont estimées équivalentes à plus de 1 000 kg de MO/ha/an (ROOSE, 1981).
c) Par différence entre les minéraux ingérés et ceux exportés dans les produits animaux (MESCHY et al., 1995) et aussi par l'application de leur ratio dans les excréta, urine et fèces (LANÇON, 1978).

Une UBT stocke 8 kg d'azote avec un turnover important. Les vaches en lactation exportent 2 kg d'azote pour 300 l de lait ; les jeunes bovins en croissance en fixent autant pour un gain de 80 kg de poids vif. Si ces produits animaux sont exportés du terroir, ils correspondent à autant de perte en azote à cette échelle (fig. 1).

Pour une densité animale de 4 ha par UBT, ces valeurs ramenées à l'hectare en les divisant par 4 correspondent cependant à des flux très faibles en regard des quantités contenues dans le compartiment sol, environ 1 000 kg d'azote/ha dans l'horizon de sol 20 cm – d'après ROOSE, 1981 (tabl. 2).

Composés minéraux

Leur part totale dans la matière sèche est déterminée par incinération d'échantillons du végétal. Les éléments majeurs (P, K, Ca, Mg), la silice (Si) et les oligoéléments (Cu, Zn, Se, Mn, Co,) sont dosés dans les cendres résiduelles.

Les teneurs en minéraux des fèces sont variables : 10 % de la matière sèche au maximum de végétation, par exemple sur parcours post-cultureux portant 1 à 2 tonnes de pailles de céréales à l'hectare ; 25 % pour des disponibles fourragers sur parcours naturels de 600 kg de MS/ha de milieu de saison sèche lorsque les pailles sont souillées par les vents de sable et le piétinement du bétail ; jusqu'à 40 % en fin de saison sèche et lors des premières pluies quand le fourrage est rare et chargé de terre ou de sable. Il s'agit alors essentiellement de silice.

Comme les composés organiques, les minéraux sont partiellement absorbés dans le tube digestif, restitués dans les fèces et les urines suite à des processus métaboliques complexes, notamment pour le phosphore et le calcium au niveau du squelette.

Lorsque les animaux reçoivent des compléments minéraux, ce qui est encore rare, les taux d'absorption et de restitution varient suivant leur nature chimique ; ainsi la digestibilité apparente du phosphore varie de 20 à 60 % suivant qu'il s'agit de phosphate tricalcique, de phosphate bicalcique ou de farine d'os.

La répartition des restitutions minérales entre les fèces et les urines varie suivant les éléments (LANÇON, 1978). Les quantités stockées par l'animal sont faibles (2,2 kg de P, 0,6 kg de K, 5 kg de Ca par UBT d'après MESCHY et GUEGUEN, 1995) et celles exportées dépendent de la productivité du bétail en gain de poids vif ou en lait suivant les moyennes indiquées ci-dessus (tabl. 2 et fig. 1). Globalement, sauf pour le phosphore et secondairement le calcium, ces quantités sont faibles comparativement aux compartiments sol et biomasse végétale (ROOSE, 1981).

La silice est l'élément minéral le plus abondant dans les végétaux (1 à 10 %). Elle est particulièrement abondante dans la paille de riz. Elle est sans intérêt nutritionnel, voire abrasive pour le tube digestif et retrouvée intégralement dans les fèces.

Le phosphore est limitant dans les sols pour les végétaux et pour les animaux. Sa teneur de l'ordre de 0,2 % de la matière sèche dans les graminées naturelles en début de cycle diminue jusqu'à des niveaux très faibles en saison sèche (0,02 à 0,05 % de la matière sèche), alors que pour satisfaire le besoin d'entretien des ruminants la teneur devrait être de 0,12 % de la MS ingérée. Comme pour l'azote, cette carence peut être partiellement corrigée par la consommation de repousses de graminées vivaces, des dicotylédones herbacées ou ligneuses et de sous-produits de cultures (0,15 à 0,2 % de MS). La teneur des sols en phosphore assimilable par les plantes influence grandement la composition des fourrages et la satisfaction, ou non, des besoins des animaux globalement non couverts en zone tropicale sèche (RICHARD *et al.*, 1989). Les éventuels apports exogènes de phosphore par des engrais ont donc un impact indirect sur la qualité des rations. L'animal en retient 0,9 kg/100 kg de gain de poids vif et 84 g/100 l de lait. Les restitutions au sol passent essentiellement par les fèces qui en contiennent en moyenne 0,3 % de la matière sèche, ce qui correspond à un total annuel de l'ordre de 3 kg par UBT (fig. 1).

Le potassium présente de fortes contraintes en agriculture, mais n'est pas limitant en élevage extensif. Les teneurs en K dans les fourrages sont comprises entre 0,6 et 3,1 % de la matière sèche. Les restitutions par l'animal à l'entretien sont

proportionnelles aux quantités consommées, soit 25 kg de K/UBT/an répartis entre les urines (85 %) et les fèces (15 %). L'animal en retient 0,25 kg/100 kg de gain de poids vif et 130 g/100 l de lait. Le recyclage du potassium par les urines dans le fumier permet aussi de restaurer dans les résidus de paille un niveau facilitant l'humification et correspondant aux besoins des cultures. De même, les aires de repos sont significativement enrichies par le transfert spatial de cet élément depuis les zones pâturées.

Les teneurs en calcium dans les fourrages sont comprises entre 0,3 et 1,6 % de la MS, plus élevées dans les légumineuses. L'animal en stocke 5 kg/UBT et en exporte 2 kg par 100 kg de cheptel vif et 130 g/100 l de lait. Pour un animal en production à ces niveaux, 5 kg sont rejetés dans les fèces. Les urines en contiennent très peu.

Le magnésium (0,1 à 0,3 % de la matière sèche des fourrages ; jusqu'à 0,6 % dans les légumineuses fertilisées et dans les feuilles d'arbres) est à 95 % excrété (4 kg) dans les fèces.

Les teneurs en sodium des fourrages ne sont importantes que dans les zones arides salées. Ailleurs, la pauvreté naturelle des fourrages en Na, indispensable à la régulation du métabolisme hydrique, conduit souvent les éleveurs à compléter leur cheptel. C'est la complémentation minérale la plus aisée à mettre en œuvre, notamment lors de cures salées pour les troupeaux transhumants. Le NaCl constitue aussi la plus grande part des compléments minéraux commercialisés pour le bétail.

D'une façon générale, comme pour le phosphore, les concentrations en minéraux d'intérêt nutritionnel dans les fourrages sont fortement influencées par la fertilisation. C'est le cas en particulier pour les sous-produits de récoltes et les fourrages cultivés. Hormis pour le phosphore, les teneurs des fourrages en éléments minéraux majeurs d'intérêt nutritionnel posent peu de problèmes pour l'élevage, parce que les teneurs sont adaptées aux besoins des animaux du fait de leurs performances modérées. En cas d'intensification et donc d'augmentation des besoins nutritionnels, ces apports doivent être reconsidérés, en particulier pour le calcium et la production laitière, sachant cependant que le calcium est toujours associé à la complémentation en P.

Dans les régions subsahariennes, le cuivre, le zinc et parfois le sélénium peuvent cependant donner lieu à des carences alimentaires conduisant à des pathologies et des baisses de production. Ils ont parfois été associés à des complémentations en phosphore dans des projets de développement de l'élevage en régions sahéliennes où des carences et leurs impacts sur la productivité ont été diagnostiqués (GUERIN *et al.*, 1991).

Dans les systèmes extensifs, l'exportation de minéraux dans les produits animaux est donc assez faible en proportion de leur teneur globale dans les sols et de leur turnover dans les systèmes alimentaires. Elle augmente avec l'intensification des cultures et de l'élevage et donc avec les ventes de produits animaux. Ainsi, l'intensification, de la production laitière en particulier, principale exportatrice de minéraux, justifie de réévaluer les apports de minéraux aux animaux et le bilan des exportations, en particulier pour le phosphore.

Diversité des ressources, diversité des régimes, comparaison entre espèces animales et conséquence pour les restitutions d'éléments fertilisants

Pour une saison climatique et agricole donnée, la diversité des fourrages dans les régimes des animaux dépend de la nature et de la distribution des ressources, de la conduite sur les parcours et des préférences alimentaires des cheptels. C'est aussi à l'échelle des espèces végétales et de leurs organes que s'opèrent les choix alimentaires des animaux, en particulier pour les petits ruminants plus sélectifs que les bovins. Cela contribue encore à enrichir et différencier leurs régimes.

Les bovins consomment davantage de pailles de graminées sèches, les petits ruminants plus de fourrages ligneux, mais toutes les espèces recherchent avidement les fanes de légumineuses. Par exemple dans le bassin arachidier sénégalais après la récolte des fanes d'arachide, les petits ruminants passent de longues semaines à récupérer les folioles tombées au sol (150 kg de MS/ha), tandis que les bovins se concentrent sur les pailles de céréales et les végétations adventices et ligneuses qui les entourent (GUERIN *et al.*, 1986).

Les excréta des animaux dépendent de cette diversité. L'analyse chimique des fèces et les mesures de quantités excrétées renseignent alors sur la quantité d'éléments fertilisants restitués par chaque unité de bétail (voir tabl. 1).

La caractérisation des régimes moyens saisonniers et annuels d'un ruminant permet donc de prévoir ses restitutions, à l'échelle du terroir agropastoral qui correspond aux différents types de parcours fréquentés successivement au fil des saisons.

Ces évaluations correspondent ici aux composants de la matière organique, fibres et azote, candidats à la fumure animale dans les régions d'Afrique soudano-sahélienne.

En particulier, le rapport C/N (GIROUX et AUDES, 2004) des fèces (d'après les données du tableau 1 en évaluant le carbone à 50 % de la matière organique – ROOSE (1981), un des critères de la qualité humifère de la matière organique revenant directement au sol ou contribuant à la fabrication des fumiers et composts (chap. 13, Ganry et Thuriès) varie en fonction de l'espèce et de la saison, donc des régimes alimentaires, avec des minima de 12 en saison des pluies, et des maxima de 23 en saison sèche et suivant l'espèce animale : 16 en moyenne sur l'année pour les petits ruminants, et 22 en moyenne sur l'année pour les bovins. Ces variations sont conformes à celles rapportées par LECOMTE *et al.* (2004).

Il est plus délicat d'effectuer des estimations homologues pour les minéraux, car le métabolisme minéral avec des périodes de stockage et déstockage suivant le stade physiologique des animaux, leur état nutritionnel et les productions est



a : les caprins préfèrent les feuilles d'arbustes et les légumineuses.

© B. Toutain

b : les bovins préfèrent les chaumes de céréales, Sénégal.

© D. Friot

très variable et a peu été étudié en régions subsahariennes. Une estimation des bilans annuels globaux est cependant tentée en s'appuyant sur la composition moyenne des régimes, le stockage dans les animaux et la composition des produits animaux exportés (voir tabl. 2 et fig. 1).

Mobilités des troupeaux, parcours, parcage et transferts de fertilité

En milieu agropastoral, les bovins sont souvent conduits au pâturage entre les deux traites du matin et du soir, durant 7 à 10 heures par jour. Durant ce temps, ils se déplacent, consomment des fourrages, ruminent, s'abreuvent et se reposent. Les déplacements sont en moyenne de 10 km par jour avec une forte variabilité suivant l'organisation du terroir, la distribution spatiale des champs cultivés, des ressources pâturables et la conduite des troupeaux par les bergers.

En saison des pluies, ils ingèrent 100 % de leur ration sur parcours naturels (ou jachères) ; en début de saison sèche post-récolte, jusqu'à 100 % sur les zones cultivées. En pleine saison sèche, les parcours des troupeaux recouvrent l'ensemble du terroir suivant la distribution des disponibilités en fourrages, la période et les pratiques de gestion des résidus de culture : ils peuvent être abandonnés à la vaine pâture collective, ou cédés à des éleveurs transhumants suivant les pratiques anciennes de contrats de vaine pâture, de fumure et de confiage.

De plus en plus, les pailles relèvent d'une gestion privée soit pour la vaine pâture des troupeaux d'agro-éleveurs eux-mêmes, soit pour la récolte, le stockage, l'affouragement en stabulation ou encore la commercialisation (DONGMO *et al.*, 2012).

Cette tendance à la privatisation progressive des surfaces et des ressources justifie une évaluation plus précise des restitutions par la fumure animale aux échelles des exploitations et des parcelles. De tels bilans peuvent ainsi être effectués pour apprécier des techniques de fumure et les comparer entre elles.

Toutefois, nous traitons ici de bilans plus globaux basés sur les pratiques traditionnelles de gestion des troupeaux laissant une large place à la mobilité entre les différentes composantes des terroirs, cultivées ou non, et libres d'accès pour les résidents ou accessibles par contrat à des transhumants.

Les différences de fréquentation entre parcelles cultivées en début de saison sèche dépendent aussi de l'attractivité relative pour les animaux des résidus de culture et même de la végétation adventice, des rejets de ligneux et de la qualité des fourrages disponibles. En fin de saison sèche, lorsque les ressources sont plus rares et quand les arbres et arbustes repartent en végétation, les animaux réinvestissent l'ensemble du terroir. Le choix par les agro-éleveurs des lieux de parcage nocturne relève de la priorité qu'ils donnent à la restauration de la fertilité de telle ou telle parcelle pour telle culture (LANDAIS *et al.*, 1991).

L'émission des fèces et des urines étant régulièrement répartie au fil des heures, les excréta sont donc proportionnellement dispersés sur les différents faciès des parcours en fonction du temps que les animaux y passent, le reste étant concentré sur les aires de repos, parcs de nuit et lieux d'abreuvement. Suivant la diversité des systèmes fourragers et de conduite des animaux, c'est donc en moyenne la moitié des excréta qui peuvent être récupérés sur les parcs de nuit et aux environs des puits pour faire l'objet

d'une gestion par les agro-éleveurs (MANLAY *et al.*, 2003). Quand le gardiennage collectif limite le temps de pâture à une demi-journée (cas des petits ruminants gardés par des bergers communautaires), c'est alors les trois quarts des fèces et des urines qui peuvent être récupérés. Pour des animaux d'embouche ou laitiers maintenus en stabulation, la totalité des fèces et des urines peut être incorporée au fumier. Cette pratique se développe dans les zones agricoles densément mises en culture.

Bilans globaux de restitutions d'éléments fertilisants par le bétail

Le bilan des flux de matière organique, d'azote et de minéraux est donc fonction du régime et des quantités ingérées et des excréta. Le tableau 2 correspond à un animal moyen des systèmes traditionnels d'élevage avec un accès libre ou négocié aux différents types de ressources disponibles à l'échelle du terroir. Il résume les différents paramètres présentés ci-dessus. Il est important de pouvoir faire ces bilans dans les terroirs ou les exploitations en fonction des surfaces fourragères, des effectifs animaux, et de leur production (lait, viande, travail et leurs quantités). Il est ici donné des ordres de grandeur pour chacun des paramètres très variables. Ils peuvent être utilisés pour esquisser des évaluations théoriques de pertes de nutriments à l'échelle des terroirs. Toutefois, ils doivent être adaptés et précisés en fonction des effectifs par unité de surface, des modes de conduite (impact sur transfert et concentration), des niveaux d'intensification (exportation par les produits animaux), et des couverts végétaux liés à l'élevage (leur production de matière organique, fixation biologique d'azote dans le sol, etc.). Enfin, ces bilans doivent être mis en perspective avec les stocks dans le sol et les exportations par les productions végétales, bien supérieures.

Quelles innovations durables en fumure animale ?

Des pratiques traditionnelles et des techniques fumières innovantes (chapitre 13, Ganry et Thuriès) ont été largement partagées par des générations d'agro-éleveurs et de techniciens avec les mêmes objectifs : transfert, concentration, conservation et distribution du pouvoir fertilisant des excréta. Le parage des petits ruminants

en dehors des périodes de pâturage, la stabulation des bovins affouragés à l'auge, les rotations des zones de parage dans les parcelles relèvent de ces stratégies traditionnelles de gestion qui incluent l'arbitrage de la fumure animale entre les cultures (BLANCHARD *et al.*, 2013).

L'emploi des matières fécales des différentes espèces animales est aussi souvent différencié dans les exploitations agricoles en fonction de leur assolement, de leur organisation et des contraintes de transport ; par exemple, les excréments de petits ruminants gardés près des maisons sont souvent employés pour le maraîchage, tandis que les poudrettes de parcs de bovins sont épandues sur les champs de céréales (LANDAIS *et al.*, 1991).

Des innovations peuvent donc s'appuyer sur des pratiques ancestrales et empiriques de fumure animale progressivement enrichies de référentiels techniques accumulés au fil des dernières décennies.

Pourtant, force est de constater que, malgré les investissements de recherche et d'encadrement agricole, ces pratiques évoluent lentement chez de nombreux agriculteurs africains. Tant qu'elles étaient possibles, des solutions alternatives telles que la mobilité et la rotation des parcelles cultivées restaient prioritaires dans les stratégies des producteurs (LANDAIS *et al.*, 1991). La pression sur l'espace a donc stimulé l'adoption d'innovations que l'encadrement agricole a souvent peiné à promouvoir, du fait de la charge de travail qu'elles occasionnaient sans en contrepartie assurer toujours un profit immédiat à court terme (SCHLEICH, 1986). Quand de nouveaux systèmes de fumure sont adoptés, c'est principalement sous les effets des changements contextuels, notamment de réduction des réserves foncières et de suppression des jachères, de difficulté d'accès aux intrants qui, ensemble, menacent la fertilité du sol. Depuis l'avènement des approches systémiques, plus récemment des démarches d'innovation participatives (BLANCHARD *et al.*, 2011), la question de la fumure animale est intégrée à des approches globales du fonctionnement des exploitations ; c'est le cas en particulier quand elle s'inscrit dans une trajectoire globale d'intensification avec notamment des ateliers d'embouche ou laitiers et qu'elle inclut des aménagements de terroirs par exemple avec des cultures en courbes de niveau et des plantations agroforestières. De même, avec l'intensification des productions végétales et animales sur de petites exploitations ayant des ateliers d'élevage laitier intensif l'amélioration des techniques pour agir sur la qualité des fumiers, limiter les pertes, d'azote en particulier, reste un objectif prioritaire (SALGADO *et al.*, 2012).

Les recommandations génériques doivent donc être spécifiées dans leurs contextes agricoles, en fonction des équipements nécessaires, des moyens de transport et de main-d'œuvre, du coût des matériaux. SCHLEICH en 1986 a ainsi évalué les charges de travail et de transport de la fumure animale en fonction de la distance entre le fumier et le champ. Il a aussi évalué les gains de productivité nécessaires pour justifier ces charges supplémentaires pour les exploitants : de 15 à 100 % suivant le moyen de transport, la distance entre le stock de fumier et le champ et suivant la réserve foncière.

Place de la fumure animale au cœur des perspectives agroécologiques : ses limites au plan de la fertilité minérale

D'une façon générale, les techniques de gestion de la fumure animale ont évolué depuis longtemps dans des contextes de réserves foncières importantes au niveau des parcours naturels et des jachères.

Le transfert et la concentration de la matière organique et des minéraux étaient alors la clé principale de l'efficacité de la fumure animale. Ceci pour les sols tropicaux, où, quels que soient les systèmes de production et leurs contraintes, il a été maintes fois montré que le phosphore est le principal facteur minéral limitant des cultures et des systèmes symbiotiques de fixation de l'azote. Il est aussi avec l'azote la principale cause de carences nutritionnelles du bétail (fig. 1).

Avec la densification agricole des terroirs et l'accroissement des cheptels, les espaces non cultivés contribuent de moins en moins aux systèmes fourragers. Dans ces conditions, le recyclage et la concentration à l'intérieur des espaces cultivés, y compris éventuellement dans le fumier, prennent le pas sur les transferts exogènes. La plus grande part des résidus de culture est donc mobilisée pour l'élevage ; c'est souvent aussi le cas pour les biomasses supplémentaires produites par les systèmes de semis direct sous couverture végétale (Dugué *et al.*, chap. 30).

La recherche de systèmes de culture permettant une gestion plus économe de la matière organique et de l'azote, notamment par sa fixation symbiotique, contribue aussi à une augmentation des ressources fourragères de qualité et à l'intensification animale conjointement avec celle des productions végétales.

En revanche, au plan minéral les exportations de produits agricoles ne peuvent être compensées par les transferts spatiaux (cf. ci-dessus), ni même par la solubilisation accrue du phosphore total du sol par l'incorporation de fumier ou de compost.

En effet, l'accroissement de la commercialisation des productions végétales et animales accentue encore l'exportation des minéraux, en particulier du phosphore : les quantités en jeu dans le bétail vif, le croît du bétail embouché et la production laitière (2 à 7 kg par animal et par an) sont significatifs comparativement aux stocks de phosphore disponible dans le sol (13 kg de phosphore par hectare, voir tabl. 2) et même comparativement au phosphore total candidat à la solubilisation (30 kg par hectare – ROOSE, 1981) (voir tabl. 2 et fig. 1).

Les bilans « phosphore » à l'échelle des terroirs, des parcelles et aussi des cheptels sont en conséquence de plus en plus critiques. L'intensification des systèmes mixtes agriculture-élevage par l'amplification de processus écologiques exige donc de réexaminer en priorité les bilans minéraux, en particulier aux échelles des parcelles. L'enrichissement du fumier en phosphore pour améliorer

son pouvoir fertilisant et des apports ciblés de phosphore sur les cultures ou les arbustes ayant un potentiel symbiotique sont aussi souhaitables. Pour cela, les objectifs d'intensification écologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux des régions sahélo soudaniennes devraient donc être soutenus par une révision des politiques en matière d'engrais.

Des apports d'azote et de potassium en fonction des systèmes de culture sont aussi à envisager. Il faut enfin gérer les propriétés physiques (la structure, notamment) et chimiques (pH notamment) par des amendements organiques (fumier notamment) et calciques si nécessaires (chaux, calcaire ou dolomie broyés). Les aménagements agroforestiers producteurs de matières organiques, fixateurs d'azote symbiotique et mobilisateurs des minéraux des horizons profonds du sol sont à privilégier (Harmand *et al.*, chap. 8. et Peltier *et al.*, chap. 9).

De même, les objectifs d'accroissement des productions animales, tant au plan démographique que des performances individuelles, conduisent aussi à réévaluer les bilans nutritionnels minéraux. Même si les cultures fertilisées produisent déjà des pailles enrichies en phosphore (RICHARD *et al.*, 1989), l'amélioration significative des performances de croissance-engraissement, de reproduction et de lactation nécessite aussi de relancer ou d'amplifier la complémentation minérale nutritionnelle.

Conclusions

L'utilisation de la fumure animale pour la fertilisation des champs est pratiquée par les paysans depuis fort longtemps. Divers itinéraires techniques de fabrication de poudrette améliorée ou de fumier ont été proposés par les structures de développement avec des succès limités. C'est surtout dans le cadre d'opportunités économiques pour l'élevage (l'embouche bovine ou ovine ou la production laitière), couplées avec des stratégies de gestion et d'intensification des ressources fourragères ou pour des cultures d'exportation (coton, arachide), que l'utilisation de la fumure animale s'est développée.

Les systèmes de production comprenant des activités agricoles et d'élevage sont très variés, tout comme les produits de fumure sont divers en qualité, quantité et disponibilité. Cette diversité est liée à l'espèce animale et à son mode de conduite. Elle est prise en compte pour les choix des produits de fumure dont la qualité peut être améliorée (chap. 13, Ganry et Thuriès ; SALGADO *et al.*, 2012 ; BLANCHARD *et al.*, 2013). Vu l'importance du travail pour transporter les biomasses exigées, la production de fumier doit s'inscrire dans des projets globaux d'exploitation.

Les contraintes sur l'espace et le prix des engrais minéraux s'accroissant, les nouvelles pratiques de gestion de la fumure animale gagnent cependant en pertinence aux yeux des agriculteurs-éleveurs. Mais sous l'effet de l'emprise

agricole, les parcours naturels et jachères contribuent de moins en moins aux systèmes fourragers. La biomasse végétale manque tant pour les sols cultivés que pour les animaux. De plus, l'accroissement des productions végétales et animales, par de très fortes dynamiques démographiques des cheptels destinés à la commercialisation, accroît les exportations en éléments fertilisants et le risque de dégradation de la fertilité dans ses composantes physiques et chimiques. L'optimisation de la gestion des matières organiques résiduelles des cultures et de la fumure animale ne peut plus suffire à entretenir la fertilité des sols aux plans minéral et organique.

Il faut donc réévaluer ces bilans minéraux négatifs, pour les corriger par des apports raisonnés de minéraux, particulièrement en phosphore, principal facteur de carence en agriculture et en élevage. Des apports d'azote et de potassium en fonction des systèmes de culture sont aussi à envisager. Il faut enfin gérer les propriétés physiques (structure notamment) et chimiques du sol (pH notamment) par les amendements organiques (fumier, etc.) et calciques (chaux, calcaire, dolomie broyés).

Les aménagements agroforestiers, producteurs de matière organique et d'azote symbiotique, mobilisateurs des minéraux des sols profonds, sont à privilégier. C'est donc dans des contextes de densification agricole et de productions accrues qu'il faut reconsidérer les politiques d'emploi des engrais minéraux au cœur de stratégies d'intensification écologique.

Bibliographie

- BLANCHARD M., KOUTOU M., VALL E., BOGNINI S., 2011** – Comment évaluer un processus innovant ? Le cas de l'amélioration quantitative et qualitative de la fumure organique au champ. *Rev. Elev. Med. vét. Pays Trop.*, 64, 1-4 : 61-72.
- BLANCHARD M., VAYSSIÈRES J., DUGUÉ P., VALL E., 2013** – Local technical knowledge and efficiency of organic fertilizer production in South Mali: diversity of practices. *Agroecology and sustainable Food Systems*, 37 : 672-699.
- DONGMO A., VALL E., DUGUÉ P., NJOYA A., LOSSOUARN J., 2012** – Designing a process of co-management of crop residues for forage and soil conservation in Sudano-Sahel. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36 (1) : 106-126.
- FELLER C., 1979** – Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux, à textures grossières, très pauvres en humus. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XVII (4) : 339-346.
- GIROUX M., AUDESSE P., 2004** – Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15 (2).
- GUERIN H., SALL C., FRIOT D., AHOKPÉ B., NDOYE A., 1986** – Ébauche d'une méthodologie de diagnostic de l'alimentation des ruminant domestiques dans un système agropastoral : l'exemple de Thyssé-Kaymor-Sonkorong au Sénégal *Cahiers de la recherche développement*, 9-10 : 60-69.
- GUERIN H., RICHARD D., FRIOT D., MBAYE N., KONÉ A. R. 1988** – Intérêt du dosage de la ligno-cellulose (ADF) et de différentes fractions azotées pour prévoir la valeur nutritive des fourrages

naturels sahéliens. *Reproduction, Nutrition, Développement*, 28 (1, su) (suppl.) : 111-112.

GUERIN H., RICHARD D., DUCHÉ A., LEFÈVRE P., 1990 – Composition chimique des fèces de bovins, d'ovins et de caprins exploitant des parcours naturels ou agropastoraux sahélo-soudaniens : utilisation pour estimer la valeur nutritive de leur régime. *Reproduction, Nutrition, Développement*, n. suppl. 2 : 1675-1685.

GUERIN H., HEINIS V., RICHARD D., 1991 – Composition minérale des fourrages sahéliens : conséquences pour la nutrition des ruminants domestiques. *Élevage et potentialités pastorales sahéliennes : synthèse thématique*, Maisons-Alfort, Cirad : 5-6.

LANÇON J., 1978 – Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets. *Fourrages*, 75 : 55-88 et 76 : 91-122.

LANDAIS E., LHOSTE P., GUERIN H., 1991 – « Systèmes d'élevage et transferts de fertilité ». In Piéri C. (éd.) : *Savanes d'Afrique, terres fertiles ?* Paris, France, ministère de la Coopération et du Développement : 219-270.

LECOMTE P., BOVAL M., GUERIN H., ICKOWICZ A., HUGUENIN J., LIMBOURG P., 2004 – « Carbone et élevage de ruminants ». In Roose É., De Noni G., Prat Ch., Ganry F., Bourgeon G. (éd.) : *Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone*, Bull. Réseau Érosion, IRD : 220-235.

MANLAY R., ICKOWICZ A., MASSE D., FLORET CH., RICHARD D., FELLER CH., 2003 – Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna: I. Element pools and structure of a mixed-farming system. II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural systems*, 79 (1) : 55-81 et 83-107.

MESCHY F., GUEGUEN L., 1995 – Ingestion et absorption des éléments minéraux majeurs. In Jarrige R., Ruckebusch Y., Demarquilly C., Farce M.-H., Journet M. (éd.) : *Nutrition des ruminants domestiques*, Paris, Inra Éditions : 720-758.

RICHARD D., GUERIN H., FALL S. T., 1989 – « Feeds of the dry tropics (Senegal) ». In Jarrige R. (ed.) : *Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables*, Paris, Inra : 325-346 et 370.

ROOSE É., 1981 – *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 130, 640 p.

ROOSE É., SABIR M., LAQUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols du Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

SALGADO P., RARIVOARIMANANA B., ANDRIARIMALALA J., NABENEZA S., TILLARD E., DECRUYE-NAERE V., LECOMTE PH., 2012 – *Pratiques paysannes et qualité fertilisante du fumier dans la région du Vakinankaratra et d'Amoron'i Mania Madagascar*. Programme CIEEL, 2 p.

SCHLEICH K., 1986 – Le fumier peut-il remplacer la jachère ? Possibilité d'utilisation du fumier : exemple de la savane d'Afrique occidentale. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 39 (1) : 97-102.

SVEN G. S., MORTEN L. C., THOMAS S., LARS S. J., 2013 – *Animal Manure Recycling: treatment and Management*. John Wiley & Sons, ed., 384 p.

VERMOREL M., 1995 – Productions gazeuses et thermiques résultant des fermentations digestives. In Jarrige R., Ruckebusch Y., Demarquilly C., Farce M.-H., Journet M., (éd.) : *Nutrition des ruminants domestiques*, Paris, Inra Éditions : 649-670.

Intérêt des fumiers pour restaurer la fertilité des sols en zone semi-aride d'Afrique

*Francis GANRY
Laurent THURIÈS*

Introduction

Les recherches agronomiques menées en Afrique de l'Ouest à partir des années 1950 sur la fertilisation des sols ont privilégié une approche économique visant la production maximale par l'emploi massif des engrais minéraux. Dans les années 1970, avec la crise énergétique, l'acidification des sols par les engrais, la sécheresse et l'abandon des services de l'État sous la pression de la banque mondiale, les services agronomiques ont cherché à économiser l'achat des engrais en valorisant les matières organiques disponibles localement : les résidus de culture et le fumier ou le compost. À partir des années 1990, la prise en compte de la préservation de l'environnement va modifier l'approche des agrosystèmes en développant la conservation des sols, en recherchant l'optimisation de la production, la qualité des récoltes et la protection de l'environnement.

Aujourd'hui, la recherche agronomique a clairement démontré qu'en raison des conditions pédoclimatiques qui prévalent dans ces zones, la fertilisation des sols cultivés doit combiner engrais minéraux et matières organiques riches en précurseurs des substances humiques (fumier, compost ou matières végétales riches en fibres) (PIERI, 1992). Dans les zones considérées, le fumier est la ressource la plus commune à la portée des agriculteurs. L'utilisation du fumier est en voie de développement dans les zones de culture du coton. Au Burkina, la technique

des parcs d'hivernage produisant un fumier amélioré s'est bien développée (BERGER *et al.*, 1987). La réussite de la filière cotonnière dans le Mali Sud repose en grande partie sur une stratégie de développement du fumier en milieu paysan (SANOGO, 1997). Au Sénégal, dans la zone cotonnière, on note le succès de la stabulation en Haute-Casamance (LY *et al.*, 1997). Malheureusement, malgré ces indicateurs de tendances favorables, il subsiste nombre de facteurs limitants ; en plus des problèmes de transport et de disponibilité en biomasse, la quasi-totalité des fumiers épandus ont des qualités fertilisantes et sanitaires et des qualités d'amendement médiocres. Dans ce chapitre, nous ferons d'abord un rappel des principales fonctions de la matière organique en tant que fumure et amendement ; ensuite, nous aborderons les grands types de fumier rencontrés, la façon d'évaluer leur qualité agronomique et de l'augmenter. Nous aborderons enfin les questions de la faisabilité du fumier et de l'optimisation de son mode d'application dans le système de culture intensif.

Les effets attendus d'une gestion organique des sols

Conservation de la matière organique des sols

La composition biochimique de la MO apportée au sol, des matières végétales restant sur le sol (litière agroforestière), ou des plantes de couverture, est un facteur essentiel du stockage du carbone dans le sol (THURIÈS *et al.*, 2002), ainsi que la teneur en argile qui conditionne une valeur seuil du C % du sol (FELLER, 1995). Le rapport C/N de cette MO est un indicateur nécessaire, mais pas suffisant pour caractériser cette MO. Les matériaux à C/N élevé peuvent enrichir sensiblement le sol en C pour autant que le rapport taux de fibres/contenu cellulaire (NDF/CC)² soit suffisamment élevé. À titre d'exemple, la coque d'arachide compostée et la paille de sorgho ont le même C/N, mais un NDF/CC respectivement de 28 et de 0,8. La paille de sorgho moins riche en fibres va induire, une fois incorporée au sol, une surminéralisation de la MOS et de sa fraction organo-minérale. Cela conduit à un bilan de C total largement négatif (PIERI, 1992). En deçà de la valeur seuil du C % du sol (C > 0,5 % sur sols sableux et 1,5 % sur sols argileux), la dégradation des propriétés des sols peut être importante (érosion en nappe, faible capacité de stockage en eau et nutriments) et la durabilité de la productivité végétale non assurée.

2. NDF = Neutral detergent fiber ; CC = cellular content.

Nutrition azotée des plantes

L'engrais azoté seul ne peut pallier la baisse des réserves azotées : la fumure organique doit lui être associée. En effet, dans les conditions agroécologiques de sols sableux tropicaux (la majorité des sols de l'Afrique de l'Ouest), l'effet de l'engrais azoté sur le rendement est important. Par exemple, sur mil, en station, la productivité moyenne de l'unité de N est de 17 pour une dose optimale moyenne de 110 N. Mais paradoxalement, le coefficient réel d'utilisation de N engrais (CRU) est faible, de l'ordre de 20 à 25 %. En fait, on assiste à une double action : l'engrais N favorise l'utilisation de N provenant de la minéralisation de la MO et la réorganisation de N engrais dans le sol est importante. La raison de ce paradoxe réside dans un « turnover » rapide de la MO. On observe une synergie d'action entre l'engrais N et le compost au bout de plusieurs années. Contrairement à la paille fraîche, la paille compostée enfouie augmente le *pool d'azote mobilisable* (GANRY, 1990). Ces résultats nous conduisent à affirmer que la fourniture de N (comme de P et de K) à la plante est tributaire de l'entretien organique du sol.

Fixation biologique de N₂ (FBN) par les légumineuses

Personne ne met en doute les effets bénéfiques des amendements organiques. Mais il est un mécanisme impliqué dans cette amélioration qui est souvent ignoré : c'est la stimulation de la FBN des légumineuses à graines (arachide et soja, par exemple) par les apports de fumier et de compost. Cette stimulation est d'autant plus élevée que la pluviosité est faible. La raison de cette stimulation réside dans le fait que le stress hydrique chez une légumineuse est le premier facteur limitant de sa FBN. L'accroissement de la FBN peut être spectaculaire. Sur une arachide cultivée au nord du Sénégal, les parties aériennes contiennent respectivement 11 et 63 kg N-fixé ha⁻¹ an⁻¹ sans et avec apport de fumier après 11 ans de culture (DOMMERGUES et GANRY, 1991).

Suppression des effets phytotoxiques : allélopathie et faim d'azote

La phytotoxicité se manifeste en début de culture par une inhibition de la levée des jeunes plantules. Elle est due à la présence dans le sol d'acides phénols qui apparaissent dans deux situations : après enfouissement des pailles et après certaines cultures. Dans la première situation, il importe de distinguer l'effet dépressif dû à une carence en N (« faim d'azote ») et l'effet dépressif dû à la phytotoxicité liée à la libération d'acides phénols qui est effective durant les 20 jours qui suivent l'amorce de la décomposition et disparaît par la suite (allélopathie) (GANRY *et al.*, 1978). Dans la seconde situation, la présence d'acides phénols dans le sol est due à la culture précédente, telle le sorgho. Le compostage des pailles dans la première situation et l'apport de fumier dans la seconde permettent de lever ces facteurs limitants. Les causes de l'effet phytotoxique

sont d'ordre édaphique (% argiles, activité biologique) et culturales (effet du précédent cultural). La sécheresse selon sa nature va entraîner une baisse de l'activité biologique (faible humidité sur un temps assez long) ou une stimulation de celle-ci (alternances humectation-dessiccation rapprochées) et par voie de conséquence, favoriser ou réduire la phytotoxicité, mais en tout état de cause, le compostage des pailles, directement (compost) ou *via* l'animal (fumier), est une assurance contre le risque de phytotoxicité (BURGOS *et al.*, 1980).

Capacité d'échange cationique des sols (CEC) et agent de chélation

Des travaux portant sur un ensemble de sols de l'Afrique de l'Ouest ont clairement montré que la teneur en MO du sol gouverne la CEC et que les amendements organiques compostés (dont le fumier) contribuent au maintien de la CEC du sol. Le degré d'humification des amendements organiques est donc un déterminant primordial de la CEC d'autant plus important que le sol est sableux et que la biodégradation est active (DE BOISSESON, 1988 ; GODEFROY, 1974).

La fumure organique des sols réduit la lixiviation de l'azote. Quatre raisons expliquent cet effet : (1) l'enracinement accru ; (2) une inhibition des activités uréasiques et nitrifiantes par les produits de décomposition de la lignine, notamment les quinones (FLAIG *et al.*, 1976), favorable à un étalement de la fourniture d'azote à la plante (au Sénégal, ceci a été montré de façon très nette dans des essais au champ avec un engrais organique, la N-lignine) ; (3) une adsorption plus grande de l'ammonium qui réduit le risque de volatilisation de cet élément ; (4) un retard dans la saturation de l'horizon de surface (ROOSE, 1994).

Un autre rôle de la MO est de favoriser l'absorption du fer par les plantes. La MOS joue un rôle important en favorisant la solubilisation du fer (suite à un dégagement de CO_2 = bicarbonate ferreux) et sa chélation. La plante peut alors absorber le fer sous forme ferreuse ou de chélate. Dans les sols sableux au Sénégal à faible pouvoir tampon, on attribue un rôle de chélation au fumier pour expliquer son action favorable dans la lutte contre la chlorose ferrique induite par l'irrigation (BLONDEL, 1970).

Valeur nutritionnelle des récoltes

L'engrais N augmente généralement le taux de protide des grains de céréale. Des travaux conduits au Sénégal sur le mil ont confirmé ce résultat, montrant par ailleurs que l'apport de compost en présence d'engrais N augmente ce taux de protides de + 5 à + 8 %. Mais surtout l'intérêt de ces travaux est d'avoir montré que le compost en présence d'une dose moyenne d'engrais N (50 à 100 N) accroît le taux de lysine, l'acide aminé indispensable à l'homme. Le compost stimule la fourniture de N-NO_3^- , la prolonge et favorise ainsi la formation de protéines (SIBAND et GANRY, 1976).

Structuration du sol, lutte antiérosive et développement racinaire

La MOS augmente la stabilité des agrégats et la porosité du sol favorisant ainsi : (1) l'infiltration, ce qui permet de lutter contre le ruissellement et l'érosion, (2) l'enracinement (action physique) (ROOSE, 1994). Un autre effet de la MO sur le développement racinaire est de nature biochimique, par une double action : d'une part, de libération de facteurs de croissance, et d'autre part, d'augmentation de l'absorption et de la perméabilité cellulaire (FLAIG *et al.*, 1976).

Résistance à la sécheresse des plantes

La matière organique apportée au sol favorise la résistance à la sécheresse des plantes en agissant à trois niveaux : (1) la capacité d'infiltration du sol, (2) la rétention de l'eau dans le sol, (3) l'absorption de substances actives. En ce qui concerne *la rétention de l'eau*, plus les MO sont humifiées, plus elles retiennent l'eau ; à titre d'exemple, la paille retient 250 à 260 kg d'eau/100 kg de MS et le fumier, 800-850 kg/100 kg de MS. En ce qui concerne *l'absorption de substances actives*, FLAIG *et al.* (1976) montrent clairement une influence physiologique des substances actives issues de la MO et de l'humus (notamment phénols et quinones) d'autant plus importante que les conditions environnementales (humidité en premier) du milieu-sol s'écartent de leur optimum.

Amélioration de la résistance des plantes aux maladies

Tous les facteurs de stress environnementaux accentuent les déséquilibres naturels et, en accélérant l'épuisement des réserves des plantes, augmentent la précocité des attaques. DAVET (1996) décrit bien ce phénomène en montrant que le stress hydrique engendre souvent des maladies ; par exemple, le sorgho est envahi par *Macrophina phaseolina* et ce d'autant plus que la température est élevée. On voit toute l'importance d'une fumure organique des sols qui accroît la résistance à la sécheresse de la plante, et donc renforce sa résistance à ces maladies provoquées précisément par la sécheresse. La fumure organique améliore l'état sanitaire des racines et d'une façon générale, accroît la résistance aux maladies. Plusieurs raisons expliquent cet effet des MO : l'augmentation de la teneur en substances phénoliques dans la plante (FLAIG *et al.*, 1976), la régulation de l'azote disponible, la stimulation de la microflore antagoniste et la libération de composés inhibiteurs (DAVET, 1996).

Les conditions d'une gestion organique des sols par le fumier

En zone semi-aride soudano-sahélienne, la présence simultanée d'un cheptel important et de quantités considérables de résidus de cultures représente un



a



b



c

a : contrat de fumure entre éleveurs (Peulhs) et agriculteurs (Mossi), Burkina Faso.

© IRD/É. Roose

b : parc mobile sur champs en voie de restauration, Mali Sud.

© IRD/É. Roose

c : étable au Rwanda.

© IRD/É. Roose

énorme potentiel de MO. Une gestion organique appropriée des sols par le fumier est donc possible, mais elle nécessite : (1) de faire un diagnostic de toutes les formes de fumier, (2) de disposer des outils pour leur caractérisation ou au minimum connaître les bons indicateurs, (3) de pouvoir appliquer les techniques d'amélioration de la qualité du fumier, (4) des moyens de transport et d'application au sol du fumier.

Diagnostic des principaux types de fumiers

Dans la zone sahélo-soudanienne nous distinguons en gros trois types de fumier qui sont fonction du mode de gestion du troupeau.

Poudrette ou fumier de parc traditionnel (sans litière)

En zone soudano-sahélienne, le fumier de parcage, appelé poudrette, est composé principalement des fèces mélangées au sol par le piétinement du bétail. Une partie des urines est perdue par volatilisation au soleil, lessivage par les pluies et minéralisation microbienne en absence de paille. La technique de fumure organique par parcage au champ est traditionnellement appliquée pendant la saison sèche pour la fertilisation des champs de céréales. L'intérêt de cette technique tient au fait que les transferts de fertilité du sol sont assurés par les animaux à travers les déjections (fèces et urines) durant les temps de séjour qui sont couramment de 14 heures sur 24 heures. Le poids de fèces déposé est de l'ordre de 600 kg de MS de fèces par UBT et par an (SONKO, 1986). Pour établir ces valeurs, l'auteur retient la norme moyenne suivante : l'UBT (unité de bétail tropical, d'un poids standard de 250 kg vifs) qui ingère environ 2 300 kg de fourrage MS par an (soit 6,25 kg/jour) excrète environ 1 000 kg de MS par an. Ces quantités de fèces excrétées varient avec la saison. Les 1 300 kg restant assurent le bilan énergétique (émission de CO_2 et NH_4), la dynamique des constituants de la carcasse et des muscles, la production de lait. Ce système a longtemps permis de valoriser les déjections animales des troupeaux transhumants par le biais des « contrats de fumure » traditionnels passés entre les agriculteurs sédentaires et les pasteurs venus pour la saison sèche. Au Niger, l'Icrisat a montré que ce système permet d'obtenir des rendements en mil de l'ordre de 700 à 800 kg/ha ; le bilan minéral net « sol-plante » est alors positif pour N, mais déficitaire pour P (BROUWER et BOUMA, 1997).

En zone plus humide, en zone cotonnière notamment, la terre de parc est utilisée comme fertilisant. C'est le cas en culture attelée au Sud-Tchad, où la terre de parc produite par une dizaine d'UBT peut fertiliser une surface de 4 ha à raison de 3 t $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ apportant ainsi : 30 N, 20 P_2O_5 et 48 K_2O (RICHARD et DJOULET, 1985).

Le fumier de parc avec litière

La qualité des fumiers de parc est largement accrue par l'adjonction de paille en couches successives en saison sèche, suivie d'une fermentation en saison des pluies (LANDAIS *et al.*, 1991). La rétention des urines par le substrat organique



a



b

a : parc de protection des chèvres sans litière, Mali sud.

© IRD/É. Roose

*b : compostière villageoise où sont collectés les fécès des animaux en liberté
et les déchets ménagers, Burkina Faso.*

© IRD/É. Roose

réduit les risques de volatilisation de l'azote de l'urine qui sont élevés en sols sableux, notamment lors d'un apport d'urée (GANRY, 1990).

Ce système de parage des bovins est surtout développé dans les zones cotonnières, appelé « parcs d'hivernage » au Burkina ou « stabulation saisonnière » au Mali. Au Mali-Sud, on a montré que la stabulation saisonnière a un double avantage : elle augmente la production de fumier et elle diminue temporairement la charge des parcours, permettant ainsi une charge supérieure en saison des pluies ; avec ce type de conduite du troupeau, les pourcentages moyens de terres cultivées (40 %) et de terres en jachère (13 %), et la charge animale moyenne (50 UBT/km²) restent sensiblement les mêmes, mais le solde du bilan fourrager est supérieur (BOSMA *et al.*, 1993). Par contre, poudrettes et fumier de parc sont chargés en sable et de mauvaise qualité fertilisante et sanitaire (HAMON, 1972).

Le fumier d'étable composté

Le principe de l'étable fumièr est l'utilisation continue des déchets végétaux, des déjections et du piétinement des animaux pour transformer et enrichir des résidus de culture apportés en litière. L'étable fumièr est située en général près des bâtiments de l'exploitation. Elle concerne uniquement le bétail en stabulation permanente ou semi-permanente : bétail de trait, à l'embouche, laitier ou en bas-âge (BERGER, 1996).

À titre d'exemple, nous prendrons deux types de fumiers de bovins produits en étable, selon les matières végétales apportées (tabl. 1) :

- fumier 1 : pailles de mil et de sorgho et résidus de battage, produits chez un agriculteur ;
- fumier 2 : foin de jachère, produit en stabulation entravée et mis en tas.

La valeur fertilisante de ces fumiers est comparée aux moyennes des poudrettes et des fumiers avec litière en Afrique soudano-sahélienne (ROOSE *et al.*, 2010).

Tableau 1

*Composition minérale de deux fumiers compostés (non contaminés par la terre), produits en stabulation et qui diffèrent selon la composition de la litière. Comparaison avec les valeurs médianes observées en zone soudano-sahélienne de poudrette pauvre et de fumier avec litière sur parc (ROOSE *et al.*, 2010).*

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	----- %MS -----				
Fumier 1	2,5	0,53	1,76	2,60	1,35
Fumier 2	2,0	1,28	2,42	4,90	1,82
Poudrette Pauvre	1,2	0,6	0,6	0,9	0,6
Fumier avec litière	2,0	0,8	1,8	2,4	1,3

Le fumier de foin de jachère est plus riche en P et Ca, mais plus pauvre en N ; inversement, le fumier de paille de mil et sorgho est plus riche en N (augmentation de l'accumulation de N_2 sous l'action des pailles), mais plus pauvre en P et K. On peut expliquer ce dernier résultat par la richesse initiale en P, K et Ca du foin (effet améliorant de la jachère qui a fourni le foin), supérieure à celle des pailles de mil et sorgho, lesquelles pailles sont produites en milieu paysan, donc vraisemblablement sans fertilisation minérale. Les valeurs médianes observées sur des fumiers sur parc sont généralement plus faibles que les fumiers compostés, mais il faudrait comparer les volumes de fumier produits et le coût des opérations de compostage et de transport pour fournir des arguments convainquant les paysans.

Caractérisation de la qualité des fumiers

La caractérisation de la qualité du fumier repose sur l'analyse chimique d'échantillons. À défaut d'analyses (souvent difficiles à réaliser dans les régions concernées), on peut recourir à une estimation de la qualité du fumier sur la base d'indicateurs. La procédure d'échantillonnage en vue de l'analyse chimique doit être rigoureuse en raison de l'hétérogénéité du fumier.

Analyse chimique

- **Humidité** : exprimer l'humidité par rapport au poids frais ou à la matière sèche, mais le préciser.
- **Valeur fertilisante** : analyser au minimum N, P et K totaux et exprimer les résultats en unité fertilisantes N, P_2O_5 et K_2O , par rapport au poids MS totale ; évaluer les cations et leur capacité à remonter le pH du sol.
- **Valeur amendante organique** : analyser le C total et le C des matières humiques totales (MHT) (BROSSARD *et al.*, 1981) pour déterminer le C/N et évaluer le degré d'humification. Si possible, évaluer le coefficient isohumique k_1 (HÉNIN et DUPUIS, 1945), ou à défaut puisque la mesure de k_1 requiert des expérimentations longues et coûteuses, analyser les fractions organiques pour calculer un indice de stabilité de la matière organique, l'Ismo (LASHERMES *et al.*, 2009) rapidement accessible et normalisé (Afnor, 2009) (THURIÈS et HOUOT, 2010). Ces indices rendent compte de l'aptitude des fertilisants organiques à induire une « surminéralisation » de la MO du sol (phénomène à éviter) ou inversement, à apporter des précurseurs de substances humiques (phénomène à favoriser).
- **Pourcentage de terre** : on peut analyser le pourcentage de terre dans le fumier de la façon suivante : partant de la teneur en cendres insolubles (SiO_2), en sachant que les pailles contiennent environ 7 % de SiO_2 et une déjection de bovin d'environ 6 %, on peut estimer le pourcentage d'apport de terre dans le fumier et éventuellement expliquer par là les faibles teneurs en éléments fertilisants dans les fumiers traditionnels. Si la teneur en silice d'un fumier est de S %, le % de terre estimé, dans ce fumier, sera de S-7 pour un fumier paillieux et S-6 pour un fumier faiblement paillieux.

Indicateurs de valeur fertilisante et de production du fumier

– **Valeur fertilisante** (HAMON, 1972). Prenons le cas d'un fumier frais (45 % MS) produit en stabulation en saison des pluies, avec apport hebdomadaire de paille, fumier incluant 35 % de terre humifère (la terre humifère correspond, dans la fosse fumièrre ou dans la stabulation, à la dernière couche de fumier en contact avec le sol). 5 t/ha tous les 2 ans (dose réaliste en zone soudano-sahélienne) apporte environ : 30 kg N, 10 kg de P_2O_5 , 35 kg de K_2O . Comparativement, la fumure minérale faible « Mil » vulgarisée (150 kg/ha/an d'engrais ternaire 14-7-7) apporte chaque année : 21 N, 10 P_2O_5 et 10 K_2O . Sur des fumiers du Burkina, BERGER (1996) trouve des valeurs médianes sensiblement égales : 23 N, 8 P_2O_5 et 34 K_2O . Pour évaluer le taux de satisfaction des besoins en N, P et K d'une culture, voici à titre d'exemple l'exportation minérale d'un mil « variété locale » au Mali, exprimée par hectare et par tonne de produit récolté : 30 kg N, 10 kg P_2O_5 et 56 kg K_2O dont respectivement 18, 7 et 6 exportés par les grains (PIERI, 1992).

– **Coefficient de transformation paille → fumier**. Partant de la relation linéaire : $Fumier\ MS = k\ Paille\ MS$, et sur la base des travaux de HAMON (1972) au Sénégal et de BERGER (1996) au Burkina, nous établissons un intervalle de grandeur pour k : $1,5 < k < 1,7$, ce qui signifie que 100 kg MS de pailles ajoutées aux déjections contribuent à produire entre 150 et 170 kg MS de fumier.

– **Rendement (R) en fumier par UBT** : R exprimé en t MS fumier UBT⁻¹

Stabulation : R = 0,65 (HAMON, 1972) ; R = 0,50 (FERNANDEZ-RIVIERA, 1995)

Parcs d'hivernage : R = 1,20 (BERGER, 1996). Ceci signifie que 1 vache produit en stabulation 650 kg MS de fumier et dans un parc d'hivernage, 1 200 kg MS de fumier.

Amélioration de la qualité agronomique du fumier

L'amélioration de la qualité agronomique du fumier repose sur cinq types d'action : (1) constituer une litière sous les animaux riches en matière végétale cellulosique (paille notamment) et si possible riches en lignine, comme par exemple les ramilles de haies ; (2) créer les conditions pour le compostage (notamment l'apport d'eau) qui a deux fonctions importantes : (a) éliminer les pathogènes (fermentation → phase exothermique → effet létal sur graines adventices et les germes pathogènes, comme par exemple les oospores et zoospores de *Sclerospora* chez le mil), (b) induire une réorganisation de N minéral suite à l'apport de paille, qui enrichit le fumier en N ; (3) enrichir le fumier en P par l'incorporation de phosphates naturels pulvérisés (transformation active du P et Ca minéral du phosphate tricalcique en formes assimilables) ; (4) apporter des ferments humigènes, en l'espèce une couche de fumier naturel déjà composté pour accélérer le départ de la fermentation et fournir à ces ferments de l'engrais azoté, ou à défaut d'engrais, une matière végétale de légumineuse herbacée (paille) ou arbustive (feuilles et ramilles vertes) ; (5) recycler les purins ou effluents dans le fumier. Les actions (1) et (2) sont obligatoires ; les (3), (4) et (5) sont recommandées.

Optimisation du mode d'apport du fumier

L'optimisation du mode d'apport du fumier se situe à deux niveaux : comment apporter le fumier au sol (enfoui par labour, en surface), et à quel moment l'apporter dans la rotation appliquée au système de culture.

Enfoui, en surface, en poquet ou sur billons ?

Des études menées en Afrique, notamment au Nigeria, ont montré que l'aération liée au labour du sol induit une accélération de la minéralisation de la MO (LAL, 1997). Mais en dehors de certaines pratiques telles que le *radou baligne* dans le Sine Saloum au Sénégal sur arachide (apport localisé du fumier sur la ligne de semis, enfoui grâce à un sarclo-buttage de pré-levé) (SÈNE, 1995), l'enfouissement dans la majorité des cas se fait par labour.

La MO laissée en surface présente avantages et inconvénients en fonction de la zone écologique : sur sol en pente (même $< 1\%$), elle réduit les risques d'érosion du sol et augmente le stockage du carbone dans l'horizon superficiel du fait de l'absence de labour, mais, apportée en surface, elle favorise un enracinement superficiel qui accroît le risque de stress hydrique de la plante en cas de sécheresse (GANRY et GUIRAUD, 1979), ce qui fait dire parfois aux paysans que « le fumier brûle l'arachide ». L'apport du fumier en poquet est surtout réalisé dans la technique du zaï (au Burkina) ou massa (Niger), technique traditionnelle de réhabilitation des terres dans la zone soudano-sahélienne (ROOSE, 1994).

À quel moment ou sur quelle culture apporter le fumier ?

Prenons l'exemple de la rotation cotonnier-sorgho fondée sur l'intégration « élevage-agriculture » au Sud-Mali. Les sociétés de développement recommandent d'apporter l'urée et le fumier sur le cotonnier. La recherche a montré que l'apport d'urée sur le sorgho au lieu du cotonnier engendrait un accroissement du rendement en grain du sorgho ($1,9$ vs $1,3 \text{ t ha}^{-1}$), un maintien du rendement en coton, un équilibre du bilan N, et ce grâce à l'apport plus important de pailles, donc de fumier de $+ 2,5 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le système optimisé crée donc les conditions du maintien de la fertilité azotée du sol, mais à condition que l'approvisionnement en fourrage soit suffisant. Ce fourrage provient traditionnellement des pâturages naturels, mais de plus en plus l'agriculteur doit recourir au développement de la *jachère améliorée* et son exploitation sélective par pâture (SANOGO, 1997) et à la plantation de légumineuses arbustives : là réside la clef de l'intensification.

Fumier et systèmes de culture sur couverture Végétale (SCV)

Au cœur de l'agriculture « durable », les SCV connaissent, en Afrique de l'Ouest et du Centre, des formes et des succès variables selon les contextes biophysiques et socio-économiques. Ce sont principalement les sociétés cotonnières qui font la promotion de cette innovation agroécologique pour la conduite de la rotation céréale/coton (DUGUÉ *et al.*, 2012).

Pourquoi les SCV dans des zones d'élevage productrices de fumier ?

La zone soudano-sahélienne se caractérise par la juxtaposition des activités agricoles et pastorales sur les mêmes territoires. Cette cohabitation se traduit par une concurrence pour l'utilisation des ressources agropastorales (foncier agricole et pastoral, herbes de brousses, résidus de cultures, fumure animale, etc.) plutôt que par une gestion concertée de ces ressources (DONGMO, 2009). Cet auteur distingue trois groupes d'unités de production en fonction du rapport « UBT disponibles/ha cultivés » : les éleveurs dont le rapport se situe entre 10 et 34, les agriculteurs dont le rapport est inférieur à 1, les agriculteurs détenteurs de bovins ou de petits ruminants, dont le rapport est faible (1 à 10). Chez les agriculteurs, contrairement aux éleveurs, la baisse de fertilité des sols est devenue préoccupante. Elle est liée à la très faible restitution de la matière organique (notamment par le parage des animaux), d'où le choix des sociétés cotonnières de développer les SCV dans le groupe des agriculteurs. Mais cela entraîne une interdiction de la vaine pâture sur les parcelles concernées afin de protéger la couverture permanente du sol, interdiction qui pose problème du fait que la diffusion des SCV à l'échelle du terroir ne doit pas se faire en excluant l'élevage, mais en recherchant son intégration (DONGMO, 2009).

Pour résoudre cette difficulté, les projets actuels travaillent à l'accroissement de production de biomasses fourragères dans certaines parties des terroirs afin de compenser le manque à gagner pour le bétail lié à l'interdiction de la vaine pâture sur les parties dédiées aux SCV (DUGUÉ *et al.*, 2012). Notons enfin les autres difficultés liées aux SCV, généralement peu abordées, à savoir : les feux de brousse, l'utilisation d'herbicides pour tuer la couverture vivante, l'impossibilité d'enfouir du fumier, le risque d'allélopathie avec une couverture de paille de sorgho et le manque de paille pour nourrir le bétail (priorité) et couvrir suffisamment le sol nécessitant alors un transport de paille.

Conclusions

Améliorer la production du fumier en quantité et en qualité pour maintenir ou restaurer la productivité des terres est un objectif prioritaire de l'agriculture durable qui ne peut être atteint que sous certaines conditions. La Recherche-Développement dispose d'un certain nombre d'outils capables d'atteindre cet objectif. C'est en se fondant sur cette idée que nous souhaiterions faire passer les cinq messages suivants.

(1) Promouvoir la production du fumier en zone semi-aride d'Afrique nécessite une augmentation de la production de biomasse fourragère tropicale.

(2) Par effet de synergie avec l'engrais minéral et par effet de transfert de fertilité opéré par les animaux, le fumier « économise » l'engrais minéral mais excepté dans de rares cas, il ne peut être considéré comme un substitut à l'engrais minéral ; un de ces cas est le fumier enrichi en phosphate naturel produit dans le cadre d'un système de culture avec une légumineuse dont les pailles sont recyclées *via* l'animal à travers le fumier.

(3) En zone semi-aride, le fumier composté, apporté régulièrement et incorporé au sol, réduit le risque de manque d'eau des cultures. Malheureusement, en situation de sécheresse récurrente, les systèmes entrent dans une spirale « infernale » : la sécheresse entraîne la baisse des ressources en biomasse végétale qui entraîne la baisse des apports organiques au sol qui entraîne la baisse de la fertilité des sols, et cette dernière entraîne une baisse des ressources organiques. Pour rompre cette spirale, il faut développer d'une part, une gestion intégrée fondée sur l'élevage, l'agroforesterie (les haies, les jachères courtes de légumineuses, les parcs arborés), l'aménagement des parcelles (les cordons pierreux), le phosphatage des fumiers ou des terres, et d'autre part, développer la valorisation agricole de tous les déchets ou sous-produits organiques qui s'accumulent à proximité des zones cultivées (déchets ménagers, urbains et industriels).

(4) Le compostage, grâce à sa phase exothermique, détruit les graines d'adventices et les germes pathogènes ; il conduit de ce fait au même résultat d'assainissement que le brûlage des pailles, mais en conservant une partie des résidus de culture : l'agriculteur est donc doublement gagnant, mais il augmente beaucoup son travail.

(5) Le fumier améliore les récoltes en quantité (rendement), mais aussi en qualité (valeur nutritionnelle). L'amélioration du taux de lysine est un résultat essentiel.

Dans un contexte écologique et sociologique où sécheresse et malnutrition menacent le Sahel, on voit toute l'importance prise par une intensification de la production de fumier et par son utilisation rationnelle.

Bibliographie

- AFNOR, 2009** – *XP U 44-162 - Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique - Soil improvers and growing media - Characterization of organic matter by biochemical fractioning and estimation of its biological stability*. Saint Denis la Plaine, Afnor (éd.), 19 p.
- BERGER M., BELEM P.C., DAKOUO D., HIEN V., 1987** – Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina-Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Cot. Fibr. Trop.*, 42, 201-207.
- BERGER M., 1996** – L'utilisation de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. *Agriculture et Développement*, N° hors série, 52 p.
- BLONDEL D., 1970** – Induction d'une chlorose ferrique en sol sableux (dior) par des eaux d'irrigation calcomagnésiennes. *Agron. Trop.*, 25 : 555-560.
- BOSMA R., BENGALI M., DEFOER T., 1993** – « Pour un système durable de production : augmenter le bétail. Rôle des ruminants au Mali-Sud, dans le maintien du taux de matière organique des sols ». In : *Élevage et cycle viable des éléments nutritifs dans les systèmes mixtes agriculture-élevage de l'Afrique subsaharienne*, conférence internationale Cipea/Ilca, 22-26 nov. 1993, Addis Abeba, Éthiopie, 12 p.
- BROSSARD M., BALESDENT J., FELLER C., PLENECASSAGNE A., TURENNE J. F., 1981** – Étude de la matière organique des sols par fractionnement granulométrique. Décomposition au champ d'un compost enfoui dans plusieurs types de sols des Antilles. *Proceedings of the Caribbea Food Crops Society*, 20 : 68-73.
- BROUWER M., BOUMA J., 1997** – La variabilité du sol et de la croissance des cultures au Sahel : points saillants de la recherche (1990-1995) au centre sahélien de l'Icrisat. *Bull. d'information*, 49 : 21-26, Patencheru, Inde ; Wageningen, Pays-Bas, Icrisat et Landbouwniversiteit (éd.).
- BURGOS L.-W., GANRY F., NICOU R., CHOPART J.-L., DOMMERGES Y., 1980** – Un cas de fatigue des sols induite par la culture du sorgho. *Agron. Trop.*, 25 : 319-334.
- CISSÉ L., VACHAUD G., 1987** – Une méthode simplifiée d'estimation *in situ* de l'extraction de l'eau par les racines. *Agron. Trop.*, 42 : 241-247.
- DAVET P., 1996** – *Vie microbienne du sol et production végétale*. Paris, Inra Éditions, 382 p.
- DE BOISSESON P., 1988** – Effet de l'enfouissement de pailles de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limon des plateaux. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 24 (4) : 337-339.
- DE ROUW A., 1998** – Fumure animale, matière organique et encroûtement superficiel du sol dans les systèmes de culture de mil, étude au Niger. *Agriculture et Développement*, 18 : 63-73.
- DOMMERGES Y., GANRY F., 1991** – Valorisation de la fixation de N₂ à la ferme. *Savanes d'Afrique, terres fertiles*, Montpellier, Cirad (éd.) : 332-346.
- DONGMO A. L., 2009** – *Territoires, troupeaux et biomasses : enjeux de gestion pour un usage durable des ressources au Nord-Cameroun*. Thèse doct., Agro-Paristech, 237 p.
- DUGUÉ P., AUTFRAY P., BLANCHARD M., DJAMEN P., DONGMO A. L., GIRARD P., OLINA J. P., SISSOKO F., VALL E., 2012** – « L'agroécologie pour l'agriculture familiale dans les pays du Sud : impasse ou voie d'avenir ? Le cas des zones de savane cotonnière de l'Afrique de l'Ouest et du Centre ». Colloque René Dumont revisité et les politiques agricoles africaines, 15 et 16 novembre 2012, Nogent-sur-Marne, France, 23 p.
- FELLER C., 1995** – La matière organique du sol, un indicateur de la fertilité : application aux zones sahéliennes et soudaniennes. *Agriculture et Développement*, 8 : 35-41.
- FERNANDEZ-RIVIERA S., WILLIAMS T. O., HIERNAUX P., POWELL J. M., 1995** – « Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi-arid West Africa ». In Powell J. M., Fernandez-Rivera S., Williams T. O., Renard C. (eds) : *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa* : 149-170, volume II : Technical Papers, Proceedings International Conference, 22-26 Novembre 1993, IICA, Addis-Abeba, Éthiopie.

- FLAIG W., NAGAR B. R., SÖCHTIG H., TIETJEN C., 1976** – Soil organic matter and soil productivity. *Soils Bulletin*, Rome, FAO, 200 p.
- GANRY F., 1990** – *Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche*. Thèse doct., univ. de Nancy I, 355 p.
- GANRY F., ROGER P. A., DOMMERGUES Y., 1978** – À propos de l'enfouissement des pailles dans les sols sableux tropicaux. *C. R. Acad. Agri. Fr.*, 6 : 445-454.
- GANRY F., GUIRAUD G., 1979** – « Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil-sol sableux au Sénégal. Étude au moyen de ^{15}N ». In International Atomic Energy Agency (ed.) : *Isotopes and Radiation in research on soil-plant relationship*. AIEA-SM. 235/16, Vienna : 313-331.
- GANRY F., SANOGO J.-L., GIGOU J., OLIVER R., 2000** – « Intensification du système cotonnier-sorgho au Mali-Sud fondée sur le fumier et la gestion optimale de la fertilisation ». In Floret C., Pontanier G. (éd.) : *La Jachère en Afrique tropicale, rôle, aménagement, alternatives*, Paris, John Libbey Eurotext : 142-148.
- GANRY F., FELLER C., HARMAND J.-M., GUIBERT H., 2001** – The management of soil organic matter in semi-arid Africa for annual cropping systems. *Nutrient Cycling In Agroecosystem*, 61 (1-2) : 103-118.
- GANRY F., BARTHÈS B., GIGOU J., 2011** – « Les défis du maintien de la fertilité des sols tropicaux ; cas de l'Afrique de l'Ouest ». In Girard M. C. (éd.) : *Environnement et sols*, Paris, Dunod, 816 p.
- GODEFROY J., 1974** – *Évolution de la matière organique du sol sous culture du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique*. Thèse doct. Ing. Ensam Montpellier, France, 207 p. + annexes.
- HAMON R., 1972** – L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche. *Agron. Trop.*, 27 : 592-607.
- HÉNIN S., DUPUIS M., 1945** – Essai de bilan de la matière organique du sol. *Agron. Trop.*, 1 : 16-27.
- HIERNAUX P., FERNANDEZ-RIVERA S., DE SCHLECHTE E., TURNER M. D., WILLIAMS T. O., 1997** – « Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems ». In Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M. (eds) : *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems*, Margraf Verlag, Weikersheim, Germany : 339-347.
- LAL R., 1997** – Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria crop yield and soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 42 (3) : 145-160.
- LANDAIS E., LHOSTE E., GUERIN H., 1991** – « Systèmes d'élevage et transferts de fertilité ». In Pieri C. (éd.) : *Savanes d'Afrique, terres fertiles ?*, Montpellier, Cirad et Mini. Coop : 219-220.
- LASHERMES G., NICOLARDOT B., PARNAUDEAU V., THURIÈS L., CHAUSSOD R., GUILLOTIN M. L., LINÈRES M., MARY B., METZGER L., MORVAN T., TRICAUD A., VILLETTE C., HOUOT S., 2009** – Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60 : 297-310.
- LHOSTE P., 1986** – L'association agriculture-élevage. Évolution du système agropastoral au Siné-Saloum (Sénégal). *Collection Études et Synthèses de l'IEMVT 21*, IEMVT-Cirad, 314 p.
- LY C., DIAW A., FAYE A., 1997** – Étables fumières et production laitière au Sénégal. *Cahiers Agricultures*, 6 : 651-659.
- PIERI C., 1992** – *Fertility of Soils. A future for farming in the West African Savannah*. Berlin, Springer-Verlag, 348 p.
- RICHARD L., DJOULET D., 1985** – La fertilité des sols et son évolution. Zone cotonnière du Tchad. *Coton et Fibres Tropicales, série Document, Études et Synthèse*, 6, 21 p.
- ROOSE É., 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, 70, 420 p.
- ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2010** – « Les transferts de nutriments par le fumier et le parcage ». In : *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc*, Marseille, IRD Éditions : 267-275.
- SANOGO J.-L., 1997** – *Maîtrise de l'azote dans un système cotonnier-sorgho : prévision de la fumure organique et azotée en zone Mali-Sud*. Thèse doct., Ensam, Montpellier, 72 p. + ann.
- SÈNE M., 1995** – *Influence de l'état hydrique et du comportement mécanique du sol sur l'implantation et la fructification de l'arachide*. Thèse doct., Ensam, Montpellier, 127 p.

SIBAND P., GANRY F., 1976 – « Application de l'analyse d'extraits de tissus conducteurs à l'étude de l'effet d'un compost sur une culture de mil ». Proc. of 4th International Colloquium on the control of plant nutrition, Gent (Belgique), Belgique, Rijksuniversiteit (ed.), vol. 1.

SONKO M. L., 1986 – « Méthodologie de l'étude des pratiques traditionnelles de fumure animale. L'exemple de la démarche adoptée par l'Isra en Basse Casamance ». In Landais E., Faye J. (éd.) : *Méthodes pour la recherche sur les systèmes d'élevage en Afrique intertropicale*, actes de l'atelier ISM de Mbour, Sénégal, 2-8 février 1986,

Maisons-Alfort, IEMVT-Cirad : 413-428 (Études et synthèses de l'IEMVT, 20).

THURIÈS L., PANSU M., LARRÉ-LARROUY M., FELLER C., 2002 – Biochemical composition and mineralization kinetics of organic inputs in a sandy soil. *Soil biology and biochemistry*, 34 (2) : 239-250.

THURIÈS L., HOUOT S., 2010 – Indicateurs d'état et de prévision de la dynamique de transformation des apports organiques. In : <http://uved-matorg.cirad.fr> Module de formation, cours No 5, université virtuelle Environnement et Développement durable (Uved), Rennes.

Restauration des sols cultivés mais dégradation des parcours par l'élevage au Maroc

Mohamed SABIR

Éric ROOSE

Problématique

Au Maroc, l'élevage constitue un secteur économique important pour la société rurale et l'environnement (SRAÏRI, 2011). Le troupeau sert de caisse d'épargne. Il produit lait, viande et cuir et surtout le fumier, souvent le seul engrais à la portée des petits paysans. Du point de vue des éleveurs, « plus les animaux sont nombreux, plus le fumier est abondant et par conséquent, plus on peut restaurer la fertilité des sols ». Cet adage n'est vrai que si on dispose de suffisamment de fourrage. La fumure est utilisée intensément quand la pression foncière est élevée. L'importance de la matière organique dans les sols n'est plus à démontrer dans l'amélioration des caractéristiques des sols à différents niveaux, en l'occurrence la stabilité de la structure, la porosité, l'infiltration, la rétention et l'économie en eau, et la fertilité chimique (MOREL, 1989 ; BARTHÈS *et al.*, 1999 ; ROOSE et BARTHÈS, 2006).

La majorité des paysans sont trop pauvres pour acheter assez d'engrais minéraux pour intensifier la productivité de toutes leurs terres : ils ne disposent que de la biomasse produite sur leurs champs, sur les jachères, sur les bords des routes et les forêts que parcourent leurs troupeaux (transfert de fertilité) (ROOSE *et al.*, 1999). Cependant, 40 à 60 % du carbone et des nutriments des végétaux pâturés sont piégés dans les animaux (viande et os) ou évacués dans l'air (CO₂, N₂, NH₄) et ne retournent donc pas dans le sol (SAUVANT, 2005). En outre, la

biomasse disponible pour le fumier ne fournit que 10 à 30 % de la fumure organique qu'il serait nécessaire d'épandre pour maintenir le taux de carbone du sol (COMPOSTING, 2008).

En outre, le pâturage entraîne un certain nombre d'effets secondaires sur le milieu (BOUTRAIS, 2000). Les prélèvements et le piétinement animal réduisent la couverture végétale et sa diversité (SABIR *et al.*, 1992), tassent la surface des sols en surface (< 2 cm), augmentent le ruissellement et exportent une partie des nutriments de la biomasse. SABIR (1994) et SABIR *et al.* (1996) ont montré que le surpâturage (2 fois la charge d'équilibre) dans un milieu steppique durant deux années a réduit la capacité d'infiltration d'un sol à texture équilibré de 60 % et la couverture végétale de 35 à 16 %. Pour minimiser ces effets secondaires et mieux conserver la végétation et le sol, les paysans ont développé plusieurs techniques de gestion des parcours. La mise en défens temporaire (agdal) et la rotation saisonnière et spatiale de la circulation des troupeaux (transhumance entre la montagne, jbel et la plaine, azaghar) sont des techniques très efficaces pour le maintien d'un certain équilibre entre les ressources et les prélèvements.

Dans ce chapitre, se poseront deux questions :

- dans quelle mesure l'élevage contribue-t-il à la dégradation des sols, à l'érosion, mais aussi à la conservation de leur fertilité ?
- y a-t-il des pratiques paysannes visant la gestion durable de la fertilité des sols cultivés à travers le transfert de fertilité des parcours par le troupeau ?

Le milieu

Au Maroc (71,1 Mha), les terrains de parcours couvrent 92 % de la superficie totale. Près de 97 % de ces parcours se trouvent en zones arides et semi-arides (Oriental, Pré-Sahara, Sahara). Ils sont constitués des zones steppiques (Alfa, armoises), sahariennes (Acacia), semi-arides (arganier, thuya, plaines agricoles) et montagnardes plus humides (forêts de chênes verts, chênes-lièges, cèdres) (QARRO, 2006).

L'élevage est une source de revenus importante pour la population rurale et également le meilleur moyen pour valoriser les zones pastorales. Il génère 3,5 milliards d'euros par an, représentant plus de 44 % du chiffre d'affaires agricole. Il contribue fortement au développement économique du pays à travers la création d'emplois. Plus de 2,5 millions de personnes travaillent dans la filière animale (MAPM, 2004). Le secteur de l'élevage constitue un patrimoine animal important, avec 24 millions de têtes dont 17,5 millions d'ovins, 5,5 millions de caprins, 2,7 millions de bovins, 180 000 de camélins, 160 000 de chevaux, ainsi qu'un secteur avicole extrêmement développé. En outre, le savoir-faire des

professionnels et la diversité des ressources génétiques, représentée par des races adaptées avec les conditions de l'environnement, constituent un atout majeur pour ce secteur (BENLEKHAL, 2013).



Le fumier est concentré au pied des oliviers à proximité des étables, Rif, Maroc.

© IRD/É. Roose

Le système pastoral extensif

C'est un système dans lequel dominent les parcours naturels (steppiques) qui représentent la principale ressource alimentaire du cheptel. Ils apportent plus de la moitié des besoins annuels des animaux. La complémentation des animaux par les céréales et les sous-produits agricoles reste très limitée et la place des fourrages est quasiment nulle. La contribution des chaumes et des pailles est substantielle après celle des parcours. Ce système est rencontré essentiellement dans les hauts plateaux de l'Oriental, le versant sud du Haut Atlas et les zones sahariennes et présahariennes.

Le système agropastoral semi-intensif

Il se distingue par une contribution importante de l'exploitation agricole à l'affouragement du troupeau (paille, chaumes, orge). Ce système est rencontré dans les grandes régions céréalières (bour) et dans les périmètres irrigués. Les animaux pâturent la journée et rentrent à l'étable le soir. Ce système est localisé dans les régions péri-forestières du Tangérois, de la Maâmora et du Rif et dans les régions d'Elbrouj, Rhamna et Haouz au centre du pays.

Le système sylvo-pastoral extensif

Il se distingue par une contribution importante des ressources forestières, notamment durant les périodes hivernales. Il correspond aux régions où dominent les parcours forestiers. Ces parcours supportent les troupeaux, notamment caprins



*a : surpâturage par moutons et chèvres dans l'Atlas algérien
entraînant la disparition progressive du matorral.*

© IRD/É. Roose

b : dégradation du couvert végétal due au broutage des moutons dans le Moyen Atlas du Maroc.

© IRD/M. Sabir

On distingue plusieurs systèmes d'élevage pastoraux.

et ovins pendant 6 à 12 mois par an en fonction de l'importance de l'espace forestier, et apportent plus de la moitié des besoins des animaux. Les parcs et les écuries des animaux sont souvent localisés au sein de l'exploitation agricole. Le système sylvo-pastoral est rencontré essentiellement dans les écosystèmes forestiers, à savoir le Haut et le Moyen Atlas, le Rif et l'arganeraie.

Pertes et besoins en matières organiques des sols marocains

Pour les zones irriguées, le périmètre des Doukkala peut être pris comme exemple. Les taux annuels de perte de matière organique stable (humus) par minéralisation dans les Doukkala varient de 1,9 à 3,3 %. Ces valeurs permettent de quantifier la matière organique fraîche qui aurait été apportée ou restituée au sol pour éviter les déperditions observées. En effet, sur la base d'une profondeur de 25 cm et une densité de 1,3 g/cm³, la teneur en MO est d'environ 1,2 %, d'où une quantité de 39 tonnes/hectare. Les pertes annuelles en MO sont estimées à 2,6 %, soit une perte d'une tonne par hectare et par an, particulièrement en humus stable. Ces pertes peuvent être supérieures pour les cultures légumières (SOUDI *et al.*, 2000 ; NAMAN *et al.*, 2001).

Dans les zones pluviales (Bours), les pertes en MO sont de 0,65 t/ha/an. Dans ces zones, les paysans utilisent principalement le fumier à la fois comme engrais pour la production agricole et comme amendement carboné du sol. Les doses appliquées sont de 20 t/ha une année sur trois sur les cultures (céréales, fourrages, arboriculture). Étant donné que les teneurs en MO sèches dans les fumiers des bovins ou des ovins sont généralement comprises entre 12 et 30 %, l'apport annuel en MO dans ces zones peut être estimé en moyenne à 1,3 t/ha. Contenant uniquement 50 % d'humus, cet apport en MO correspondrait à 650 kg/ha d'humus par an (SOUDI *et al.*, 2000 ; NAMAN *et al.*, 2001).

Le total des besoins annuels des sols au Maroc en matières organiques stable est d'environ 6,25 millions de tonnes de MS. Leur satisfaction constitue une garantie de la durabilité des systèmes agricoles. L'utilisation du fumier, la gestion des résidus des cultures et la mobilisation d'autres sources d'engrais organiques sont des alternatives pour la durabilité des systèmes agricoles diverses du royaume (COMPOSTING, 2008).

Étude des fumiers

Nature et composition du fumier

Au Maroc, la litière et les déchets de l'exploitation sont généralement entassés près de l'étable, dans des endroits ensoleillés. Comme ces fèces n'ont pas fermenté

suffisamment, mais ont perdu 70 % de leur humidité, ces poudrettes ont perdu une bonne partie de l'azote, du carbone et de la potasse (et autres cations solubles) et véhiculent des maladies, des graines d'adventices, des germes contaminant le sol. Les fumiers de bonne qualité sont rares, mais leur influence est favorable sur les rendements : leur lente restitution des nutriments, l'effet positif sur le pH et les autres caractéristiques du sol sont bien connus (MISRA *et al.*, 2005). Cependant, 40 à 60 % du carbone et 20 % des nutriments des végétaux pâturés sont piégés dans les animaux (viande et os) ou évacués dans l'air (CO₂, N₂, NH₄) et ne retournent donc pas dans le sol. En outre, la biomasse disponible pour le fumier ne fournit que 10 à 30 % de la fumure organique qu'il serait nécessaire d'épandre pour maintenir le taux de carbone du sol (HAMON, 1972 ; GANRY et BADIANE, 1998).

Le rapport C/N est de l'ordre de 100 dans les pailles, et évolue jusqu'à 15-20 dans les fumiers compostés et jusqu'à 10 dans l'humus des sols : on perd donc 90 % du carbone (donc de l'énergie) accumulé par la végétation. La biomasse microbienne joue un rôle majeur dans la gestion du fumier en voie de compostage. L'alimentation animale stocke une partie importante des nutriments compris dans la biomasse, l'azote N dans le sang et la viande, le phosphore P et le calcium Ca dans les os. En définitive, les micro-organismes qui transforment les résidus en fumier vont réduire la biomasse de 60 % et les nutriments de 20 % (voir Guerin dans cet ouvrage, chap. 12). Par conséquent, il est clair que le bilan à l'échelle d'une parcelle soumise au parcours est fortement négatif pour les nutriments stockés dans le sol.

Le fumier est constitué par un mélange de litière, de rejets de fourrages et de déjections ayant subi des fermentations plus ou moins poussées à l'étable ou en tas. La composition moyenne du fumier est variable selon les animaux, la nature de la litière, la proportion de paille et de déjections, l'alimentation et le degré de décomposition du fumier (tabl. 1). Le traitement des fumiers entraîne une large diversité de la qualité de produits. Pour faire un bon fumier, il faut ajouter aux fèces de la paille pour fixer l'azote et des urines, plus de l'eau pour faciliter la transformation de la biomasse riche en C en fumier composté, proche de l'humus du sol. Le fumier est apporté surtout aux cultures maraîchères, céréalières et aux vergers.

Tableau 1
Composition du fumier des ovins et des bovins au Maroc
(humidité du fumier : 10 à 30 % d'eau).

Matériaux (kg/tonne)	Fumier d'ovins	Fumier de bovins
Matière organique sèche	280 à 320	120 à 170
Humus	100 à 150	50 à 100
Azote total	8 à 8,5	4 à 5
Phosphore P ₂ O ₅	2 à 2,4	2,5 à 3
Potassium K ₂ O	6,5 à 6,8	5 à 6
Calcium	-	5 à 4,5
Magnésium	-	0,2 à 1

Source : CHAFIA EL ALAQUI, 2003.

Il est difficile de distinguer la qualité des fumiers produits par diverses espèces animales, car les teneurs en nutriments dépendent pour une large part des fourrages ingérés, de la récupération des urines, des conditions de production et de protection du fumier vis-vis du soleil et des pluies.

Production du fumier

La quantité potentielle de fumier des principales espèces du cheptel national estimée à partir des mesures directes à la ferme est de 50 à 70 millions de tonnes, mais la production mobilisable n'atteint que 23 millions de tonnes. Le fumier provenant de l'activité avicole est estimé entre 0,4 et 1 million de tonnes par an. Les résultats d'une enquête à l'échelle nationale sur la production du fumier par espèce sont donnés dans le tableau 2. Le fumier est à l'état humide (70 à 90 % de MS).

Tableau 2

*La quantité de fumier humide (10 à 30 % d'eau)
produit par type d'animal au Maroc.*

Espèces animales	tonnes/tête/an
Bovins	9
Ovins	0,7
Caprins	0,7
Équidés	7
Volaille	14,3 (pour 1 000 poules)

Source : COMPOSTING, 2008 ; SOUDI *et al.*, 2000.

La production du fumier est relativement concentrée dans la partie nord et les périmètres irrigués du royaume. La commercialisation du fumier n'est pas organisée. Le fumier est généralement soit vendu en l'état aux producteurs maraîchers, soit épandu dans les champs sans aucun traitement. Il est caractérisé par son indisponibilité locale et saisonnière, impliquant des prix souvent aléatoires et spéculatifs. Le fumier est souvent exporté des zones de production vers les zones de maraîchage où son utilisation est rentabilisée par les prix souvent élevés des produits maraîchers. Pour la céréaliculture, le fumier utilisé est celui produit au niveau de l'exploitation ou dans la même zone pour éviter les frais de transport.

Les besoins en fumier sont très importants, donc le tonnage à transporter est élevé, d'où des coûts excessifs. Le prix du fumier varie selon leur qualité de 100 à 200 dirhams la tonne (10 à 20 €t). La même quantité de nutriments (8 N, 2 P₂O₅ et 7 K₂O) (17 kg/t de fumier) apportée par le fumier (5,3 dh/kg) coûterait 90 dh contre 26 dh/kg d'engrais minéraux.

Dans les zones agricoles semi-arides et subhumides (Bour favorable), il faut apporter 2 à 3 t/ha/an de fumier sec à l'air pour maintenir le niveau de MO du sol cultivé. Or, un ovin produit 300 à 500 kg de poudrette/an dans les parcs pastoraux sans paillage (CHAFIA EL ALAOUÏ, 2003). Donc, il faudrait 4 à 10 brebis

pour produire le fumier nécessaire pour combler le déficit. S'il faut 1 ha de parcours extensif pour nourrir un ovin, il faut compter 4 à 10 ha de parcours extensifs pour entretenir un hectare cultivé. D'après Guerin, Ganry et Roose, en zone tropicale, il faut aussi 3 t/ha/an de fumier (MS), soit 5 vaches et 20 ha de parcours, en extensif !!! On constate donc que si le fumier peut aider à entretenir la productivité d'une parcelle, il faut prévoir des apports complémentaires d'engrais minéraux (beaucoup moins lourds que le fumier par unité de nutriment) pour maintenir un bon niveau de production, d'autant plus que, si la terre est carencée en certains éléments nutritifs, le fourrage et le fumier le seront aussi. Les animaux font du transfert de fertilité de la zone de parcours qui ne cesse de s'appauvrir vers les sols où sont concentrées les cultures.

Gestion des troupeaux et restauration des sols

Plusieurs techniques sont mises en œuvre pour maintenir la productivité des sols cultivés ou de certains parcours.



*Dégradation du paysage dans le Rif suite à l'élevage extensif, Afkiren, Rif Maroc.
© IRD/IM. Sabir*

Les contrats et pactes pastoraux

Ils sont une forme de gestion rationnelle : ils se passent généralement oralement entre différentes tribus. Ils ont pour objectif soit d'assurer la complémentarité

entre les ressources fourragères en échangeant le droit d'usage, soit de permettre le passage des troupeaux étrangers à travers les finages. Pour les accords portant sur l'échange du « droit d'usage », les parties contractantes précisent le nombre de têtes à accepter et la durée du séjour sur les parcours. Par contre, pour le transit des troupeaux, les contrats précisent la durée de passage et l'itinéraire à suivre. Les troupeaux d'ovins et caprins sont parqués dans des étables (azib) durant la période du contrat. Le fumier produit est transporté vers les champs cultivés, souvent en céréales à grain ou à fourrage.

Les contrats de fumure entre éleveurs et agriculteurs

Le transport du fumier de la ferme aux champs pose de gros problèmes, surtout quand il s'agit des terrains de montagne en forte pente. Le transport sur les sentiers muletiers, ainsi que les difficultés de gardiennage des productions (légumes, fruits) restreignent forcément la fumure organique aux champs voisins des étables et aux petites parcelles maraîchères irriguées. Pour contourner ce problème, les paysans ont développé des « contrats de fumure » qui permettent aux éleveurs (nomades) d'installer pendant quelques semaines leur troupeau sur les champs après la récolte, de faire pâturer les résidus de culture (fanés et adventices), mais en contrepartie, les éleveurs s'engagent à garder la nuit les troupeaux sur les champs à fumer. Il reste à l'agriculteur à labourer le champ pour enfouir ces résidus organiques (fèces et urine) faciles à décomposer. C'est le bétail lui-même qui assure le transport et la concentration de la biomasse sous une forme enrichie en nutriments. Traditionnellement, l'élevage est perçu comme le moyen d'entretenir la fertilité du sol grâce à l'apport de fumier : « plus le troupeau est grand et plus de terres seront restaurées ».

La pratique de l'agdal

Ce nom berbère de mise en défens, fréquent dans toutes les régions montagneuses du Maroc, désigne l'interdiction temporaire d'utiliser un parcours. La mise en repos de l'agdal permet la réhabilitation de la végétation (pastorales ou forestières) et du sol (QARRO *et al.*, 2010 ; AUCLAIR et ALIFRIQUI, 2013). Cette pratique est encore fréquente dans le Haut Atlas où on distingue plusieurs types d'agdals.

– Les agdals, prairies très riches de petites superficies (quelques centaines de m²) se trouvant soit sur les terrasses fertiles des oueds ou sur les versants pentus non loin d'une séguia ouvertes au pâturage des vaches durant le printemps (production de lait et beurre). Elles sont continuellement irriguées pour permettre le développement d'une végétation fourragère luxuriante (graminées). Les vaches laitières pâturent directement sur les prairies des terrasses des oueds proches des maisons. Elles sont souvent gardées par les femmes et les jeunes filles. Ces endroits constituent une sorte de forum féminin villageois. La végétation des prairies des talus est souvent fauchée et rapportée aux étables par les mêmes femmes. Les périodes d'ouvertures coïncident souvent avec le



a : contrat entre les agriculteurs et les éleveurs nomades pour paturer les chaumes et les jachères en contre partie de la fumure des champs, Rif, Maroc.

© M. Sabir

b : cheminement du bétail et surpâturage du matorral à l'aval d'un barrage, Rif, Maroc.

© IRD/É. Roose

c : effets du surpâturage d'un matorral, du défrichement puis des labours sur l'évolution de l'érosion sur un versant du Rif, Algérie.

© IRD/É. Roose

printemps. Le développement permanent d'une couverture végétale dense, les déjections animales et l'irrigation continue de ces prairies permettent le développement de sols très fertiles.

– Les agdals, grandes pelouses les plus productives d'altitude dont la mise en défens au printemps fournissent de l'herbe aux ovins en période sèche. La couverture végétale permanente permet la stabilisation des sols de ces zones montagneuses. C'est la pratique la plus courante dans le Haut Atlas et le Moyen Atlas.

– Les agdals, forêts à dominance de chêne vert riveraines des villages sont mises en défens dans le Haut Atlas. Il s'agit d'une interdiction de toute coupe de bois ou de branches dans ces peuplements. Quand le déplacement des animaux est impossible pour la recherche de l'herbe, le conseil communal (Jmâa) procède à l'ouverture de l'agdal pendant les jours de neige seulement et fixe la quantité de branches à prélever pour nourrir le troupeau en nombre de charges de femme.

Il fixe les dates d'ouverture et de fermeture. Exceptionnellement certaines années, l'ouverture et la fermeture de l'agdal peuvent être décalées de quelques semaines à la demande d'une des Jmâa ayant droit, en raison des besoins du cheptel, de l'état des parcours ou des conditions climatiques (grande sécheresse). Dans la plupart des cas, le nombre et la nature du bétail à accéder sur l'agdal ne sont pas fixés. Toutefois, seule la grande tente est acceptée pour un temps limité, pas d'habitation en dur.

Gestion des animaux sur les parcelles mises en culture

La jachère

Elle permet d'avoir des pâturages verts et riches très tôt dans l'année, juste après les premières pluies d'automne. La règle traditionnelle pratiquée autrefois par les éleveurs-agriculteurs consistait à laisser au moins un quart de la SAU en jachère pour deux raisons principales : – le repos de la terre et sa fertilisation directe par les animaux ; – l'offre en fourrage juste après les premières pluies d'automne en raison de la facilité d'infiltration de l'eau et de la disponibilité des graines dans le sol de diverses espèces des cultures pratiquées et des espèces accompagnatrices.

Actuellement, la jachère est presque complètement abandonnée en raison du morcellement des terres (héritage) et de la réduction des terres de parcours collectifs dues à la croissance démographique.

Le parcours sur les chaumes

Il est pratiqué dans le cadre de la complémentarité des ressources alimentaires des terroirs exploités par les différentes tribus. C'est aussi un moyen de fertiliser par le fumier des animaux les terrains de culture, étant donné que les éleveurs maintiennent les animaux sur les lieux toute la journée et passent la nuit dans

des enclos qui peuvent être déplacés à l'intérieur des terrains parcourus. Actuellement, les parcours de chaumes sont limités aux petits troupeaux en fonction des superficies réduites de la SAU. L'abandon de ces pratiques (jachère et fumure) a conduit à l'appauvrissement des sols cultivés en raison de l'exportation des éléments nutritifs de la récolte des grains et pailles, sans restitution minérale à cause de la pauvreté des petits paysans.

Propositions d'amélioration

Les parcours naturels se caractérisent par le déséquilibre biogéochimique profondément marqué, compte tenu d'une exportation continue des nutriments à travers la biomasse exploitée sans restitution adaptée. À ce sujet, on propose pour arrêter le flux des nutriments d'encourager :

- les éleveurs à laisser les animaux ruminer en milieu de journée sur les parcours ;
- l'établissement des contrats de fumure entre les éleveurs et les exploitants agricoles de façon à permettre le pâturage des chaumes et jachères en contrepartie des déjections des animaux laissées sur les exploitations agricoles (ROOSE, 1994 ; ROOSE *et al.*, 2010) ;
- la pratique des parcs mobiles sur les parcelles de céréale après récolte, la pratique des parcs améliorés par apport des résidus de culture et de litières pour les animaux en stabulation (besoin de charrette pour le transport) (LHOSTE et RICHARD, 1994) ;
- l'enrichissement en légumineuses fourragères arbustives ou non et l'agroforesterie ;
- la collecte de l'urine des animaux sur les parcs de nuit et l'utilisation du purin dans les exploitations agricoles pour l'enrichissement des sols en azote et potasse.

Pour les mises en défens, on propose d'améliorer les agdals par des clôtures, des crochetages associés à des ensemencements d'un mélange de graines (graminées, légumineuses) et des plantations d'arbustes fourragers (*Atriplex*, *Medicago*, *Acacia cyanophylla*).

Dans les parcelles cultivées, on peut proposer l'introduction de haies vives légumineuses (banque de protéines pour les animaux), de brise-vents pour améliorer leur productivité, installer des cordons de pierres pour capter le ruissellement et les MO flottantes, ainsi que des cuvettes autour des arbres pour améliorer le bilan hydrique et retenir la fumure.

Pour le fumier, on peut proposer d'améliorer la quantité produite (agroforesterie) et sa qualité par l'apport de paille et par la récupération de tous les éléments de l'écurie (fèces, litière, urine), des déchets ménagers et des cendres du foyer : il faut en outre le stocker à l'ombre, à l'abri des pluies.

Conclusions

L'élevage constitue un secteur important de l'agriculture marocaine. Il contribue largement au revenu des paysans, constitue une trésorerie facilement accessible et donne du travail à beaucoup de monde. Il joue un rôle environnemental important dans la séquestration du carbone et la durabilité de la production agricole. Les animaux pâturent dans les jachères, les parcours et les forêts permettent un transfert de fertilité vers les parcelles cultivées des petits paysans. Dans un système d'exploitation harmonieux des parcours (pâturage équilibré), l'élevage permet d'accélérer les cycles biogéochimiques des éléments minéraux et leur transfert vers les terrains agricoles.

Cependant, quand le pâturage est excessif (surpâturage), l'élevage conduit à l'appauvrissement de la végétation (en particulier en plantes fourragères), la dégradation des terrains de parcours et à la réduction de la production de fumier. La couverture végétale est réduite, les sols sont tassés, les taux de matière organique sont réduits et la stabilité structurale des sols est affaiblie. L'infiltration se trouve réduite par l'encroûtement et la compaction des sols en faveur du ruissellement, agent causal principal de l'érosion hydrique (ravinement). La restauration de la productivité des sols suppose donc la réhabilitation de la couverture végétale, un enrichissement en légumineuses et un apport minéral complémentaire (surtout en phosphates).

On note au Maroc l'existence de plusieurs stratégies et pratiques paysannes de gestion de l'élevage (animaux et parcours) qui permettent une bonne conservation de la végétation et des sols. Les mises en défens (agdals), les contrats de pâture entre tribus et les contrats entre éleveurs et agriculteurs sont des pratiques ancestrales qui ont été efficaces pour la durabilité des systèmes d'exploitation mixtes élevage-agriculture, tant qu'on n'a pas dépassé la capacité de production des parcours.

Bibliographie

AUCLAIR L., ALIFRIQUI M. (éd.), 2013 – *Agdal, patrimoine socio-écologique de l'Atlas marocain*. Rabat, IRD-Ircam, 646 p.

BARTHÈS B., ALBRECHT A., ASSELINE J., DE NONI G., ROOSE É., 1999 – Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 30 : 1928-1938.

BENLEKHAL A., 2013 – *Le secteur de l'élevage au Maroc : des atouts incontournables et des défis à*

relever. Rabat, ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 25 p.

BOUTRAIS J., 2000 – Élevage et érosion en Adamaoua, Cameroun. *Bull. Réseau Érosion*, 20 : 204-217.

CHAFAI EL ALAOUI A. 2003 – *Guide des engrais et de la fertilisation*. Meknès, Maroc, École nationale d'agriculture, 326 p.

COMPOSTING, 2008 – *Marché du compost à base de boues d'épuration des eaux usées au Maroc*.

Projet Morocomp (Life 05 TCY/MA/000141), Rabat, 47 p.

GARRY F., BADIANE A., 1998 – La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne. Diagnostic et perspectives. *Agriculture et Développement*, 18 : 73-80.

HAMON R., 1972 – L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche. *L'AgronomieTropicale*, 27 : 592-607.

LHOSTE P., RICHARD D., 1994 – Contribution de l'élevage à la gestion de la fertilité à l'échelle du terroir. *Bull. Réseau Érosion*, 14 : 463-489.

MAPM, 2004 – *Le recensement général de l'agriculture*. Rabat, ministère de l'Agriculture et la Pêche maritime, 654 p.

MISRA R. V., ROY R. N., HIRAOKA H., 2005 – *Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole*. Document de travail sur les terres et les eaux n° 2, FAO, Rome, 51 p.

MOREL R., 1989 – *Les sols cultivés, techniques et documentations. Dynamique de la matière organique*. Paris, Éd. Lavoisier, 389 p.

NAMAN F., SOUDI B., CHIANG C., 2001 – Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides du Maroc. *Études et Gestion des Sols*, 8 (4) : 269-277.

QARRO M., 2006 – « Le sylvo-pastoralisme et la gestion durable des écosystèmes naturels arides ». 14th International Soil Conservation Organisation Conference *Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments*, Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006, 12 p.

QARRO M., ROOSE É., SABIR M., 2010 – « Zones de parcours au Maroc ». In Roose É., Sabir M., Laouina A. (éd.) : *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, Marseille, IRD Éditions, 343 p.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire des eaux et des sols. *Bull. Pédologie*, 70, Rome, FAO, 420 p.

ROOSE É., SABIR M., MACHOURI N., NABA A., 1999 – *Première approche de la GCES au Maroc*.

1. Enquête sur les risques de ruissellement et d'érosion à l'échelle de deux terroirs du RIF (région de Tetouan) : comparaison du diagnostique des villageois et des scientifiques. Projet Prad n° 99 n° 06, Rabat, 25 p.

ROOSE É., BARTHÈS B., 2006 – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Science*, CRC, Taylor and Francis, Boca Raton, Floride, USA : 55-72.

ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

SABIR M., 1994 – *Impact du pâturage sur l'état de surface et les propriétés hydrologiques d'un sol brun subaride dans un milieu steppique marocain (Aarid, Haute Moulouya)*. Thèse doct. es sciences agronomiques, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 194 p.

SABIR M., QARRO M., BERKAT O., MERZOUK A., 1992 – Effets de la charge animale sur le développement de la végétation dans un milieu steppique : Aarid, Haute Moulouya. *Ann. Rech. For. Maroc*, 26 : 59-67.

SABIR M., MERZOUK A., BERKAT O., ROOSE É., 1996 – Effet de la maximisation du pâturage sur certaines caractéristiques de la surface et la perméabilité d'un sol brun subaride dans un milieu steppique marocain (Aarid, Haute Moulouya). *Bull. Réseau Érosion*, 16 : 47-57.

SAUVANT D., 2005 – *Principes généraux de l'alimentation animale*. Paris, Institut national agronomique Paris-Grignon, département des sciences animales, 147 p.

SOUDI B., NAAMAN F., CHIANG C. N., 2000 – « Problématique de gestion de la matière organique des sols : cas des périmètres irrigués du Tadla et des Doukkala ». Séminaire *Intensification agricole et qualité des sols et des eaux*, Rabat, 2-3 novembre 2000, 6 p.

SRAÏRI T. M., 2011 – Le développement de l'élevage au Maroc : succès relatifs et dépendance alimentaire. *Courrier de l'environnement de l'Inra*, 60 : 91-101.

Érosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi

Théodomir RISHIRUMUHIRWA

Éric ROOSE

Problématique

En dehors des zones volcaniques, la région des Grands Lacs africains est caractérisée par une succession de collines et de montagnes où vivent des populations très denses (250 à 800 habitants/km²) sur des sols en majorité ferrallitiques (Ultisols) très acides et très pauvres en nutriments. Le défrichement de ces sols conduit à une rapide minéralisation de leurs horizons humifères et à la lixiviation des nutriments. Leur productivité dépend ensuite des systèmes de culture, du mode de gestion des résidus organiques et de l'importance de l'érosion. C'est dans ce contexte qu'une étude sur les pertes en terre et le ruissellement sous bananeraies a été menée à la station de Mashitsi située sur les plateaux centraux du Burundi, sur des pentes moyennes (8 %). L'étude a été faite sur six parcelles d'érosion de 300 m². Elle a permis de comparer les risques potentiels d'érosion sur sol nu, sur parcelle complètement paillée et les pertes réelles sous bananeraies plus ou moins denses, d'évaluer l'arrière-effet de l'érosion cumulée durant trois ans sur le rendement du maïs et surtout de tester trois modes de restauration de la productivité de ces sols plus ou moins érodés de même que la rentabilité économique des méthodes utilisées.

Cadre de l'étude

La station de Mashitsi de l'Iraz (Institut de recherche agronomique et zootechnique) est située sur le plateau central du Burundi, en province de Gitega, dans

la région naturelle du Kirimiro comprise entre 3° 04' à 3° 50' latitude Sud et 29° 37' à 30° 08' longitude Est, à 1 620 m d'altitude (RISHIRUMUHIRWA *et al.*, 1989 ; RUFYIKIRI, 1992).

Le climat de cette station est de type tropical à 4 mois de saison sèche (Aw4 selon Köppen) cité par VAN DER VELPEN (1973). Ses précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 1 200 mm (ISABU, 1989) et ses sols, sur schiste avec des filons quartzitiques, sont de vieux sols ferrallitiques, très acides et très désaturés, à teneur élevée en argile de type kaolonite, associée à de fortes quantités d'oxydes de fer et d'alumine. Ils sont classés dans les Oxisols ultic selon la Soil Taxonomy (RISHIRUMUHIRWA *et al.*, 1989).

Le bulletin analytique ci-après (tabl. 1) montre un sol à très faible capacité d'échange, pauvre en bases, en azote, phosphore assimilable et en matière organique.

Tableau 1
Bulletin analytique du sol ferrallitique
des parcelles d'érosion de Mashitsi.

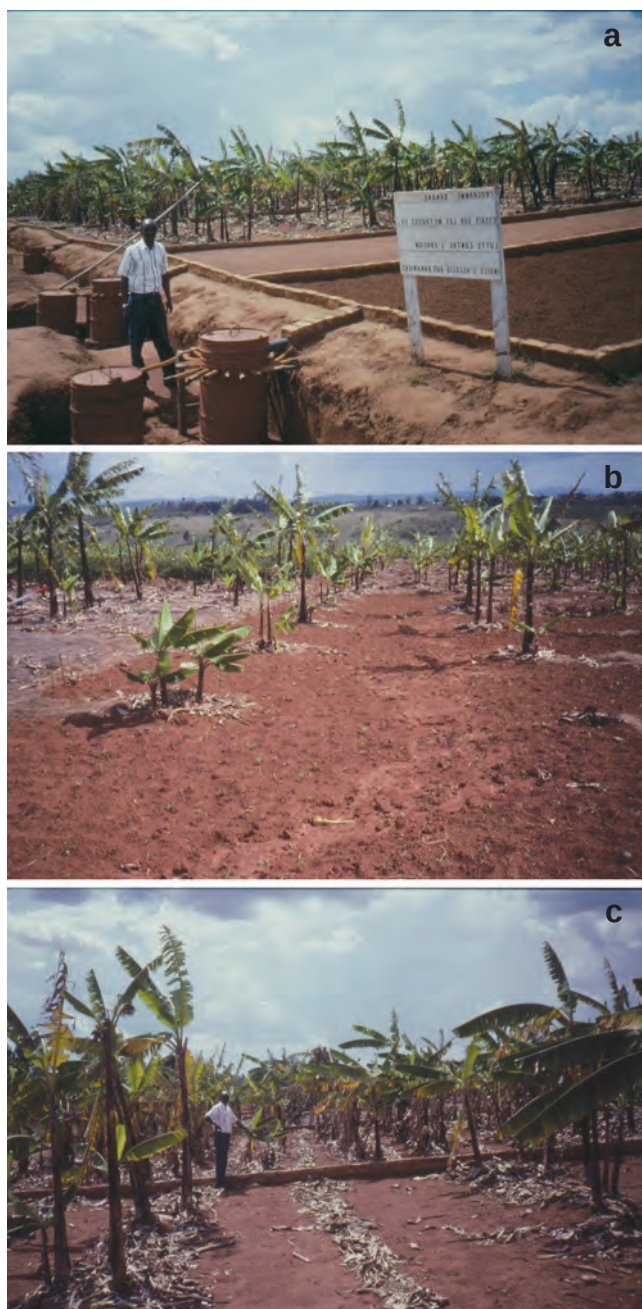
Horiz.	Prof. Cm	pH 1/5 20 °C		Bases échangeables (méc.100 gr)				Valeurs S/T/V				C N & P					
		eau	KCl	Na	K	Ca	Mg	S	T à pH 7	V	Al ³⁺ + H ⁺	T.eff.	V.eff.	Ind. Kamp.	C en %	N en %	P ppm
A1	0-17	4,7	4,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	7,0	3 %	1,6	1,8	11 %	86 %	1,42	0,09	15
A3	17-40	4,8	4,2	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	6,2	5 %	1,7	2,0	15 %	83 %	1,34	0,08	13
B21	40-75	5,0	4,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	5,8	3 %	1,4	1,6	13 %	88 %	1,10	0,06	5
B22	75-160	5,1	4,8	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	4,6	4 %	0,2	0,4	50 %	50 %	0,58	0,04	15

Source : RISHIRUMUHIRWA, 1997.

Sur ce type de sol, on a aménagé six parcelles d'érosion suivant le modèle de Wischmeier (WISCHMEIER et SMITH, 1978), portant cinq modes de production bananière et soumises à l'érosion hydrique pendant trois ans, entre 1991 et 1993, dans le but de mettre en évidence le rôle de la densité des bananiers, culture principale des systèmes culturels burundais, et du mode de gestion des résidus de récolte (paillage en bandes ou en couronne autour des souches de bananiers) sur la conservation des eaux et des sols.

Les parcelles étudiées portaient sur quatre densités de plantation couramment observées en milieu rural, soit : 1667, 1111, 833 et 666 plants par hectare avec paillage en feuilles de bananiers décroissant de 100 à 20 %. Une parcelle nue (témoin universelle de Wischmeier) a complété ce dispositif. La parcelle avec paillis complet porte aussi des bananiers à la densité de 1 667 pieds par hectare.

Après trois campagnes de mesures, on a évalué le niveau de productivité des différentes parcelles au regard des pertes cumulées en terre exprimé par leurs rendements en maïs sans fertilisation, ni organique, ni minérale.



a : parcelles d'érosion témoin sol nu à la station de Mashitsi, près de Gitenga, Burundi.

© IRD/É. Roose

b : parcelle de paillage par les résidus de culture autours des pieds de bananiers.

© IRD/É. Roose

c : parcelle avec paillage en bandes perpendiculaires à la pente.

© IRD/É. Roose

On a ensuite testé trois modes de restauration de ces parcelles, les trois méthodes testées étant : 1) apport de 6 t/ha de matières sèches de fumier de ferme ; 2) apport de 6 t/ha de fumier avec un complément minéral NPK ($N_{60} P_{60} K_{40}$) et 3) les mêmes apports en fumier et NPK complétés par un supplément de 500 kg/ha de chaux. Ici aussi, on a utilisé le maïs comme culture test.

Résultats

Ruissellement, densité de plantation et mode de paillis

Les coefficients de ruissellement (Kr^3 , $Kram^4$ et $Krmax^5$) calculés pour les différents modes de paillis (parcelle nue, paillis complet, paillis en couronne et en bandes) sont présentés dans la figure 1.

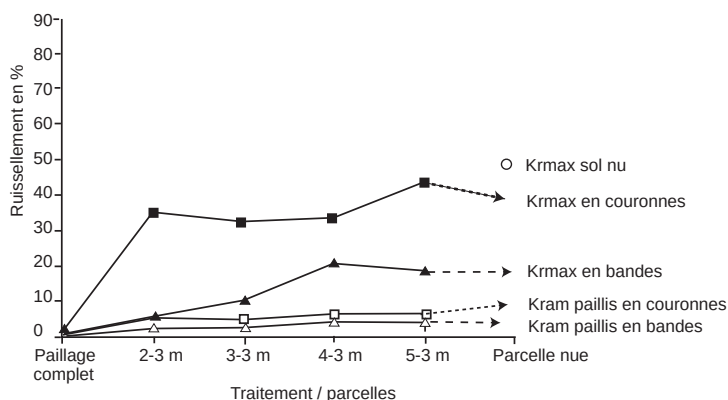


Figure 1
Ruissellement annuel moyen ($Kram$) ou maximum journalier ($Krmax$)
sur parcelle nue, sous paillis complet, paillis en bandes ou en couronne.

Ces résultats montrent que le paillis complet assure une excellente maîtrise de l'eau. En effet, le ruissellement annuel moyen est de 0,7 % et le taux max de ruissellement ($Krmax$) ne dépasse guère 1 %. L'infiltration améliorée entraîne la reconstitution des réserves hydriques du sol en saison des pluies et un bilan hydrique favorable sur toute l'année. La parcelle nue, par contre, donne les valeurs de ruissellement les plus élevées avec un ruissellement annuel moyen ($Kram$) de 24 % et un ruissellement maximum lors des plus fortes averses ($Krmax$) de 74 %. Le paillage en bandes contrôle mieux le ruissellement ($Kram$

3. Kr : coefficient de ruissellement.

4. $Kram$: coefficient de ruissellement annuel moyen.

5. $Krmax$: coefficient de ruissellement maximum.

variant de 2 à 4 % et des K_{max} variant de 5 à 20 %) que le paillage en couronnes (K_{ram} : 4 à 6 % et K_{max} de 33 à 43 %). Le paillis en bandes est d'autant plus efficace que les écartements diminuent, ces dernières se comportant comme des obstacles à l'écoulement des eaux de surface. Ceci est confirmé par les observations sur les parcelles après de fortes averses : avec le paillis en couronne, il se forme des rigoles continues entre les lignes de bananiers dans le sens de la pente alors qu'avec le paillis en bandes, elles sont stoppées au niveau de chaque bande créant ainsi une zone d'absorption du ruissellement.

Pertes en terre cumulées sur trois ans

Les pertes en terre (t/ha/3 ans) par érosion observées sur les différents traitements durant les trois années de mesure sont données dans le tableau 2.

Ces résultats montrent que le paillis complet est très efficace dans le contrôle de l'érosion. En effet, les pertes observées au cours de cette période sont de l'ordre de 40 kg/ha/an sur parcelle paillée contre 51 300 kg/ha/an pour la parcelle nue. Pour les autres traitements, les résultats montrent que l'érosion est fonction du mode de paillage (en bandes ou en couronnes) et de l'écartement. Avec le paillis en couronne, on observe une forte corrélation linéaire entre les pertes en terre (14 t/ha à 47,7 t/ha) et les écartements des bananiers. Le paillis en bandes ramène ces pertes à moins de 3,7 t/ha, quel que soit l'écartement.

Tableau 2
Productivité en maïs (kg/ha) après 3 années d'érosion (t/ha/3 ans).

Traitement	Érosion cumulée	Rendements maïs en kg/ha
Parcelle nue (témoin)	153,9	0
parcelle 5 x 3 m = 667 plants	57,8	353
parcelle 4 x 3 m = 833 plants	53,9	597
parcelle 3 x 3 m = 1 111 plants	32,2	909
parcelle 2 x 3 m = 1 667 plants	16,8	1 058
3 x 3 m + paillis complet	0,14	1 506

Arrière-effet de l'érosion sur le rendement en maïs

L'arrière-effet de l'érosion est donné par le niveau de fertilité résiduelle des parcelles après trois années d'érosion. Le niveau de production en maïs est supposé dépendant des quantités cumulées des terres perdues par érosion. En effet, l'érosion hydrique emporte les éléments les plus fins du sol (argile et humus) des premiers centimètres du profil. Or, ces éléments sont les principaux responsables de la richesse chimique et biologique du sol.

Ce tableau 2 montre que la production en maïs est corrélée négativement avec les pertes en terre cumulées des trois années de l'étude : la production baisse considérablement lorsque l'érosion augmente.

Cependant, cette conclusion doit être assortie de quelques réserves. La fertilité initiale du sol étudié (ferrallitique, très acide et très désaturé) est médiocre, comme le montre le bulletin analytique (tabl. 1). En l'absence de correction par la fumure, notamment organique, les rendements en grain restent faibles (1,5 t/ha dans le meilleur des cas, c'est-à-dire le paillis complet).

Restauration des terres par le fumier, les engrais NPK et le chaulage

La restauration de ces parcelles a été faite par les trois méthodes d'intensification croissante suivantes :

- fumier de ferme à raison de 6 tonnes (matière sèche) par hectare ;
- fumier de ferme (6 t/ha de matière sèche) complété par une fertilisation minérale NPK aux doses respectives de 60-60-40 unités fertilisantes/ha ;
- fumier de ferme (6 t) avec engrais NPK et chaulage (500 kg de dolomie/ha) ;
- témoin n'ayant reçu ni fumier, ni engrais, ni dolomie.

Les parcelles d'érosion ont été considérées comme des blocs à l'intérieur desquels les méthodes de restauration ont été réparties au hasard. Le dispositif expérimental obtenu donne des blocs randomisés. Les observations ont porté sur les rendements en maïs-graines (en kg/ha) et sur le coût et la rentabilité économique de chaque méthode de restauration.

Les rendements en grain de maïs obtenus sur les différentes parcelles après trois années de mesures sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 3
Réponse du maïs à 3 méthodes de restauration des terres érodées.
Érosion en t/ha/3 ans, rendement en grain en kg/ha.

Traitement	Érosion	T1 = témoin	T2= fumier	T3 = T2 + NPK	T4 = T3 + dolomie
Parcelle nue	153,9	0	326	732	610
parcelle 5 x 3 m	57,8	353	2 075	2 577	2 374
parcelle 4 x 3 m	53,9	597	2 387	2 903	2 550
parcelle 3 x 3 m	32,2	909	2 563	3 065	2 428
parcelle 2 x 3 m	16,8	1 058	2 726	3 215	2 767
parc. + paillis complet	0,14	1 506	2 806	4 191	3 201

Les parcelles nues, très érodées, deviennent rapidement improductives. C'est ainsi que la parcelle nue ayant perdu 153,9 t/ha en trois ans donne des rendements nuls en l'absence de fumier. Ils restent médiocres (< 750 kg/ha), même avec application de fumier et apport de NPK.

Les parcelles les mieux conservées, représentées par la parcelle sous paillis complet, répondent très bien à la restauration. On passe de 1 506 kg/ha (sans fumier) à 2 806 (avec fumier) et 4 191 kg/ha (avec fumier associé à NPK).

Pour les cas intermédiaires (parcelles à bananeraies avec différentes densités de plantation et partiellement paillées), les réponses aux méthodes d'intensification sont dépendantes des pertes en terres cumulées observées. Elles sont moins spectaculaires que sur la parcelle bien conservée. Ici aussi, l'importance du fumier est mise en évidence et un complément de NPK induit des accroissements de rendements intéressants, même s'ils ne sont pas statistiquement significatifs. Par contre, l'apport de dolomie semble curieusement avoir dans cet essai un effet dépressif.

Coût de la restauration des terres érodées

Le coût et la rentabilité des méthodes de restauration ont été estimés en comparant les coûts des intrants et les plus-values qu'ils génèrent en termes de revenus. Les prix utilisés pour cette analyse économique sont : 12 € par tonne de fumier (M.S.⁶), des engrais NPK à 0,80 € par kg et 12,50 € par kg de dolomie. Le maïs est vendu à 0,30 € par kg.

Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Ce tableau 4 montre que le maïs rentabilise bien la fumure organique. Les plus-values obtenues sur l'ancienne parcelle nue restent marginales (V/C de 1,4), mais montent très rapidement sur les autres parcelles paillées pour se situer entre 5,4 et 7,5. Ceci signifie que chaque euro investi dans le fumier rapporte 5,4 à 7,50 €, le seuil de rentabilité généralement admis étant un V/C égal ou supérieur à 2.

La combinaison de fumier et d'engrais permet d'accroître les rendements en maïs/grain, mais le taux de rentabilité diminue sans jamais descendre en dessous du seuil (valeurs comprises entre 2,1 et 2,6), sauf pour l'ancienne parcelle nue où ce rapport est inférieur à 1 signifiant par là que l'apport d'engrais sur cette parcelle induit des pertes économiques.

L'effet dépressif des apports de chaux sur les rendements compromet aussi leur rentabilité économique avec des V/C toujours inférieures à 2 (comprises entre 1,4 et 1,9). Les pertes économiques sont d'autant plus importantes que les parcelles sont plus érodées.

Aucune méthode de restauration n'est économiquement rentable sur l'ancienne parcelle nue, trop érodée. En effet, les rendements qu'on y observe restent faibles, quelle que soit la méthode de restauration et n'arrivent pas à rentabiliser

6. M.S. matière sèche ou D.W. Dry weight.

Tableau 4
Coût (€) et rentabilité des méthodes de restauration à Mashitsi.

Méthode	Traitement	ΔRdt /I. témoin	Coût intrants (€)	Plus-value (V) Production en €	Rapport V/C ¹
Fumier	Parcelle nue	326	72	97,8	1,4
	parc. 5 x 3 m	1 722	72	516,6	7,2
	parc. 4 x 3 m	1 790	72	537	7,5
	parc. 3 x 3 m	1 654	72	496,2	6,9
	parc. 2 x 3 m	1 668	72	500,4	7,0
	parc. + paillis	1 300	72	390	5,4
Fumier + NPK	Parcelle nue	732	312	219,6	0,7
	parc. 5 x 3 m	2 224	312	667,2	2,1
	parc. 4 x 3 m	2 306	312	691,8	2,2
	parc. 3 x 3 m	2 156	312	646,8	2,1
	parc. 2 x 3 m	2 157	312	647,1	2,1
	parc. + paillis	2 685	312	805,5	2,6
Fumier + NPK + Dolomie	Parcelle nue	610	324,5	183	0,6
	parc. 5 x 3 m	2 021	324,5	606,3	1,9
	parc. 4 x 3 m	1 953	324,5	585,9	1,8
	parc. 3 x 3 m	1 519	324,5	455,7	1,4
	parc. 2 x 3 m	1 709	324,5	512,7	1,6
	parc. + paillis	1 695	324,5	508,5	1,6

1. V/C : rapport de la valeur V de la production sur les coûts C des intrants utilisés.

Le rapport V/C en gras souligne que ces traitements sont rentables, en italique : en dessous du seuil de rentabilité (= 2).

les intrants utilisés dès la première année. Il aurait fallu continuer l'expérimentation pendant cinq années pour avoir la confirmation dans la durée de la rentabilité des intrants, mais les événements et la sécurité ne l'ont pas permis.

L'étude de la rentabilité des techniques de restauration n'a pas tenu compte du surplus de production de fourrage dont le coût peut facilement atteindre 25 % de la valeur des récoltes.

Discussions

Ruissellement et pertes en terre

Les résultats obtenus dans d'autres conditions expérimentales confirment l'importance du paillage dans la réduction du ruissellement. À Kanyosha

(Burundi), DUCHAUFOR *et al.* (1992) ont trouvé des ruissellements moyens annuels qui varient de 3,9 à 6,7 % pour des bandes de caféiers paillés tous les 10 m, des haies de *Setaria* et de *Calliandra* et des combinaisons de ces dispositifs, mais sur de très fortes pentes (45 %).

À la station de Rubona (Rwanda), sur une pente de 23 %, NDAYIZIGIYE (1993) a montré que les haies de *Calliandra*, de *Leucaena* et mixtes (*Calliandra* + *Setaria*) réduisent le ruissellement à 1,8 %, mais seulement après deux ans. À Mashitsi, les résidus des bananiers aboutissent au même résultat dès la première année, s'ils sont disposés en bandes.

L'efficacité du paillis complet a été clairement démontrée dans la réduction des pertes en terres, avec une valeur de l'indice cultural 'C' de l'USLE⁷ de WISCHMEIER (1978) de l'ordre de 0,001. Ceci a été confirmé par d'autres auteurs dans d'autres conditions d'expérimentation, notamment ROOSE et GODEFROY (1977); LAL (1975); DUCHAUFOR *et al.* (1992).

Le mode de paillage et les densités de plantation (écartements) influent également sur les pertes en terre. À cet égard, le paillage en bandes se révèle plus efficace que le paillage en couronne. En effet, il crée des lignes d'absorption du ruissellement et de filtrage des particules en suspension et semble jouer le même rôle que les lignes de haies vives, comme a pu le démontrer NDAYIZIGIYE (1993) à Rubona avec des haies de *Calliandra* et de *Leucaena* où il obtient des résultats comparables de moins de 2 t/ha/an, mais seulement la deuxième année après leur installation.

Restauration des terres érodées

Les sols de Mashitsi où l'étude a été menée sont des sols ferrallitiques, très pauvres. Ceci a été mis en évidence dans une autre étude qui a démontré que, sur haricot et maïs, il faut appliquer des doses de fumier de 9 t/ha/an de (M.S.) pour atteindre une production comparable aux moyennes observées au Burundi, soit 700 à 1 000 kg/ha de haricot et 1 800 à 2 000 kg/ha de maïs (RISHIRUMUHIRWA, 1992).

L'étude de restauration des sols érodés montre à quel point la lutte antiérosive doit être pensée en termes de gestion de fertilité, de conservation des eaux de ruissellement afin de limiter les pertes en terres. Un accent particulier devra être mis sur l'érosion en nappe, très dommageable à la fertilité chimique des sols très pauvres (ROOSE, 1994). En effet, elle entraîne une baisse de productivité d'autant plus marquée que les pertes en terre cumulées sont plus élevées. C'est ce qui explique les difficultés de restauration de ces sols même avec des moyens importants, contrairement aux sols les mieux conservés.

7. USLE : Universal Soil Loss Equation.

L'effet dépressif du chaulage observé dans les essais de restauration serait dû à un déséquilibre cationique consécutif à un apport excessif en Ca et Mg dans des sols très dépourvus en bases pouvant être à l'origine de blocage ou d'immobilisation de certains éléments comme le phosphore et les oligoéléments (HOMES et VAN SCHOOR, 1969). Pour contrôler cet effet surtout dans les sols fortement déficitaires en bases échangeables, RISHIRUMUHIRWA (1997) propose des applications de chaux très modérées, mais répétitives, à raison de 500 kg/an/ha.

Rentabilité économique des méthodes de restauration

Les études de fertilisation minérales et d'amendements organiques et/ou calcaires menées au Burundi se sont généralement intéressées aux rendements agricoles et rarement aux aspects économiques. Il a fallu attendre les travaux du Programme national engrais de la FAO (1982) pour voir cette notion systématiquement prise en compte avec comme critère de rentabilité un rapport V/C égal ou supérieur à 2.

Les meilleures rentabilités sont obtenues avec le fumier au regard de ce critère avec des V/C supérieurs à 5. Les engrais minéraux amplifient les rendements des cultures, tout en garantissant des revenus intéressants, mais moins spectaculaires, avec des V/C compris entre 2,1 et 2,6. Par contre, le chaulage n'est pas rentable dans cet essai en raison de son effet dépressif et de son coût élevé.

L'étude montre bien l'importance du fumier dans la gestion de la fertilité des sols ferrallitiques et dans leur restauration après la perte de leurs horizons de surface par l'érosion hydrique en nappe, sélective des particules fines, en présence d'un paillis. Le fumier permet, en outre, d'améliorer les propriétés du sol (activité biologique, structure, bilan hydrique, etc.), de stimuler la formation d'humus et de complexes argilo-humiques et de relever la capacité d'échange (SOLTNER, 1988). Tous ces effets bénéfiques de la matière organique permettent de mieux rentabiliser les autres intrants (engrais N-P-K), de gérer efficacement la fertilité des sols, et d'augmenter sensiblement la production agricole. Cependant, il faut aussi souligner l'importance du paillage qui, en réduisant le ruissellement et l'érosion, évite la perte de matières humiques et des réserves de nutriments apportés par le fumier.

Conclusions

Les résultats obtenus permettent de conclure que l'érosion hydrique, surtout en nappe, affecte la productivité des sols ferrallitiques déjà fortement dépourvus en bases échangeables. En effet, leur fertilité est limitée à l'horizon humifère de quelques centimètres qui est rapidement décapé par l'érosion en nappe, très sélective, emportant prioritairement les éléments légers (humus, argile et complexes argilo-humiques).

La production et le mode d'application du paillage permettent de contrôler le ruissellement et de réduire les pertes en terre. Sa disponibilité reste le problème majeur à résoudre. Son application doit être rationnelle et privilégier les bandes d'absorption (paillis en bandes) ou son épandage sur tout le champ au lieu de le concentrer en couronne autour des cultures. La gestion du ruissellement et la maîtrise des pertes en terres s'inspireront aussi des six règles proposées par ROOSE (1993) et ROOSE *et al.* (2011) impliquant, notamment la maîtrise du ruissellement, la restauration de la macroporosité et de l'activité biologique, la stabilisation de la structure du sol, la correction du pH et des carences minérales associant la matière organique et la fumure minérale complémentaire.

L'étude a permis de mettre en évidence le rôle du fumier comme clé de la fertilité de ces sols et de leur restauration après érosion. Les parcelles les moins érodées sont facilement restaurées avec du fumier (6 t/ha/an), seul ou associé aux engrais minéraux NPK qui permettent d'apporter un complément en bases échangeables et de corriger les faibles teneurs du sol et du fumier en phosphore et azote. Les études de mise en exploitation d'un gisement de phosphates à Matongo (province de Kayanza) n'ont pas été concluantes.

Dans le contexte des exploitations traditionnelles du Burundi, le fumier constitue le principal goulot d'étranglement. Il faut en augmenter la disponibilité en quantité et qualité. L'une des solutions proposée est le recours à l'élevage en stabulation permanente qui permet de produire jusqu'à 10 tonnes par vache adulte. L'augmentation du fumier aura un effet levier sur la production de biomasse et sur les rendements des cultures. Cet effet sera amplifié par les engrais NPK aboutissant à l'optimisation de la productivité des exploitations. L'introduction d'arbres à usages multiples et des haies vives viendra compléter ce dispositif avec, comme conséquence, un meilleur contrôle du ruissellement, des bilans hydriques favorables, une bonne maîtrise des pertes en terre et l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (YOUNG, 1990).

L'intensification de la production agricole par le fumier et les engrais combinée à l'intégration des arbres et haies contribueront à produire suffisamment de biomasse dans l'exploitation dont une partie pourra être affectée au paillage, total ou partiel, avec comme conséquence, la réduction du ruissellement, le contrôle de l'érosion, une bonne gestion de la fertilité et des terres et *in fine* une production agricole soutenue permettant de nourrir une population de plus en plus dense.

La durabilité des systèmes culturels burundais dépend aussi des mesures de contrôle de la démographie et de création d'emplois non agricoles afin de réduire la pression sur les terres cultivables. La situation revêt un caractère urgent. Elle ne pourra évoluer favorablement que si tous ces aspects sont rapidement pris en compte.

Bibliographie

- DUCHAUFOR H., BIZIMANA M., MIKOKORO C., 1992** – « Les acquits de la recherche à l'Isabu en matière de protection et de restauration des sols ». Séminaire sur l'érosion des sols au Burundi, 24 p.
- FAO, 1982** – Rapport du programme national engrais 1981.
- HOMES M. V., VAN SCHOOR G. H., 1969** – *La nutrition minérale des végétaux*. Paris VI^e, Masson et Cie Éditeurs, 162 p.
- ISABU, 1989** – *Diagnostic de la région naturelle du Kirimiro*. Rapport Isabu édit., 198 p.
- LAL R., 1975** – Role of mulch techniques in tropical soils. IITA, Ibadan, Nigeria, *Technical Bull.*, 38 p.
- NDAYIZIGIYE F., 1993** – Effets des haies vives arbustives sur l'érosion et la fertilité des terres sur fortes pentes au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, IRD Montpellier, 14 : 243-248.
- RISHIRUMUHIRWA T., 1992** – *Effet de la fumure organique et du chaulage sur les rendements du haricot, du maïs et du manioc à la station expérimentale de Mashitsi*. Communication à l'atelier Ibsram sur la gestion des sols acides, Bujumbura.
- RISHIRUMUHIRWA T., 1993** – Potentiel du bananier dans la gestion de l'eau et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 359-375.
- RISHIRUMUHIRWA T., 1996** – « The contribution of banana farming systems in sustainable land use in Burundi ». 9th Isco Conference, Bonn.
- RISHIRUMUHIRWA T., 1997** – *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro – Burundi)*. Thèse doct. EPFL, 223 p.
- RISHIRUMUHIRWA T. et al., 1989** – *Étude pédologique de 8 sites repères pour les essais engrais au sein de la CEPGL (Mosos, Mashitsi, Rubona, Karama, Yangambi, Mulungu, Gandajika, M'Vuazi)*. Pub. Iraz, 78 p.
- ROOSE É., 1993** – « Agroforestry, water and soil fertility management in African tropical mountains ». Inter. Workshop on *Soil erosion processes on steep lands*, Merinda, Venezuela. 28 p.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. FAO des Sols*, 70, 420 p.
- ROOSE É., GODEFROY J., 1977** – Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (4) : 409-436.
- ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011** – Six rules for rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 cases studies in tropical & Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (2) : 86-96.
- RUFYIKIRI G., 1992** – *Gestion des sols acides en région d'altitude à occupation intense : le Kirimiro au Burundi. Comparaison de quatre systèmes de mise en valeur*. Mémoire Facagro, univ. du Burundi, 54 p. + annexes.
- SOLTNER D., 1988** – *Les bases de la production végétale. Phytotechnie générale, tome I. Le sol et son amélioration*. 16^e Éd., coll. Sciences et Techniques Agricoles, 464 p.
- VAN DER VELPEN C., 1973** – *Géographie du Burundi*. De Boeck, 136 p.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1978** – *Predicting rainfall erosion losses, a guide to soil conservation planning*. U.S. Dept. of Agriculture, handbook, 282, 58 p.
- YOUNG A., 1990** – *Agroforestry for soil conservation*. Nairobi, CAB, Icrat, 276 p.

Effets de la gestion des résidus de culture sur un sol brun tropical volcanique

Tests sur divers systèmes intensifs
de cultures d'exportation sous pluies
naturelles et simulées en Martinique

Benoît KHAMSOUK

Éric ROOSE

Introduction

Les sols volcaniques sont intensivement cultivés dans le monde en raison de leurs propriétés physico-chimiques remarquables et de leur bonne fertilité. Les experts considèrent que ces sols sur cendres volcaniques sont stables, bien agrégés et très résistants à l'érosion hydrique (CABIDOCHÉ, 1999). Cependant, en Martinique, île volcanique des Antilles françaises (14-16° N ; 60-62° W ; 1 080 km²), ces sols sont peu étudiés, alors que les systèmes de cultures intensives d'exportation (bananes, ananas, cannes à sucre) peuvent présenter des risques de dégradation pour l'environnement (érosion et pollutions) en raison des pratiques agricoles (grande consommation d'intrants et nombreux passages des planteurs) sur un relief montagneux accidenté (pentes de 10 à > 40 %) soumis à une forte pluviosité (2 000-5 000 mm.an⁻¹) et à des tempêtes tropicales. Les dégâts lors des cyclones (décapage des sols labourés, coulées boueuses, ravines, pollutions des eaux de surface) peuvent être très sévères, car les cultures sont situées près des habitations. Certaines études en bananeraies ont montré

l'importance des pertes de nutriments lors des averses (GODEFROY et DORMOY, 1989) et la pollution du ruissellement suite à l'application de pesticides à l'échelle d'un petit bassin versant (DOREL *et al.*, 1996).

De 1998 à 2001, une étude sur dix parcelles d'érosion sur un sol brun tropical volcanique ou « sol brun rouille à halloysite » (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965) a montré qu'en matière de dégradation du sol sur un versant de 10 à 40 % de pente, les systèmes intensifs de culture bananière à gestion des résidus de culture en surface protégeaient efficacement le sol de l'érosion hydrique ($E = 0,6 \text{ t/ha/an}$) à l'inverse de la culture d'ananas sur billons ($E = 17 \text{ t/ha/an}$), en rotation avec les bananeraies ou du sol dénudé ($E = 85 \text{ à } 145 \text{ t/ha/an}$ en fonction de la pente) (KHAMSOUK, 2001 ; KHAMSOUK et ROOSE, 2003).

Afin d'approfondir les connaissances obtenues en parcelles expérimentales sous pluies naturelles et de déterminer les facteurs explicatifs, 19 tests de simulation de pluies cycloniques (intensité 100 mm/h durant plus de trois heures) ont été appliqués sur des microparcelles de 1 m² situées à l'intérieur des parcelles d'érosion de 200 m² (KHAMSOUK *et al.*, 2006).

Ce chapitre présente les résultats obtenus sous pluies naturelles et sous simulation de pluies cycloniques, notamment l'influence du paillis de résidus de culture étalés en surface du sol sur le comportement hydrique du sol testé. La fertilisation du sol est assurée par des apports raisonnés d'engrais minéraux (KHAMSOUK, 2001).

Site, matériels et méthodes

Le site d'étude

L'étude a été réalisée à la station expérimentale du Cirad-Flhor de Rivière Lézarde, située en région centrale de l'île avec une pluviosité de 2 000-2 500 mm.an⁻¹ et un sol brun tropical sur cendres volcaniques, cultivé en systèmes bananiers, canne à sucre et ananas. Six parcelles d'érosion (200 m²) sur différentes pentes (7 à 40 %) ont été installées avec quatre traitements dont les caractéristiques mesurées durant deux années sont récapitulées dans le tableau 1 :

- les sols nus Nu11, Nu25 et Nu40 (parcelles dénudées sur des pentes de 11, 25 et 40 % d'inclinaison, labourées sur 20 cm) : traitement standard ou témoin sur trois pentes, permettant de déterminer le comportement du sol sous les averses érosives (WISCHMEIER et SMITH, 1978) ;

- la canne à sucre avec paillage de résidus organique Ca10 (13 lignes de cannes) : parcelle installée sur une pente de 10 %, proposée en rotation avec la bananeraie pour réduire les risques d'érosion et assainir le sol des nématodes parasites ;

- la bananeraie établie avec paillis en bandes perpendiculaires à la pente de 11 % Ba11 (36 pieds) : traitement préconisé pour réduire l'érosion ;
- l'ananas mécanisé et billonné An7 (sept billons ; 850 plants) : système intensif traditionnel en rotation avec la bananeraie et situé sur une pente de 7 % labour profond à 60 cm avec enfouissement des résidus de la culture précédente et billonnage dans le sens de la pente.

Tableau 1

Caractéristiques des six parcelles d'érosion installées sur le sol brun tropical volcanique (sol brun rouille à halloysite ou Nitisol selon FAO).

Traitements		Sols nus			Bananeraie établie	Canne à sucre paillée	Ananas méca + billonné
Parcelles		Nu11	Nu25	Nu40	Ba11	Ca10	An7
Pente (%)		11 %	25 %	40 %	11 %	10 %	7 %
Texture	Argile (%)	73,95	72,55	62,05	68,85	66,45	68,05
	Limon (%)	12,25	6,8	17,55	14,35	13,6	11,15
	Sable (%)	11,95	20,34	18,83	15,11	17,22	20,47
Matière organique	C org (%)	1,34	1,85	1,71	1,99	1,62	1,57
	MO (%)	2,31	3,19	2,94	3,43	2,79	2,71
Ruissellement	Kram* (%)	7,1	5,2	4,3	2,8	0,5	11,4
	Krmax** (%)	45	32	28	27	6	51
Érosion	E (t/ha/an)	85,8	127,5	147,4	0,5	0,1	17,2

* Kram : coefficient de ruissellement annuel ou rapport annuel de la lame d'eau ruisselée sur la pluviosité.

** Krmax : coefficient de ruissellement maximal mesuré sur les plus fortes averses.

Les parcelles d'érosion (25 x 8 m) ont été isolées sur des pentes rectilinéaires qui se terminent par un canal de capture du ruissellement et des sédiments, lequel aboutit à trois cuves calibrées reliées par des partiteurs (fig. 1) (ROOSE, 1981 ; RISHIRUMUHIRWA, 1997). Après chaque pluie, le ruissellement et l'érosion sont directement mesurés au champ avec une grande précision pour les averses ordinaires < 200 mm (0,01 mm pour le ruissellement et 0,2 kg pour les pertes en terre) et une approximation acceptable pour les pluies cycloniques (10 mm pour le ruissellement et 5 kg pour l'érosion).

Pour mieux comprendre ce qui se passe lors des averses cycloniques, 19 simulations de pluies cycloniques (intensité : 100 mm.h⁻¹ durant trois heures) ont été appliquées sur des micro-parcelles (1 m²) situées dans les grandes parcelles d'érosion. Les mesures de ruissellement à l'exutoire des micro-parcelles permettent de déterminer les paramètres hydrodynamiques, bien représentatifs du comportement des surfaces de sol (LAFFORGUE, 1977) : la pluie d'imbibition Pi (mm) ou hauteur d'eau de pluie nécessaire pour provoquer le ruissellement ; la lame ruisselée cumulée LR60' et LR180' (mm) correspondant à la hauteur du ruissellement après 60 et 180 minutes de simulation ; le coefficient

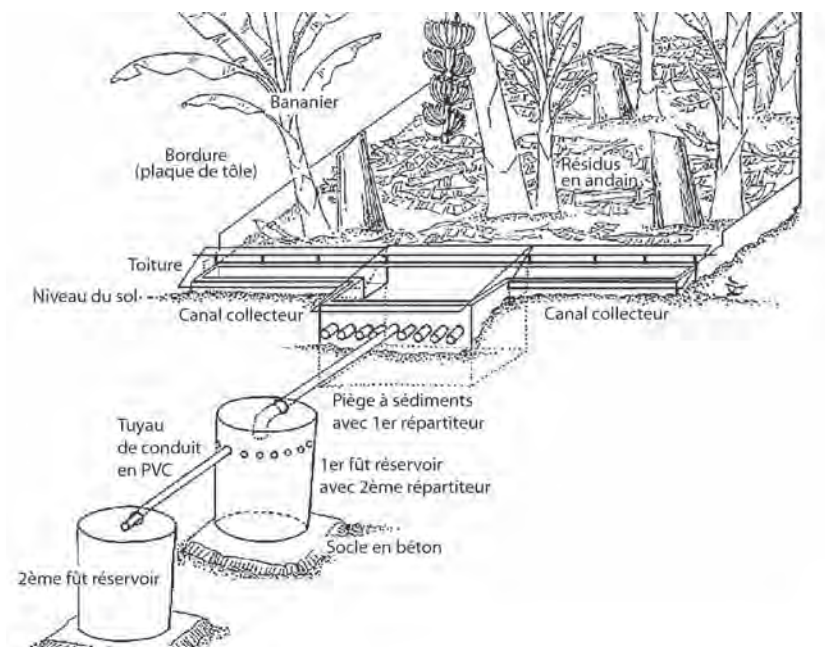


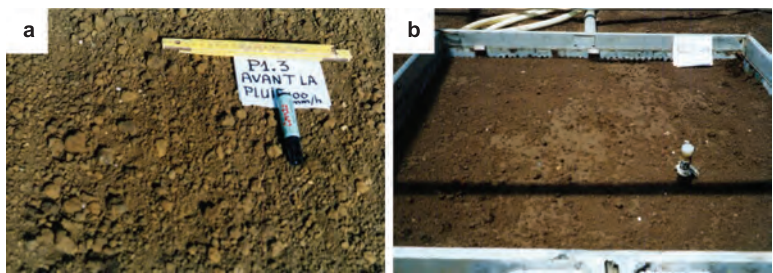
Figure 1

Schéma d'une parcelle de mesure du ruissellement et de l'érosion installée dans une bananeraie établie en Martinique.

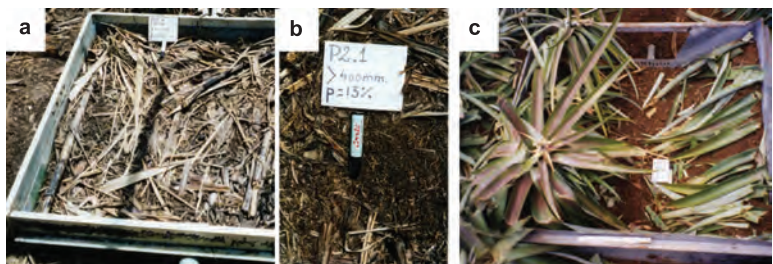
de ruissellement $Kr60'$ et $Kr180'$ (%) ou rapport des hauteurs d'eau ruissellement/pluie après 60 et 180 minutes ; le palier de ruissellement R_x ($mm.h^{-1}$) ou intensité maximale et constante d'écoulement d'eau durant le régime permanent du ruissellement. À noter que tous ces paramètres se retrouvent également dans les hydrogrammes ou courbes de ruissellement/infiltration durant la durée d'application des pluies artificielles.

À chaque simulation, les conditions initiales et finales de l'état de surface des micro-parcelles sont déterminées par cinq mesures : la pente p (%) à l'aide d'un mètre, d'une règle et d'un niveau à bulle ; les humidités pondérales initiale H_{pi} (%) et finale H_{pf} (%) par prélèvement du sol sur 10 cm ; la rugosité de surface R_g par la méthode de la chaînette (rapport de longueurs de chaîne plaquée au sol/mètre linéaire) ; la densité apparente du sol D_{app} ($g.cm^{-3}$) avec les cylindres ($1\ 000\ cm^3$) ; l'état de surface du sol comprenant les surfaces ouvertes SO (%) ou mottes, les surfaces couvertes SC (%) regroupant la litière et les cailloux protégeant le sol, les surfaces fermées SF (%), tassées ou encroûtées (tabl. 2) (ROOSE, 1996).

Afin de déterminer les relations remarquables et les facteurs explicatifs sur les résultats, des corrélations binaires ont été appliquées sur les résultats : leurs coefficients sont dits « très significatifs » au seuil de 1 %, « significatif » au seuil de 5 % et « non significatifs » dans les autres cas.



a, b : évolution de l'état de surface d'un sol nu,
a : avant la pluie, b : après simulation d'une « pluie cyclonique ».
© B. Khamsouk



a, b, c : état de surface sous canne à sucre, a : avant, b : après une pluie cyclonique simulée
et c : sous ananas billonnés mécanisés : Rivière Lézarde, Martinique.
© B. Khamsouk

Tableau 2
Conditions initiales et finales des 19 microparcelles (1 m²) testées sous pluies artificielles.

Traitement	Parcelle	Paramètres d'état du sol						État de surface sur 1 m ²		
		Moyenne écart-type	Pente (%)	Hpi (%)	Hp _f (%)	Dapp (g/cm ³)	Rg	SO (%)	SC (%)	SF (%)
Sol nu	Nu11	Moy	12,33	18,93	49,23	0,78	1,06	98,33	1,67	0
		écart-type	0,003	1,406	5,606	0,019	0,006	1,443	1,443	ND
	Nu25	Moy	24,58	18,48	45,79	0,83	1,04	91,84	8,16	0
		écart-type	0,005	3,176	2,316	0,004	0,007	1,565	1,565	ND
	Nu40	Moy	36,67	34,56	48,55	0,79	1,05	92,47	7,53	0
		écart-type	0,006	0,368	0,427	0,008	0,008	2,894	2,894	ND
Bananeraie établie Interligne paillée	Ba11-rés	Moy	16,80	18,94	48,53	0,78	1,22	1,23	96,34	2,44
		écart-type	0,007	2,950	1,004	0,007	0,025	0,870	2,579	3,449
Bananeraie établie Interligne nue	Ba11-nu	Moy	13,83	24,67	57,77	0,84	1,03	48,60	16,97	22,60
		écart-type	4,368	3,632	2,461	0,002	0,020	6,929	0,295	16,973
Canne à sucre paillée	Ca10-rés	Moy	12,25	19,64	56,27	0,80	1,17	2,28	97,72	0
		écart-type	0,011	2,275	8,936	0,000	0,005	0,399	0,399	ND
Ananas mécanisé et billonné	An7	Moy	9,17	18,77	56,62	0,87	1,17	4,67	82,01	13,32
		écart-type	0,012	2,559	2,353	0,005	0,000	2,702	4,695	3,653

ND : non déterminé.

Résultats et discussion

La pluviosité

La pluie annuelle moyenne entre 1978 et 1998 s'élève à 2 420 mm avec un indice d'agressivité R de 915 MJ.mm/ha.h, caractéristique des climats tropicaux humides (WISCHMEIER et SMITH, 1978 ; ROOSE, 1994). En 1999, l'essentiel de l'érosion provient de trois tempêtes tropicales de 74 à 94 mm avec des intensités maximales en 30 minutes de 76 mm/h. En 2000 par contre, il n'y a pas eu de tempête tropicale, mais l'agressivité de chaque pluie a été plus forte.

Le taux de couverture végétale sur les grandes parcelles

Sur les parcelles nues, les cailloux et adventices n'ont jamais couvert plus de 15 % de la surface du sol, tandis que sur les parcelles cultivées le taux de couverture varie de 30 à 60 % sur ananas billonnés et de 60 à 100 % sur les cultures paillées. Sur sol nu de plus de 20 % de pente, la surface couverte par les rigoles atteint jusqu'à 40 % : aucune rigole n'a été observée sous cultures.

Le ruissellement et l'érosion sur les grandes parcelles

Au tableau 1, il apparaît que les parcelles nues et la culture d'ananas sont les moins bien couvertes et les plus sensibles au ruissellement et à l'érosion. Sur les parcelles d'ananas billonnées dans le sens de la pente, le ruissellement se concentre, s'accélère dans les sillons et augmente l'érosion. Sous bananeraie, le paillage, même partiel en bandes perpendiculaires à la pente, dissipe l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement et maintient une bonne capacité d'infiltration, y compris lors des averses tropicales. Cependant sur les parcelles nues, lorsque la pente augmente de 11 à 40 %, le ruissellement diminue (de 7 à 4 %), mais l'érosion augmente (de 85 à 147 t.ha⁻¹.an⁻¹). Des résultats semblables ont été obtenus sur parcelles d'érosion nues en Afrique. HEUSCH (1971) suggère que sur forte pente le drainage interne est plus rapide et donc le sol se sature moins vite. ROOSE (1981) a observé que sur les faibles pentes, le ruissellement a moins de puissance et il se forme des croûtes plus rapidement. Sur forte pente, l'énergie du ruissellement augmente et lacère les croûtes en voie de formation. L'érosion sur ces pentes fortes et mal couvertes n'est plus sélective : la force du ruissellement emporte même les agrégats et les cailloux (KHAMSOUK et ROOSE, 2003). Ceci démontre la forte énergie du ruissellement sur les fortes pentes, mais aussi la grande résistance des agrégats de ces sols volcaniques soumis à la pluie et leur faible érodibilité. Cette résistance a d'ailleurs été confirmée par l'absence de croûtes d'érosion sur ces terrains (ROOSE *et al.*, 1999) et par la grande résistance des agrégats aux tests de tamisage dans l'eau au laboratoire (KHAMSOUK *et al.*, 1999).

Les conditions initiales et finales des microparcelles sous pluies simulées

Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 2 : au départ, le sol argileux est sec et peu dense. Les états de surface reflètent bien les caractéristiques des traitements

testés : un fort taux de couverture sur les essais sur parcelles cultivées paillées (bananeraie et canne à sucre) et un fort taux de surface ouverte ou dénudée sur les sols nus. Après l'arrêt des pluies cycloniques, la saturation du sol n'est jamais atteinte ($H_{pf} < 58\%$) : la forte capacité d'infiltration du sol brun tropical volcanique est remarquable et elle s'expliquerait par la grande stabilité des agrégats soumis à l'eau, résultats déjà démontrés lors d'un test de stabilité structurale en laboratoire (KHAMSOUK *et al.*, 1999). D'ailleurs, sur les trois parcelles nues, la réorganisation superficielle du sol après les pluies artificielles est différente du comportement battant des sols tropicaux sableux et limoneux : pas d'encroûtement lisse en surface, mais présence d'agrégats émoussés reposant sur une croûte interne et continue formée par le dépôt des particules fines désagrégées.

Les hydrogrammes et les paramètres hydrodynamiques des pluies simulées

Les hydrogrammes de ruissellement reflètent le comportement spécifique des traitements testés, avec la distinction entre parcelles très filtrantes (systèmes paillés) et celles qui ruissellent beaucoup (fig. 2).

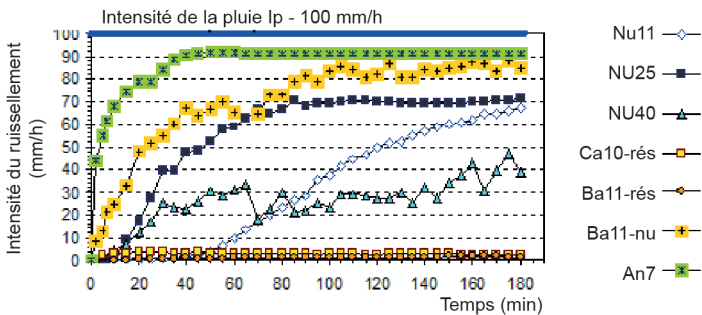


Figure 2

Hydrogrammes moyens du ruissellement issus des traitements testés sous pluies simulées.

Ces comportements sous pluies très intenses simulées sont bien conformes aux résultats de ruissellement observés en parcelles d'érosion (200m²), à savoir :

- l'absence de perte en terre sur les traitements cultivés paillés bananeraie et canne à sucre ;
- une érosion hydrique favorisée par les sillons concentrant rapidement le ruissellement, même sur pente faible 7 % (ananas mécanisé et billonné) ;
- un changement de processus hydrodynamique et d'érosion hydrique du sol dénudé quand la pente augmente : une érosion hydrique en nappe sur les pentes de < 12 %, combinée à une érosion linéaire pour des pentes < 25 % et à une érosion hydrique par coulée boueuse sur les pentes de 40 % (KHAMSOUK et ROOSE, 2003).

Tableau 3
Paramètres hydrodynamiques des 19 simulations de pluies appliquées sur les 6 traitements.

Traitement	Parcelle	Pluie		Ruissellement			Perte en sédiments					
		Moyenne écart-type	Ip (mm/h)	Pi (mm)	LR60' (mm)	LR180' (mm)	Kr60' (%)	Kr180' (%)	Rx (mm/h)	Fa (mm/h)	PT60' (t/ha)	PT180' (t/ha)
Sol nu	Nu11	Moy	100,22	66,67	7,76	161,12	7,76	53,71	74,34	25,66	0,04	2,74
	Nu25	écart-type	0,38	16,67	8,41	42,27	8,41	14,09	9,57	9,57	0,02	1,97
		Moy	100,74	18,48	58,95	212,40	58,50	70,24	69,48	31,25	1,46	6,05
	Nu40	écart-type	1,59	6,10	2,99	14,44	2,86	4,18	7,99	6,98	0,31	1,02
		Moy	99,07	14,29	30,78	173,61	30,87	58,50	48,28	50,78	1,10	4,02
	écart-type	2,19	2,34	14,10	32,20	13,66	9,12	10,36	8,31	0,40	0,16	
Bananaïre établie Interligne paillée	Ba11-rés	Moy	101,21	100,00	1,00	4,50	0,97	1,47	0,00	100,00	0,00	0,00
		écart-type	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Bananaïre établie Interligne nue	Ba11-nu	Moy	96,22	7,50	61,69	254,16	64,39	88,21	82,61	15,60	1,75	8,24
		écart-type	2,70	1,07	11,95	18,87	14,08	8,60	10,15	11,46	1,94	8,18
Canne à sucre paillée	Ca10-rés	Moy	100,06	100,00	3,45	0,00	3,38	2,78	0,00	100,00	0,00	0,02
		écart-type	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ananas mécanisé et billonné	An7	Moy	101,08	4,23	91,80	272,30	90,76	89,72	90,77	10,32	0,42	1,95
		écart-type	2,47	2,30	9,08	28,22	7,42	7,60	9,42	7,56	0,38	1,09

ND : non déterminé.

Au niveau des paramètres hydrodynamiques (tabl. 3), les résultats sont également conformes aux mesures réalisées sur les parcelles d'érosion (KHAMSOUK et ROOSE, 2003) :

- pas de ruissellement observé sous les traitements paillés, très couverts et très rugueux, et une infiltration totale comme dans d'autres études référencées (MANNERING *et al.*, 1966 ; ROOSE, 1977 ; HELMING *et al.*, 1998) ;

- l'effet des sillons concentrant et évacuant le ruissellement, vecteur de la forte érosion, est bien souligné dans des études expérimentales sur andosols et ferri-sols (ROOSE et ASSELINE, 1978 ; EL-SWAIFY *et al.*, 1982 ; WINSCHESLER CHROMEY *et al.*, 1989) ;

- l'influence négative de la pente sur le ruissellement sur les sols nus où l'infiltration augmente en raison de l'ouverture du sol, provoquée par l'énergie décapante du ruissellement (HEUSCH, 1971 ; ROOSE, 1977 ; POESEN, 1986 ; VALENTIN, 1989 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; JANEAU *et al.*, 2003 ; SABIR *et al.*, 2004).

Parmi les paramètres de ruissellement, les deux principaux (P_i et $LR60'$) sont très représentatifs du comportement hydrique des parcelles testées, tandis que d'autres travaux analogues font référence au ruissellement maximal R_x ou à l'infiltration permanente F_n , obtenus après 60 minutes de pluie sur des sols sableux tropicaux cultivés ou sur des sols limoneux tempérés (ROOSE et ASSELINE, 1978 ; CASENAVE et VALENTIN, 1989 ; LE BISSONNAIS *et al.*, 1989).

Quelques relations remarquables sous pluies simulées

Les corrélations significatives établies entre conditions initiales et paramètres hydrodynamiques soulignent bien le rôle très remarquable du paillage (couverture et rugosité au sol) contre le ruissellement ($r^2 = -0,538$ pour SC et $LR60'$; $r^2 = -0,695$ pour Rg et $LR60'$) (KHAMSOUK *et al.*, 2006).

Par ailleurs, la corrélation significative entre ruissellements mesurés en parcelles d'érosion de 200 m² sous pluies naturelles et en microparcelles de 1 m² sous simulations de pluies cycloniques confirme bien la similitude du fonctionnement hydrique du sol brun tropical cultivé sur les deux surfaces différentes ($r^2 = 0,794$ pour Cram et R_x). Cela montre aussi la conformité exceptionnelle des simulations de pluies cycloniques avec la pluviosité naturelle du site au niveau du comportement hydrique des traitements testés (KHAMSOUK *et al.*, 2006).

Concernant les paramètres de perte en terre, les résultats obtenus ne permettent pas de dresser des relations remarquables, car les microparcelles de 1 m² utilisées pour les simulations de pluies ne présentent pas d'exutoire aval lisse, mais une tôle perforée et pouvant piéger les sédiments entraînés par le ruissellement.

Conclusions

Sur les nitisols volcaniques cultivés en Martinique, l'érosion peut être sévère si le sol n'est pas totalement couvert. Bien que ces sols volcaniques aient des agrégats très stables à l'eau, ils sont emportés par le ruissellement dès que les sols cultivés sont dénudés sur fortes pentes.

Les résultats de cette étude montrent cependant qu'il est possible de développer des cultures industrielles intensives sur des pentes dépassant 40 %, à condition de respecter une technique antiérosive très simple, à savoir recouvrir le sol complètement, ou, en absence d'une quantité suffisante de paillage, étaler les résidus de culture en bandes perpendiculaires à la pente. Ces deux techniques permettent d'augmenter suffisamment la capacité d'infiltration des sols et de ralentir la vitesse et l'énergie du ruissellement. Cette pratique très simple de déposer les feuilles des bananiers, des cannes à sucre ou les plants broyés des ananas en bandes isohypses peut être facilement acceptée par les petits producteurs : elle suffit à maîtriser la circulation des eaux de surface dans cet environnement de collines.

Les résultats des pluies cycloniques simulées sont non seulement conformes à ceux mesurés sous pluies naturelles, mais aussi et surtout ils ont permis de préciser le fonctionnement hydrique du sol brun tropical cultivé (sol brun rouille à halloysite ou Nitosols) et de déterminer les facteurs explicatifs intervenant dans l'installation du ruissellement lors des pluies cycloniques, principal vecteur de l'érosion hydrique des collines en Martinique. Dans les productions végétales intensives (bananeraie, ananas et canne à sucre) sous climat tropical humide avec des tempêtes cycloniques, limiter le ruissellement par le paillage organique bien couvrant et rugueux reste donc une bonne pratique agricole de lutte antiérosive, combinant à la fois la conservation du sol et la valorisation des résidus de cultures pour améliorer les propriétés hydrodynamiques de ces sols bruns tropicaux très argileux.

Bibliographie

ASSELINE J., VALENTIN C., 1978 – Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-347.

CABIDOCHÉ Y. M., 1999 – « Conservation des milieux insulaires volcaniques tropicaux et bonnes pratiques agricoles. Cinquantenaire de l'Inra aux Antilles ». Table ronde de l'Agriculture raisonnée : 1-11.

CASENAVE C., VALENTIN C., 1989 – *Les états de surfaces de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Éditions Orstom, 229 p.

COLMET-DAAGE F., LAGACHE P., 1965 – Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* : 91-121.

- DOREL M., LAFFORGUE A., BRETAUD P., LE BRETON M., 1996** – Étude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. Projet Cordet 93DA14, rapport Cirad-Orstom Guadeloupe, 28 p.
- EL-SWAIFY S. A., DANGLER E. W., ARMSTRONG C. L., 1982** – Soil erosion by water in the tropics. *HITAHR, Research extension series*, 24, Hawaii, 173 p.
- GODEFROY J., DORMOY M., 1989** – Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe sol-banane-climat. Cas des sols bruns à halloysite. *Fruits*, 44 : 3-12.
- HELMING K., RÖMKENS M. J., PRASAD S. N., 1998** – Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. *Soil Sciences Society of American Journal*, 62 : 243-250.
- HEUSCH B., 1971** – Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Société des Sciences Naturelles et Physiques, Maroc, C. R.*, 37 : 41-54.
- JANEAU J. L., BRICQUET J. P., PLANCHON O., VALENTIN C., 2003** – Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science*, 54 : 543-553.
- KHAMSOUK B., 2001** – Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas d'un sol brun rouille à halloysite). Thèse doct. d'État, Ensam, Montpellier, 214 p.
- KHAMSOUK B., ROOSE É., DOREL M., BLANCHART E., 1999** – Effets des systèmes de culture bananière sur la stabilité structurale et l'érosion d'un sol brun rouille à halloysite en Martinique., *Bulletin Réseau Érosion*, 19 : 206-215.
- KHAMSOUK B., ROOSE É., 2003** – Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique. *Cahier Agricultures*, 12 : 145-151.
- KHAMSOUK B., ROOSE É., BLANCHART E., DOREL M., RANGON L., LOURI J., BANIDOL J. J., 2006** – Comportement hydrique d'un nitisol cultivé sous simulations de pluies extrêmes. Cas des systèmes intensifs de production bananière en Martinique. Marrakech, Isco, 4 p.
- LAFFORGUE A., 1977** – Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Applications à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 14 (4) : 299-344.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A., JAMAGNE M., 1989** – Étude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apports à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 31-40.
- MANNERING J. V., MEYER L. D., JOHNSON C. B., 1966** – Infiltration and erosion as affected by minimum tillage for corn. *Soil Science Society of America Proc.*, 30 (1) : 101-105.
- POESEN J., 1986** – « Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments ». In Callebaut F., Gabriels D., De Boedt M. (eds) : *Assessment of soil surface sealing and crusting*, Belgium, Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation : 354-362.
- RISHIRUMUHIRWA T., 1997** – Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles dans les hauts plateaux de l'Afrique orientale. Thèse doct., École polytechnique fédérale de Lausanne, 320 p.
- ROOSE É., 1977** – Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. *Vingt années de mesure en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 78, 108 p.
- ROOSE É., 1981** – Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 130, 587 p.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES). *Bull. des sols FAO*, 70, 422 p.
- ROOSE É., 1996** – Méthodes de mesures de l'état de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion sur les versants des montagnes. *Bull. Réseau Érosion*, Orstom Montpellier, 16 : 87-97.
- ROOSE É., ASSELINE J., 1978** – Mesures des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux parcelles d'érosion d'Adiopodoumé : II – Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 16 (1) : 43-72.
- ROOSE É., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993** – Érosion en nappe

et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES. Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 289-308.

ROOSE É., KHAMSOUK B., LASOUDIÈRE A., DOREL M., 1999 – Origine du ruissellement et de l'érosion sur sols bruns à halloysite de Martinique : observations sous bananeraie. *Bull. Réseau Érosion*, Orstom, 19 : 139-147.

SABIR M., BARTHÈS B., ROOSE É., 2004 – Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15 (1) : 105-110.

VALENTIN C., 1989 – Surface crusting, runoff and erosion on steep lands and coarse material. In : *The establishment of soil management experiments on sloping lands*, Ibsram Technologic Notes, 3, Bangkok : 285-312.

WINSCHESTER CHROMEC F., EL-SWAIFY S. A., LO A. K., 1989 – Erosion problems and research in Hawaiï. *Topic in applied resource management*, 1 : 143-174.

WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1978 – Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning., U. S. Department of Agriculture. *Agriculture Handbook*, 282, 58 p.

Potentiel du paillage pour réduire l'érosion et restaurer la productivité des sols tropicaux

Une revue en Afrique francophone

Éric ROOSE

Introduction

L'un des objectifs du labour avant un cycle de culture est d'enfouir les adventices et les résidus de cultures afin de préparer un lit de semence le plus homogène possible. En enfouissant la biomasse dans le sol, on accélère son humification et la restitution des nutriments par sa minéralisation. Or, après cinquante années d'efforts pour imposer la charrue en Afrique, les chercheurs ont constaté que le labour n'avait pas que des avantages en milieu tropical : il expose des terres nues, peu cohérentes et peu humifères (vu le retournement) à l'énergie des orages du début de la saison des pluies, il accélère la minéralisation des matières organiques (MO) et réduit de moitié le stock d'humus du sol en 3 à 10 ans de culture. Il dégrade la stabilité de la structure (pellicule de battance et fond de labour), réduit la capacité d'infiltration et augmente les risques de ruissellement et d'érosion, non seulement sur les fortes pentes des montagnes et des collines, mais aussi sur les longs glacis à pente faible des zones soudano-sahéliennes. Par ailleurs, l'enfouissement de pailles à taux de carbone/azote élevé ($C/N = 60$ à 100) entraîne une immobilisation de l'azote disponible dans les horizons superficiels de telle sorte que les jeunes plantules cultivées ont du mal à démarrer au milieu des mauvaises herbes (faim d'azote). Leurs feuilles sont pâles et pour rétablir la situation, il est souvent nécessaire d'ajouter 20 unités d'azote (BOLI et ROOSE, 1998). D'où la coutume en milieu d'agriculture extensive africaine

de brûler progressivement les résidus de défrichage de la forêt, ainsi que de faire pâturer les résidus de cultures les plus appétants, puis de brûler sur place les pailles et tiges ligneuses qui encombrant la surface des champs. Ces feux permettent d'éliminer plusieurs nuisibles, d'augmenter de 1 à 2 unités le pH du lit de semences, de réduire la toxicité aluminique, d'augmenter la fraction assimilable du phosphore et des bases (Nzila, chap. 10 et Peltier *et al.*, chap. 9 de cet ouvrage) et de produire des charbons de bois qui améliorent les qualités du sol (Rumpel, chap. 11).

Or le milieu forestier, le meilleur système de production tant pour la biomasse produite que pour la protection de l'environnement (séquestration du carbone et protection des sols contre l'érosion), n'a jamais connu la blessure du sol causée par la charrue : celle-ci déstabilise fortement les activités de la faune du sol. Pourtant, les horizons superficiels forestiers sont les plus stables, les plus poreux, la capacité d'infiltration est remarquable ($I_f > 150$ mm/h), le ruissellement est minimum de telle sorte que l'eau disponible pour les plantes est beaucoup plus abondante et durable que dans les champs labourés. La litière (matières sèches de 2 à > 10 t/ha/an), composée de feuilles, brindilles, fruits et insectes, protège physiquement toute l'année la surface du sol, entretient les activités biologiques et lui restitue progressivement de l'humus et des nutriments (captés en profondeur par les racines).

En milieu cultivé, on a donc tenté de copier le système forestier (litière, biodiversité et racines profondes) pour rendre plus durable la culture intensifiée en milieux tropicaux humides ou secs en développant un système de culture où l'on sème directement sous le couvert des résidus des cultures précédentes (SCV, voir en partie 3). on réduit le travail du sol au minimum sur la ligne de semis, on alterne des céréales avec des légumineuses et on maîtrise les adventices à l'aide d'herbicides (Mrabet, chap. 27 ; Boli *et al.*, chap. 28 ; Noroso *et al.*, chap. 29).

Dans ce chapitre, il sera question d'étudier l'influence du paillage sur les risques de ruissellement et d'érosion, sur les qualités du sol et sur le rendement des cultures en milieux tropicaux, à l'échelle de la parcelle cultivée.

Influence du paillage sur les risques d'érosion

À la station IRD d'Adiopodoumé près d'Abidjan, en basse Côte d'Ivoire, l'érosion a été mesurée sur 15 parcelles d'érosion de 6 x 15 m sur des pentes de 4, 7 et 20 % sur sol ferrallitique sablo-argileux, sous forêt secondaire à litière épaisse, sur ananas avec résidus hachés et répartis uniformément sur le sol, ou enfouis ou brûlés et puis enfouis et sur sol nu travaillé sur 10 cm (tabl. 1a) (ROOSE, 1981).

Tableau 1a

Érosion (en t/ha/16 mois) sous forêt, sol nu et culture d'ananas
sur résidus de culture d'ananas en paillage,
enfouis ou brûlés puis enfouis, Adiopodoumé.

Érosion		Forêt avec	Ananas + résidus			Sol nu
		litière	paillés	enfouis	brûlés	
Pente	4 %	0,01	0,1	0,7	1,2	45
	7 %	0,03	0	0,5	4,1	136
	20 %	0,10	1,0	33,2	69,0	410
Moyenne		0,04	0,4	11,5	24,8	197

Source : d'après ROOSE, 1994.

On observe que, sur sol nu et sous culture d'ananas avec résidus brûlés et/ou enfouis, les pertes en terre augmentent plus vite que la pente. Par contre, là où le sol reste couvert par une litière (forêt et culture avec résidus en surface), l'érosion est négligeable sur des pentes allant jusqu'à 20 % : le système de culture sous paillage permet donc de cultiver sans tenir compte de la pente, ce qui facilite grandement les pratiques culturales mécanisées.

Quant au ruissellement, il diminue sur parcelle nue lorsque la pente augmente. Il augmente irrégulièrement lorsque la surface du sol n'est pas entièrement couverte par une litière et il reste négligeable sous forêt et sous paillage de résidus de culture d'ananas (tabl. 1b). Ces irrégularités s'expliquent par le développement d'éléments de croûtes de battance, là où la pente est faible, le ruissellement ne peut entraîner que des particules très fines. Sur des pentes de plus de 15 %, l'érosion linéaire déchire les croûtes dès qu'elles se forment (ROOSE, 1994).

Tableau 1b

Ruissellement exprimé en % des pluies pendant un cycle de 16 mois.

Ruissellement		Forêt avec	Ananas + résidus			Sol nu
		litière	paillés	enfouis	brûlés	
Pente	4 %	0,10	0,9	1,7	7,3	44,6
	7 %	0,14	0	1,0	4,4	34,7
	20 %	0,6	0,1	3,4	7,5	29,3

En Martinique, les cultures d'exportation telles que bananes, ananas et cannes à sucre peuvent présenter un risque d'érosion et de pollution des eaux, vu les fortes consommations d'intrants lorsqu'elles sont pratiquées sur des collines à pentes fortes et lors des pluies cycloniques. Lors d'une étude sur dix parcelles d'érosion de 200 m² sur sol brun volcanique, Khamsouk et Roose (chap. 16) ont observé que les systèmes intensifs de cultures à gestion superficielle des



a, b, c : a : plantation de manioc paillé, b : plantation de maïs sur résidus de culture, c : plantation de soja sur résidus de riz, Brésil.

© IRD/É. Roose

résidus organiques protègent efficacement le sol de l'érosion hydrique, même en temps de cyclone ; alors que sur sol nu de pente de 10-25-40 %, l'érosion augmente linéairement de 86 à 147 t/ha/an. Quant au ruissellement, il a baissé de 7 à 4 % des pluies. Ici, le type d'érosion a changé (érosion en nappe, puis en rigoles, puis en masse) à mesure que la pente augmente. Ces résultats ont été confirmés par des tests au simulateur de pluies : le sol couvert de résidus de culture a pu infiltrer une pluie cyclonique de 300 mm en trois heures. Par contre, un sol nu ou billonné concentre le ruissellement après 40 minutes de pluie intense.

Au Burundi, Duchaufour (chap. 7) a montré que dans les bananeraies et les caféières bien paillées, les pertes en eau et en terre étaient très limitées de telle sorte que les sols sous ces cultures sont souvent meilleurs que sous les jachères proches. Sous cultures sarclées (manioc, maïs, sorgho et haricot), la présence de bandes paillées réduit autant l'érosion que des haies vives plantées tous les dix mètres.

À la station de Mashitsi sur les sols ferrallitiques acides du plateau central du Burundi, Rishirumuhirwa (chap. 15) a montré que sous bananeraies à densité croissante, la surface paillée par les feuilles fanées augmente, tandis que l'érosion diminue de 154 t/ha/3 ans sur sol nu (pente = 8 %), à 54 t/ha si la densité est faible (666 plants/ha), à 18 t/ha si la densité est forte (1 111 plants/ha) et à 0,1 t/ha si le paillage est complet. Le paillage organisé en lignes perpendiculaires à la pente est deux fois plus efficace que lorsque les feuilles fanées sont rangées en couronne autour des bananiers. Le ruissellement diminue parallèlement à l'augmentation de la surface paillée.

Au Nord-Cameroun, sur un sol ferrugineux très sableux et un glacié à pente < 2 %, Roose *et al.* (chap. 1) ont comparé une douzaine de systèmes intensifs de production de coton et maïs. L'érosion cumulée pendant 4 ans atteint 160 t/ha sur jachère nue travaillée, 90 t/ha sur parcelles cultivées labourées, mais seulement 30 t/ha sur parcelles soumises au semis direct sous litière de résidus de culture et moins de 5 t/ha sur parcelles labourées puis recouvertes des résidus de culture (rotation maïs-coton) ou d'une ombrière en plastique. L'enfouissement des résidus de culture ou de fumier n'a guère réduit le ruissellement ni l'érosion ; par contre, le fumier a augmenté nettement le rendement des cultures.

Tous ces résultats expérimentaux obtenus en Afrique convergent avec les conclusions de Wischmeier aux États-Unis (1978) selon lesquelles l'efficacité du couvert végétal sur l'érosion des sols dépend de la hauteur de la canopée. Si la canopée complète se trouve à 4 m, la réduction de l'érosion ne dépasse pas 25 % de l'érosion d'une parcelle nue. Si la canopée est à 1 m du sol, elle réduit l'érosion de 70 %, tandis que si le sol est totalement couvert d'une litière, l'érosion est réduite de 97 % : le facteur C du modèle USLE diminue de 0,75 à 0,03. En effet, le couvert d'une litière protège la surface du sol de l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement, tandis que les gouttes se regroupent au bout des feuilles des arbres et reprennent jusqu'à 90 % de leur énergie en 5 mètres

de chute (figure 26 : 124 dans ROOSE, 1994). Une plante dressée couvrant 20 % de la surface du champ ne réduit l'érosion que de 20 %, tandis qu'une culture à port rampant ou une litière réduit l'érosion de 40 % : il est donc intéressant d'associer un léger paillage (ou les herbes sarclées) ou des plantes rampantes aux cultures dressées.

Effets du paillage sur le bilan hydrique

La présence d'une litière morte couvrant au moins 30 % des champs protège la porosité de l'horizon superficiel, maintient la capacité d'infiltration du sol et par conséquent, réduit le ruissellement jusqu'à ce que le profil ou sa partie superficielle soit saturée. Le paillage réduit aussi l'évaporation de la surface du sol et au total, procure plus d'eau disponible aux racines des cultures. En milieu semi aride, ce stock d'eau supplémentaire va profiter aux cultures qui vont augmenter leur production. Par contre en milieu tropical humide et semi humide, les pluies sont assez fréquentes pendant la saison des pluies pour combler les besoins des cultures (ETR) : l'amélioration de la production végétale sera faible, mais le drainage va lessiver les nutriments (acidification) et recharger les nappes (ROOSE *et al.*, 1983).

Influences du paillage sur les propriétés du sol et le rendement des cultures

Dans la région de Bam, au nord du Burkina Faso, MANDO (1997) a répandu sur trois types de sol, débarrassés des termites (dieldrine : 0,5 kg/ha) ou non, un paillage (de 3 à 6 t/ha) de branchettes de *Pterocarpus lucens*, de pailles de *Pennisetum pedicellatum* ou un mélange des deux. Deux ans plus tard, il a observé sur les parcelles avec termites de nombreux placages de termites sur les mulch, l'augmentation de la porosité et de la capacité d'infiltration à saturation, la réduction de la densité apparente et de la résistance à la pénétration d'un cône sur 30 cm. Il en résulte un meilleur stockage de l'eau captée par le paillage et un meilleur enracinement. Il y a peu de différence de comportement en fonction du type de mulch ou de sol. Mando en conclut que les activités des

termites (micro- et macrotermes) sont responsables de l'amélioration des propriétés physiques de la couche superficielle des sols encroûtés et que le paillage attire les termites, capte les eaux et améliore la croissance des plantes.

Au Burkina Faso, en zone soudano-sahélienne, une équipe de l'Engref, de l'IRD et de l'Inera a étudié l'influence d'un apport de biomasse (pailles ou branchettes), en surface (paillage) ou enfouie par le labour, avec ou sans complément minéral, sur la restauration des propriétés biologiques, physiques et chimiques de sols ferrugineux sableux cultivés, la productivité d'une culture de sorgho et la disponibilité de la ressource en BRF dans deux terroirs villageois.

Une enquête dans 20 villages a montré que 14 espèces d'arbres sont utilisées par les paysans, mais que 5 espèces sont sélectionnées dans 72 % des cas : *Piliostigma reticulata* et *thoningii* (41 %), *Azadirach indica* (16 %), *Combretum micrantum* et *Guiera senegalensis* (15 %). On observera qu'aucune légumineuse n'est utilisée car traditionnellement, elles servent de fourrage d'appoint en saison sèche (ZONGO *et al.*, 2012).

À la station de Gampela (située sur un glacié de sols ferrugineux sablo-argileux pauvres, à 25 km de la capitale), l'équipe a installé un essai en petites parcelles (4 blocs randomisés) pour comparer l'influence d'un paillage de branchettes de *Piliostigma reticulata* (paillage riche en lignine précurseur de l'humus stable, favorable au développement des champignons plutôt que des bactéries), à celui d'un paillage riche en cellulose (pailles de sorgho, beaucoup plus rapidement minéralisées). À la suite d'une dose annuelle raisonnable de 1,5 t MS/ha/an de branchettes, aucune amélioration claire des propriétés du sol (C, N, P, K, pH, stimulation des champignons et mycorhyses) n'a été constatée au bout de trois années, ni de différence significative entre les types de paillage ou le mode d'apport de la biomasse (enfouie ou en surface). Les traitements avec apports minéraux complémentaires donnent souvent de meilleurs rendements, mais pas d'amélioration du sol. Par contre dès la première année, on a observé le développement rapide de l'activité des termites à la surface du sol, ce qui impliquerait une meilleure infiltration et alimentation hydrique suite au percement de la croûte de battance superficielle (BARTHÈS *et al.*, 2014).

Après cette constatation, une dose de 6 t MS/ha/an de branchettes a été incluse dans l'essai. Les analyses du sol sont en cours, mais le rendement en grains des cultures a été amélioré de 5 à 40 % par rapport au témoin pour un apport annuel de 1,5 t de branchettes (non significatif à cause de la forte variabilité du sol) et de 44 à 80 % en plus de paille et 60 à 116 % de grains pour une dose de 6 t MS/ha/an. Cependant, 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).

Enfin, la disponibilité de la ressource en branchettes a fait l'objet d'enquêtes et de modélisation (pour cinq essences) dans deux villages, l'un de la zone soudanienne (P = 1 100 mm) et l'autre en zone sahélienne (P = 600 mm) (KABRE, 2010 ; CABRAL, 2011). La biomasse la plus disponible (branchettes fines et arbrisseaux = faible compétition avec d'autres usages) atteint 1,9 t MS/ha à

Loukoura (région soudanienne) et 0,9 t MS/ha à Guié dont 80 % en dehors de la zone consacrée aux cultures. La disponibilité de la biomasse avant la taille régulière est donc probablement limitante surtout pour la zone sahélienne. On ignore quelle sera la réaction à la taille annuelle des diverses essences, mais pour deux espèces fréquentes (*Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa*), le stock de branchettes s'épuiserait rapidement, ce qui suppose la densification des peuplements (parcs et haies vives).

Ces résultats divergent avec ceux d'autres études en milieux tropicaux semblables (BARTHÈS *et al.*, 2010). WEZEL et BOCKER (1999) rapportent qu'une faible dose d'apport de BRF (1 t MS/ha/an) a augmenté le rendement en mil de 70 % (non significatif vu la forte variabilité spatiale). Par contre, SOUMARE *et al.* (2002) n'ont observé qu'une augmentation de 10 à 25 % du rendement de tomates pour des apports de BRF de *Casuarina equisetifolia* (fixatrice d'azote) de 4 à 16 t/ha/an en milieu tropical semi-aride. La stimulation de l'activité des termites après l'apport de BRF, déjà observée dans la région pour d'autres types de mulch par MANDO (1997), pourrait expliquer la redistribution de la MO dans l'espace et le manque d'amélioration à court terme des propriétés du sol et de la production des céréales (BARTHÈS *et al.*, 2014).

Apports en carbone et en nutriment des biomasses utilisées pour le paillage

Le paillage entraîne non seulement la protection, voire l'amélioration progressive de l'horizon humifère du sol, mais aussi ramène à proximité des racines superficielles du carbone (environ 50 % de la MS) qui va servir d'apport d'énergie pour les microbes, qui va se transformer en humus et va libérer des nutriments prélevés en profondeur par les racines.

On observe au tableau 2 que les branchettes et surtout les feuilles d'arbres sont plus riches en azote et en cations que les herbes locales et les résidus de cultures céréalières peu fertilisées. Par contre, les teneurs en phosphore sont très faibles (0,03 à 0,10 %) dans les branchettes feuillues comme dans les herbes et les pailles de céréales (sauf si les cultures ont bénéficié d'une forte fertilisation). Les branches feuillues de *Piliostigma reticulata* sont parmi les plus riches en NPK, à part les *Vitellaria paradoxa* (karité). Les graines de céréales fertilisées par contre sont plus riches en azote et phosphore.

Il apparaît au tableau 3 que l'apport de 1,5 t MS/ha/an de branchettes de *Piliostigma* est insuffisant en azote, phosphore et potasse pour remplacer les nutriments exportés par 10 quintaux de grains de mil, surtout si on exporte les pailles. De plus, ces nutriments inclus dans le paillage ne sont pas directement disponibles pour les cultures car en présence d'une forte dose de carbone, les

Tableau 2
Teneurs (en % des MS) en nutriments minéraux des biomasses utilisées en paillage
en régions soudano-sahéliennes d'Afrique occidentale.

Biomasse	N	P	K	Ca	Mg	Références
Repousses de <i>Piliostigma reticulata</i> (cette référence ne figure pas en bibliographie) pas trouvé !	1,2	0,07	-	-	-	DIEDHIOU <i>et al.</i> , 2009
Feuilles de <i>Piliostigma reticulata</i>	1,8	0,10	-	-	-	DIEDHIOU <i>et al.</i> , 2009
Repousses de <i>Guiera senegalensis</i>	1,3	0,06	1,06	-	-	DIEDHIOU <i>et al.</i> , 2009
Feuilles de <i>Guiera senegalensis</i>	1,6	0,10	-	-	-	DIEDHIOU <i>et al.</i> , 2009
Branches feuillées de <i>Piliostigma ret.</i>	1,3	0,09	0,88			BARTHÈS <i>et al.</i> , 2014
Pailles sèches de sorgho	0,3	0,20	0,5			PIERI, 1989
Pailles de mil ou maïs	0,5	-	-			
Rameaux de 11 espèces	0,5-1	0,04-0,1	0,3-1	-	-	MANLAY <i>et al.</i> , 2002
Feuilles de <i>Khaya</i> et <i>Vitellaria</i>	1,4	0,15	1,3	-	-	MANLAY <i>et al.</i> , 2002
Feuilles d'arbres (karité)	0,6	0,08	0,6	1,6	0,3	ROOSE, 1981
<i>Andropogon</i> : tiges sèches	0,2	0,03	0,3	0,3	0,2	ROOSE, 1981
Maïs fertilisé paille	0,7	0,10	0,8	0,2	0,2	ROOSE, 1981
Maïs-grain	1,7	0,32	0,5	0,1	0,1	ROOSE, 1981

Tableau 3
Comparaison des apports de nutriments par le BRF
et d'autres formes de fumure à l'exportation de 1 tonne de mil/grain.

Exportation de 1 t de mil=====	30 N + 0 P205 + 56 K20=====	GANRY <i>et al.</i> , chap. 13
Fumure minérale faible=====	21 N + 10 P2O5 + 10 K20=====	GANRY <i>et al.</i> , chap. 13
Fumier de parc, 3tMS/ha=====	30 N + 20 P205 +48 K20=====	RICHARD, 1985
BRF de <i>Piliostigma</i> , 1,5 t MS=====	20 N + 3 P205+15 K20=====	Barthès <i>et al.</i> , 2014
BRF de <i>Piliostigma</i> , 6 t MS=====	78 N+ 12 P205+63 K20«=====	idem
Remontée par 1 000 m de haie, 4 t=====	105 N+ 12 P205+ 36 K20=====	NDAYIZIGIYE et KÖNIG, 2014

microbes ont besoin d'un complément d'azote pour faire évoluer ces MO et libérer progressivement les nutriments indispensables au développement des cultures. Enfin, dans ce bilan il n'est pas tenu compte de l'exportation des pailles au profit des animaux qui manquent de fourrages en saison sèche (chap. 30, DUGUÉ *et al.*). Il faudrait donc 6 t de MS/ha pour compenser ces exportations. À titre de comparaison, Ndayizigiye (voir chap. 44) et König (voir chap. 46) au Rwanda ont analysé les produits de 1 000 m de haies de *Calliandra*, soit 3 à 4,5 t/ha/an de MS, 105 à 125 kg de N, 9 à 12 kg de P₂O₅ et 20 à 40 kg de K₂O, MgO, CaO. Leur apport sous forme de paillage n'a pas entraîné non plus l'amélioration de la production vivrière.

Discussion et conclusions pratiques

Le paillage à une dose de 3 à 6 t MS/ha est certainement une des méthodes les plus efficaces pour réduire le ruissellement, l'ETR et l'érosion. Il est encore utile tant qu'il couvre 30 % de la surface du sol, car il intercepte non seulement l'énergie des pluies, mais aussi le ruissellement et piège les particules, les MO et les graines véhiculées par le ruissellement.

En tant qu'amendement carboné, il améliore l'état de la surface du sol et les propriétés qui y sont liées : rugosité, porosité, perméabilité, vie microbienne, activités de la faune, capture et stockage de l'eau de surface dans les horizons profonds explorés par les racines.

Pour améliorer significativement le rendement des cultures, il faut tenir compte du retard de restitution des nutriments contenus dans le paillis car la biomasse doit d'abord être transformée par les microbes, de leur dispersion par les vers de terre, les termites et autres insectes qui augmentent encore la variabilité spatiale de la fertilité des sols. Pour conclure sur l'efficacité du paillage sur le rendement des cultures, il faudrait des études plus durables pour tenir compte des diverses sources de variabilité (sol, climat, micro-topographie du champ, types de cultures et techniques culturales).

Les résultats des applications de BRF au Burkina divergent avec ceux d'autres études en milieux tropicaux semblables (BARTHÈS *et al.*, 2010). WEZEL et BOCKER (1999) rapportent qu'une faible dose d'apport de BRF (1 t MS/ha/an) a augmenté le rendement en mil de 70 % (non significatif vu la forte variabilité spatiale). Par contre, SOUMARE *et al.* (2002) n'ont observé qu'une augmentation de 10 à 25 % du rendement en tomates pour des apports de BRF de *Casuarina equisetifolia* (fixatrice d'azote) de 4 à 16 t/ha/an en milieu tropical semi-aride. La stimulation de l'activité des termites après l'apport de BRF, déjà observée dans la région pour d'autres types de mulch par Mando (1997) pourrait expliquer la redistribution de la MO dans l'espace et le manque d'amélioration à court terme des propriétés du sol et de la production des céréales (BARTHÈS *et al.*, 2014)

Il y a aussi d'autres limitations au paillage de grandes surfaces cultivées : le stock réduit de la ressource en branchettes en zones semi-arides et son taux réduit de renouvellement après l'élagage, la concurrence de l'élevage qui manque de fourrage en fin de saison sèche et la tradition de la vaine pâture après la récolte principale, le besoin des ménages en énergie presque exclusivement comblé par le bois en ces zones rurales, le transport de masses importantes de branchettes (disponibilité d'une charrette et sa traction animale), les outils pour tailler proprement les branchettes, la faible qualité nutritive des branchettes et des pailles, l'adaptation du droit forestier pour permettre de récolter des branchettes vivantes sans blesser les arbres.

Pour éviter ces transports, il est nécessaire de densifier les arbres qui restent vivants pendant la jachère entre deux cultures (LOUPPE, 1991), de planter des

haies vives autour des champs et de régénérer les parcs en protégeant les jeunes semis du bétail et lors des sarclages.

En définitive, le paillage est un mode de gestion de la biomasse disponible très efficace pour conserver l'eau et les sols, mais il doit être complété par des apports minéraux suffisants pour assurer une croissance optimale des cultures.

Bibliographie

- BARTHÈS B., MANLAY R., PORTE O., 2010** – Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cahiers d'Agriculture*, 19 (4) : 280-287.
- BARTHÈS B., PENCHE A., HIEN E., DELEPORTE P., CLERMONT-DAUPHIN C., COUNAC L., MANLAY R., 2014** – Effect of ramial wood amendment on sorghum production and topsoil quality in a Sudano-Sahelian ecosystem (Central Burkina Faso). *Agroforestry Systems*, 89 (1) : 81-93.
- BOLI Z., ROOSE É., 1998** – Degradation of a sandy alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. *Advances in Geoecology*, 31 : 395-401.
- CABRAL A. S., 2011** – *Quantification de la ressource en bois raméal à l'échelle du terroir d'Ioloniore au Burkina Faso*. Thèse de MSc, AgroParisTech., Montpellier.
- KABRE G., 2010** – *Des rameaux ligneux pour fertiliser les sols de savane : quelle disponibilité de la ressource dans le terroir villageois de Gué au Burkina Faso*. Thèse MSc, École nationale des eaux et forêts, Bobo-Dioulasso, 55 p.
- LOUPPE D., 1991** – *Guiera senegalensis*, espèce agroforestière ? Micro-jachère dérobée de saison sèche et approvisionnement énergétique d'un village du centre-nord du bassin arachidier sénégalais. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques*, 228 : 41-47.
- 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.
- MANLAY R., PELTIER R., N'TOUPKA M., GAUTIER D., 2002** – « Bilan des ressources arborées d'un village de savane soudanienne au Nord Cameroun en vue d'une gestion durable ». In Jamin J., Seiny Boukar L. (éd.) : *Savanes africaines, des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*, Actes colloque Maroua-N'Djamena, Prasac, 15 p.
- NDAYIZIGIYE F., ROOSE É., 1996** – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.
- PIERI C., 1989** – *Fertilité des terres de savanes*. Paris, Cirad, min. Coopération, 444 p.
- ROOSE É., 1981** – *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Thèse doct. ès sciences, univ. Orléans, Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 130, 587 p.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique FAO*, Rome, 70, 420 p.
- ROOSE É., LELONG F., 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.
- SOUWARE M., MNKENI P., KHOUMA M., 2002** – Effects of *Casuarina equisetifolia* composted litter and ramial wood chips on tomato growth and soil properties in Niayes, Senegal. *Biological Agriculture & Horticulture*, 20 : 111-123.
- WEZEL A., BOCKER R., 1999** – Mulching with branches of an indigenous shrub (*Guiera senegalensis*) and yield of millet in semi-arid Niger. *Soil & tillage Research*, 50 (3-4) : 341-344.
- ZONGO E. et al., 2012** – « Pratique d'amendement par des rameaux fractionnés au Burkina Faso ». Séminaire BRF à Ouagadougou, diaporama.

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)

Éric ROOSE

Nadine VERNUMIÈRE

Khamsouk BOUNMANH-BENOIT

La problématique

Dans le parc régional de la presqu'île de la Caravelle en Martinique, plusieurs versants très pentus ont été jadis défrichés, plantés en canne à sucre, puis abandonnés et ont subi un décapage plus ou moins complet de la couverture pédologique (sols fersiallitiques sur lave acide) (COLMET DAAGE, 1988). Par la suite, ces terrains ont été pâturés avant d'être protégés à l'intérieur du parc régional.

Pour ralentir l'érosion hydrique sur ces versants dénudés de la presqu'île de la Caravelle et les risques de sédimentation dans l'espace protégé de la baie du Trésor, une première série de travaux a été confiée à l'Office national des forêts (ONF) en 1998-1999 : il s'agissait de ralentir le ruissellement à l'aide de palmes de cocotiers ou de dosses de Mahogany (arbre local apprécié pour les meubles) et de végétaliser les sédiments piégés sur les versants et dans quelques petites ravines.

Une expertise (ROOSE, 2000) a montré qu'une fois les pièges remplis de sédiments (34 t/ha), le ruissellement étant concentré en rigoles entre les planches, l'érosion en nappe évolue en ravinement. Par ailleurs, les plantations d'arbres locaux restent chétives, du fait des carences en azote et phosphore des sédiments et de la forte acidité des roches altérées sous-jacentes.

Une convention entre le parc (PNRM) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD) a été signée en 2001, qui prévoit la mise en place de cinq parcelles d'érosion sur lesquelles seront testés i / le paillage à l'aide de bagasse de canne à sucre (usine à une distance inférieure à 10 km), ii/ la plantation de quatre espèces locales d'arbustes dans des cuvettes, iii/ l'enrichissement du sol par trois niveaux d'apports de nutriments.

D'un point de vue plus général, il s'agit de mettre en place une nouvelle approche de gestion des ressources naturelles qui tente de tirer profit des eaux de surface pour augmenter la production de biomasse et couvrir la surface du sol, au lieu de s'opposer par des obstacles physiques aux forces naturelles destructrices des eaux de ruissellement (ROOSE et BARRETEAU, 2003).

Nous remercions vivement l'Union européenne d'avoir financé l'opération, la sucrerie du Gallion de nous avoir livré sur place 20 tonnes de bagasse, le personnel de la réserve qui a protégé le site, et le laboratoire de l'IRD qui a analysé la turbidité des échantillons de ruissellement.

Le milieu

La réserve naturelle de la presqu'île de la Caravelle est située vers le centre de la Martinique sur la côte Atlantique entre Tartane et la baie du Robert. Le relief est très varié avec ses nombreuses collines, ses ravins, ses côtes découpées, ses falaises et ses baies souvent couvertes de mangrove. Le point culminant (148 m) est occupé par un phare depuis 1861.

Les précipitations, concentrées entre juillet et décembre, n'atteignent que 1 500 mm en moyenne annuelle, mais des averses peuvent se produire toute l'année. Durant la période des cyclones, la hauteur journalière des pluies peut dépasser 150 à 250 mm/jour et les intensités du vent et des pluies sont alors très élevées. Les tempêtes tropicales provoquent des ruissellements très intenses aboutissant au ravinement et au décapage de la couverture pédologique sur les fortes pentes. De février à mai, la végétation souffre de la sécheresse, surtout en bordure de l'océan Atlantique où les vents sont violents et les embruns marins renforcent encore le stress hydrique.

La roche mère est vulcano-sédimentaire : tuffites légers riches en cendres et minéraux ferro-magnésiens ou coulées andésitiques (structure en orgues). Son altération donne naissance à des sols jeunes caillouteux ou localement à des



Vue sur un versant de la réserve naturelle de la Caravelle en Martinique.

© IRD/É. Roose

sols fersiallitiques argileux. L'érosion est très active sur les fortes pentes, dès que les sols sont dénudés ; le colluvionnement a accumulé localement en bas de pente des sols riches et profonds (EDOUARD et LAUNE, 1995). La diversité des formations végétales est liée aux stades de recolonisation des espaces dégradés par les cultures, le pâturage et l'exploitation sélective des essences forestières. La forêt semi-décidue primitive a totalement disparu, mais on trouve aujourd'hui des stades dégradés de savane, de fourrés et de forêt sèche plus ou moins ouverte, en particulier sur les colluvions épaisses en bas de versant (EDOUARD et LAUNE, 1995).

Le dispositif

Sans perturber le splendide paysage, le dispositif simplifié au maximum pour réduire le travail des observateurs du parc se devait d'évaluer les risques de ruissellement, d'érosion et de transfert de sédiments dangereux pour la faune et la flore de la baie du Trésor et de tester une nouvelle approche biologique de stabilisation des versants dénudés et de restauration de la végétation forestière primitive. Enfin, quelques panneaux éducatifs ont été élaborés pour expliquer au grand public la diversité des processus érosifs et les moyens de protéger ces versants en aidant la végétation naturelle à recouvrir les terrains dégradés par les activités humaines des siècles précédents.

Cinq ravineaux

De 83 à 130 m², ces ravineaux ont été isolés sur un versant de lave acide décapée jusqu'à l'altérite de couleur ocre, blanche ou rouge selon la teneur en minéraux ferromagnésiens. En aval de ces petits bassins, une fosse en béton de 1 m³ a permis de capter les sédiments grossiers, une partie du ruissellement et de la charge en sédiments fins en suspension. Vu la grande hétérogénéité de la topographie, de l'épaisseur du sol et de la nature de la végétation et des roches volcaniques, on a laissé les ravineaux à l'état naturel pendant un an (avec les dosses = déchets de planches datant des expérimentations précédentes) pour évaluer la variabilité de l'érodabilité initiale des cinq ravineaux.

La végétalisation assistée

En octobre 2001, l'équipe technique du parc a creusé 121 cuvettes de 40 × 40 × 40 cm (sorte de zaï) et planté quatre espèces d'arbustes locaux : le zikak (*Chrisobalanus icaco*), le poirier (*Tabebuia heterophilla*), le courbaril (*Hymenea courbaril*) et des boutures vigoureuses de *Gliricidia sepium* (légumineuse arbustive très fréquente dans les haies des campagnes martiniquaises,

introduite pour améliorer la litière). Chaque espèce a été plantée dans des cuvettes sous trois niveaux d'enrichissement en nutriments :

- T0, un témoin sans apport en nutriment autre que les matières en suspension dans les eaux de ruissellement ;
- Tc, enrichi en compost (un seau de Diago, tourbe enrichie en carbonates, à pH 5,5) ;
- Tc + e, enrichi en compost et engrais chimiques (50 g/cuvette de N₁₂, P₁₄, K₂₄).

Pour éviter toute pollution, le témoin a été situé au tiers haut des ravineaux (pas toujours le meilleur sol) et le traitement enrichi en compost et nutriment en bas de pente (qui peut recevoir plus de ruissellement).

La distance entre plants n'est pas toujours régulière pour tenir compte des pointements caillouteux peu propices à la plantation, mais chaque jeune plant dispose d'environ 4 m² d'impluvium. Les rares plantes préexistantes ont été respectées et de nouveaux plants se sont développés naturellement (le *Chamaecrista glandulosa*, aussi appelé cassia et l'anacardier, cajou). Le compost Diago de « HydroAgriFrance » est un compost de tourbe blonde et brune enrichi de 1,5 kg/m³ de N₁₂, P₁₄, K₂₄ : son pH est relevé à 5,5 à l'aide de 7 kg/m³ de carbonate de chaux et de magnésie.

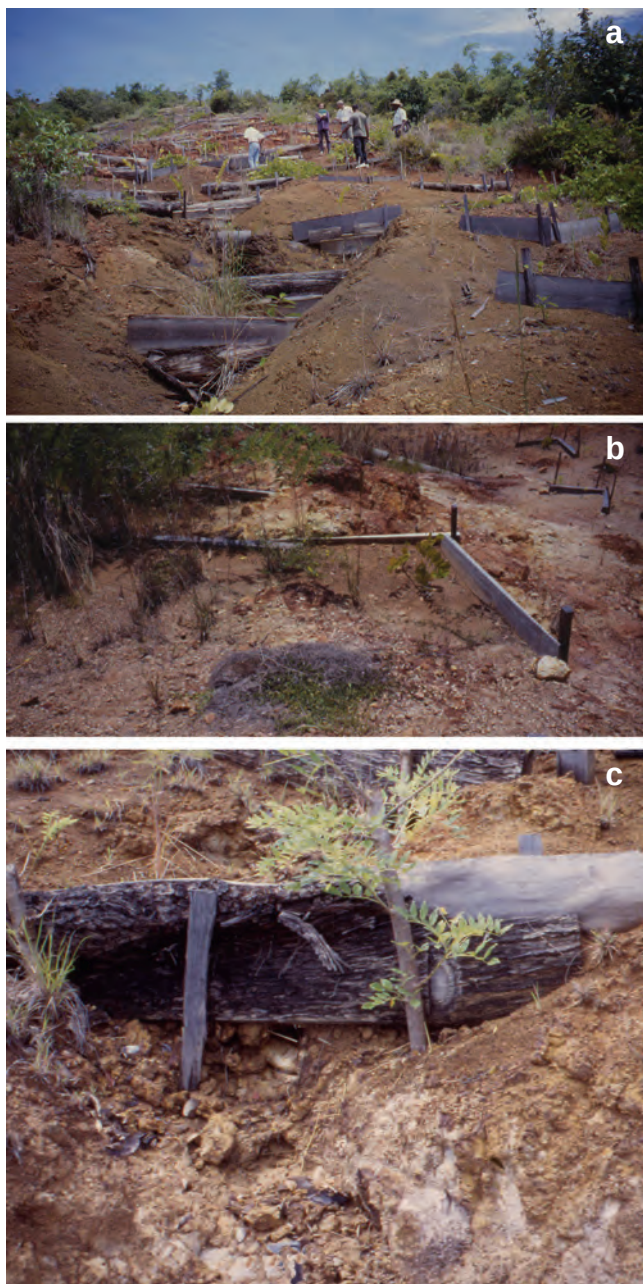
Le 17 août 2001, la parcelle 5 a reçu un épandage de 15 t/ha de bagasse partiellement séchée et décomposée, à titre de démonstration. L'aspect de la surface du sol a été profondément modifié par la couleur brune de l'humus, l'humectation du sol et le développement d'un tapis d'herbes pionnières. La parcelle 2 est toujours restée nue, mais les parcelles 1, 3 et 4 ont reçu un paillage de bagasse correspondant à 72, 36 et 18 t/ha de matières sèches encore très fibreuses.

Le 23 janvier 2003, l'équipe technique du parc a dégagé les plants d'arbustes et réaménagé les cuvettes : recréusement et disposition des terres à l'aval des plants pour mieux conserver les eaux de ruissellement. Des mesures du couvert arbustif ont été réalisées en septembre 2002, janvier 2003 et novembre 2004 par Nadine Vernumière. Alors qu'au départ Éric Blanchart a montré la pauvreté de la faune sur toutes les parcelles, en novembre 2004, des fourmis, termites et vers de terre ont été aperçus dans le sol des parcelles qui ont reçu de la bagasse.

Le traitement antiérosif : les dosses, la bagasse et les cuvettes

Les dosses de Mahogany, fichées dans le sol et s'appuyant sur deux piquets de *Gliricidia* deux années auparavant, n'ont pas été arrachées : elles ont capté 34 t/ha de sédiments que nous ne voulions pas déstabiliser pour protéger le lagon.

Pour compléter efficacement cet aménagement, nous avons creusé des cuvettes au pied de chaque plant arbustif. Avant l'épandage de bagasse, ces cuvettes ont augmenté la hauteur de pluie infiltrée dans le sol avant le démarrage du ruissellement. Dès la deuxième année, la bagasse a absorbé l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement sous la litière des zones tassées ou rocheuses. Les



*a, b, c : dispositifs de lutte antiérosive, a : seuils en planches sur une petite ravine,
b : piège à sédiments en planches/dosses de Marogani disposées en triangle sur le versant érodé,
c : faible développement de la végétation naturelle sauf les piquets de Gliricidia sepium.*

© IRD/É. Roose

transports solides ont immédiatement diminué et la charge en particules fines en suspension, celle qui risque d'atteindre et de dégrader le lagon, a été drastiquement réduite. L'expérimentation doit nous préciser combien de temps cette litière va protéger la surface du sol et si elle est suffisante pour améliorer les conditions d'infiltration des pluies et l'envahissement du terrain par la végétation naturelle et les arbustes introduits.

La mesure des pluies

Les orages étant très localisés, nous avons disposé trois pluviomètres à lecture directe d'une contenance de 180 mm permettant d'évaluer les précipitations à trois niveaux du versant. Les pluies fines n'ayant pas provoqué de ruissellement ont été cumulées avec les suivantes. En janvier 2003, deux pluviomètres cumulatifs en tubes de PVC verticaux capables de cumuler 1 500 à 2 500 mm de pluie ont été placés en parcelles 2 et 5, à l'abri des regards des visiteurs : leur objectif est d'obtenir une évaluation fiable de la hauteur des pluies journalières juste à l'endroit des parcelles, en particulier lors des grosses averses

La mesure de l'érosion

En principe, les pièges à sédiments sont trop réduits pour capter toutes les eaux de ruissellement et leur suspension lors des plus grosses averses, mais les sédiments lourds restent au fond des cuves et vont servir de base, avec la hauteur de pluie, pour estimer le ruissellement. Si la pluie est inférieure à la pluie d'imbibition, il n'y aura pas de trace de ruissellement dans le piège (Gerlach). Si le piège ne déborde pas, on peut estimer facilement le coefficient de ruissellement ($K_r \% = L_r/P_l \times 100$). Mais si le piège déborde, les sédiments grossiers restent captifs et on peut estimer le ruissellement par régression : $LR = f(\text{sédiments grossiers})$ pour les pluies non débordantes et on prolonge la droite pour les averses plus importantes.

L'érosion totale (en t/ha/an) comprend la terre de fond pesée directement sur le terrain avec une balance dynamométrique (précision à 100 g sur 30 kg) et les suspensions fines en suspension ($MES = \text{Turbidité} \times \text{vol. ruisselé}$). La suspension est mesurée dans une bouteille plastique de 1,5 l, prélevée à mi-profondeur dans les cuves sans remuer. Les suspensions sont floculées, pesées à l'étuve au milligramme près, puis multipliées par le volume ruisselé : ces suspensions ont toute chance de rejoindre le lagon, alors que les sédiments grossiers se déposent en cours de route.

L'évaluation du ruissellement

Elle est meilleure en établissant des régressions en fonction de la hauteur des pluies plutôt que des transports grossiers. En effet, lorsque la pluie dépasse la pluie d'imbibition (5 à 11 mm selon l'espacement des pluies), le ruissellement augmente régulièrement avec la hauteur de pluie (ROOSE *et al.*, 2004).

Les résultats

Les pluies

Au poste officiel de Météo France de Trinité Spoutourne, les pluies annuelles ont augmenté de 1 523 mm en 2001 à 1 823 en 2002, 1 833 en 2003 et 2 580 mm en 2004. Chaque année, on a observé des pluies très agressives de 100 à plus de 200 mm en 1 à 2 jours, mais pas de cyclone. Du point de vue des plantations, les pluies de 2001 ont été tardives, mais favorables à la reprise des jeunes plants. Les saisons chaudes de 2002 et 2003 ont été relativement arides et les arbustes ont d'abord souffert de la sécheresse suite au manque de vrai sol épais, et de l'engorgement lors des périodes très humides.

Les états de surface

Le long des diagonales traversant chaque parcelle, nous avons observé le 23 janvier 2003, six mois après l'épandage de la bagasse, la surface couverte (par la litière, les herbes et les arbres), la surface nue fortement liée à l'érosion, et la surface fermée (encroûtée, cailloux inclus et surface tassée) indicatrice de ruissellement (tableau 2 dans ROOSE *et al.*, 2004).

Les surfaces couvertes par des arbres (2 à 15 %) et par les herbes (1 à 12 % sauf en R5 = 72 %) restent faibles. Les surfaces couvertes par des cailloux varient de 4 à 23 % sauf en R2 où elle atteint 49 %. En dehors du témoin R2, la litière couvre 65 à 72 %.

Au total, les parcelles sont couvertes à près de 100 % sauf le témoin (R2 = 57 %) : les risques d'érosion sont donc très réduits, quelle que soit la dose de bagasse, vu l'abondance de cailloux à la surface du sol.

Les surfaces fermées sous la litière varient de 27 à 50 % soit à cause des cailloux, soit à cause du tassement : il y a peu de croûtes de battance sur les sols volcaniques. Il est donc probable d'observer un peu de ruissellement sous la bagasse, mais sa charge solide est très réduite.

L'érosion totale

L'érosion totale sur les parcelles varie de 21 à 39 t/ha la première année, mais dès que le paillis de bagasse couvre le sol à plus de 90 %, l'érosion tend vers zéro. En juillet 2004, la litière est minéralisée et l'érosion remonte progressivement à 5, 3 et même à 24,1 t/ha/an. Après deux années, la bagasse a presque disparu et l'érosion redémarre avant que le couvert végétal n'ait repris le relais.

Le ruissellement

Le coefficient de ruissellement moyen varie de 11 à 32 % sur les ravineaux non traités et de 3 à 14 % lorsqu'ils sont paillés et plantés sur cuvettes. De même, les coefficients de ruissellement maximaux observés lors des plus fortes

averses diminuent de 16-48 % avant épandage à 12-23 % après épandage de la litière. Même lors des plus fortes averses, le paillage permet de gagner 50 % d'infiltration, mais n'arrête pas totalement le ruissellement, en particulier sur les zones rocheuses ou tassées. Cette mince couche de bagasse posée sur des altérites en pente forte aurait pu être emportée lors des premières averses, mais en réalité, ces matériaux fibreux sont bien accrochés aux surfaces rocailleuses, ont absorbé l'énergie des pluies, ralenti le ruissellement chargé de matières organiques couleur du thé et supprimé les transports solides. Après 2 à 3 années, le mince paillage de bagasse disparaît localement et le ruissellement retrouve des niveaux proches de ceux du départ : la couverture végétale n'a pas eu le temps d'envahir le terrain, sauf en R5 où l'herbe a trouvé de meilleures conditions de démarrage.

Le développement de la végétation plantée

La hauteur et la surface couverte par la canopée des 121 arbustes plantés en 2001 par le personnel du parc ont été suivies jusqu'en novembre 2004. Six mois après l'épandage de la bagasse, la surface du sol couverte par les herbes n'a progressé que de 4 à 6 % et celle des arbustes de 5 à 12 %.

Le nombre de plants morts est important dès la première année : elle diminue en année sèche pour croître beaucoup en 2004, année très humide. Il semble donc que les plantations souffrent autant de l'excès d'eau (capture par les cuvettes) que de la sécheresse. Si les cuvettes et le système comparable au zaï captent le ruissellement et nourrissent ainsi les jeunes plants, on ignore si le drainage est suffisant et si les racines ne souffrent pas d'engorgement lors des grosses averses. On peut se demander si l'apport (trop) massif de bagasse n'a pas eu une influence négative sur la reprise et la croissance racinaire des jeunes plants arbustifs issus de pépinière.

Discussion

Une convention a été conclue entre le PNRM et l'IRD en mai 2001 pour lutter contre l'érosion, protéger le lagon et restaurer une couverture pédologique et forestière sur un versant décapé de la baie du Trésor, dans la réserve naturelle de la Caravelle.

Cette étude, réalisée avec très peu de moyens, a exigé le développement de méthodes simplifiées : des pluviomètres cumulatifs adaptés aux cyclones, des pièges à sédiments faciles à relever, et le suivi des états de surface du sol et de la végétation naturelle ou plantée par du personnel peu habitué à la rigueur scientifique.

Ce dispositif a permis de répondre à trois questions pratiques.

- Quels sont les risques résiduels d'érosion après le premier aménagement mécanique ? Sur une érosion primitive (évaluée par le modèle USLE) de 120 t/ha/an, on a observé des pertes résiduelles de 20 à 39 t/ha/an sur des ravineaux naturels de 100 m², malgré les pièges en planches et palmes de cocotiers.
- Quelle est l'efficacité d'un paillage de 15 à 72 t/ha de bagasse de canne à sucre ? Dès l'instant de l'épandage, et pendant 2 à 3 années, le risque d'érosion tend à s'annuler, même pendant les plus fortes averses. Ensuite, il faut recommencer ou plutôt compléter cette litière par le semis d'une légumineuse de couverture rampante.
- Quelle est l'efficacité du système africain de récupération des terres dégradées (le zaï au Burkina Faso), cuvette captant le ruissellement et concentrant les apports de compost et NPK complémentaire sur la restauration de la végétation arbustive ? Cette technique combinant les cuvettes et l'apport de MO + NPK a nettement amélioré le recouvrement du terrain par les espèces locales imposées. Cependant, il n'est pas évident que les cuvettes soient la meilleure solution pour améliorer les conditions hydriques dans ces zones qui peuvent recevoir des pluies considérables en quelques jours.

Cet essai a confirmé d'une façon plus générale la grande efficacité d'un paillis (quelle que soit sa nature) pour réduire le ruissellement (de 50 à 70 %) et l'érosion sur des ravineaux naturels (de 80 à 95 %), même lors d'événements pluvieux de plus de 200 mm en deux jours tombant sur des pentes de plus de 40 % et des sols très peu épais. L'observation du sol a montré le développement d'un mince horizon humifère brun foncé plus humide, la réduction des surfaces compactes et le développement d'activités perforatrices des fourmis et termites.

La bagasse est abondante en Martinique et sur les zones productrices de canne à sucre : elle ne coûte rien sinon le transport de 15 t/ha (250 € de la sucrerie du Galion à la réserve). Cependant, l'épandage est onéreux vu le coût de la main-d'œuvre locale (7 000 €/2 ha) : or, il y a des milliers d'hectares de cultures diverses qu'il faudrait protéger. Il n'est pas forcément nécessaire de couvrir toute la surface (bandes plantées) sur une telle épaisseur (5 cm).

Le système de paillage a eu des effets très positifs sur la restauration du sol et de la végétation à court terme. Mais il a aussi ses limites : durée limitée à 3 ans en fonction de l'épaisseur des sols, de sa résilience et de la vitesse d'altération des roches (ici 2 mm/an).

Le problème du dosage de la bagasse a été peu détaillé. Or, un excès de MO solubles dans les eaux de ruissellement peut entraîner la mort des jeunes plants par manque d'oxygène. Il faut préférer deux petites doses (6 t/ha) astucieusement réparties dans l'espace (en bandes) à une grosse dose qui minéralisera rapidement et risque d'empêcher la levée des graines stockées dans le sol ou apportées par la faune ou le vent.

On connaît mieux les espèces d'arbustes et d'herbacées qu'il conviendrait de planter dans ces zones profondément dégradées : le zikak, certains *Cassia* et

des graminées, ainsi que le *Gliricidia* poussent vite s'ils trouvent assez de terre et des fissures dans la roche altérée. Par contre, poirier et courmaril à port dressé ne semblent pas bien adaptés à cette première phase de recolonisation. Il faudrait sélectionner des légumineuses rampantes pionnières (ex. *Hypomea*) et les semer généreusement sur les zones de sédimentation. La bagasse pourrait fournir un tapis efficace pour bloquer temporairement l'érosion, capter les graines des espèces indigènes et favoriser l'infiltration des pluies. Les *Cassythes* qui parasitent les cimes et les jeunes plants sont très envahissantes : certes, elles participent à la protection du sol, mais étouffent les jeunes arbustes.

Conclusions

Cette expérimentation dans une réserve naturelle a permis, avec peu de moyens, d'estimer les risques résiduels d'érosion après un aménagement mécanique (planches), de confirmer l'efficacité d'un paillage de déchets industriels à bloquer le processus d'érosion pendant trois années, le temps nécessaire pour l'implantation d'un couvert végétal pionnier. Par ailleurs, le système de plantation en cuvettes qui concentrent les eaux de ruissellement et les apports en compost et en nutriments NPK (voisin du zaï africain) a permis d'accélérer la restauration des espèces arbustives imposées, d'augmenter le nombre de survivants et leur vitesse de croissance. De même, la mince couverture pédologique s'est améliorée (humus, infiltration, décompaction).

On peut préconiser dans les conditions locales une technique moins onéreuse (paillage réduit à 6 t/ha répandu en bandes isohypses sur les lignes de plantation) qui réduit les risques d'hydromorphie en période de pluies excédentaires.

Il serait souhaitable de tester des associations de plantes résistantes à la sécheresse et à l'engorgement, à l'acidité et à la toxicité des métaux lourds, capables de s'enraciner dans un milieu confiné (les fissures de la roche + un potet de 60 litres) et de s'étaler sur les terrains incultes voisins.

Bibliographie

COLMET DAAGE E., 1988 – Carte des sols de la Martinique au 1/20 000.

EDOUARD J. A., LAUNE P., 1995 – Réserve naturelle de la presqu'île de la Caravelle : entre terre et mer.

PNRM, min Environnement et Fonds européen de développement régional, 58 p.

ROOSE É., 2000 – Interprétation des analyses des échantillons de terre prélevés sur un versant érodé

de la réserve naturelle de la Caravelle, Martinique.
Rapport de consultance, IRD Montpellier/PNRM
Fort-de-France, 6 p.

ROOSE É., BARRETEAU D., 2003 – Érosion et
environnement à la réserve naturelle de la Caravelle,
Martinique. *Antilla*, 1030 : 18-19.

**ROOSE É., VERNUMIÈRE N., LAUNE P., LOURI J.,
ROVELA R., MARTIAL P., 2004** – *Expérimentation
sur la lutte antiérosive et la revégétalisation
assistée d'un versant décapé de la réserve naturelle
de la Caravelle en Martinique : synthèse et
perspectives.* Rapport IRD-PNRM, Montpellier et
Fort-de-France, 22 p.

Valorisation agricole des déchets domestiques et industriels dans les agrosystèmes en Afrique de l'Ouest et à Madagascar

Dominique MASSE

M. NDIÉNOR

Edmond HIEN

Tovonarivo RAFOLISY

Yacine NDOUR

Alfonse BILGO

Serge HOUST

Christine AUBRY

Introduction

Dans les pays du Sud, l'agriculture demeure une activité primordiale pourvoyeuse de biens alimentaires, mais également de richesse et d'emploi (COUR, 2001 ; DIXON *et al.*, 2001). Confrontés à une augmentation de leur population, et dans un contexte de changements climatiques, ces pays devront pouvoir augmenter leur production agricole de 70 % (FAO, 2006 ; AGRIMONDE, 2009). Gérer la fertilité des sols dans ce contexte est un enjeu essentiel pour pouvoir intensifier la production, tout en préservant leur qualité et les services écosystémiques qu'ils assurent.

L'essai à long terme de la station de Saria au Burkina Faso démontre l'importance des apports organiques dans la gestion de la fertilité des sols tropicaux. Même si l'utilisation d'engrais minéraux permet d'augmenter la production, il n'en demeure pas moins que les rendements ne restent constants au cours du temps qu'avec l'apport régulier de fumier. Par ailleurs, il a été démontré que la viabilité et la productivité des terroirs agricoles au sud du Sahara sont déterminées par l'organisation des flux organiques et de nutriments à l'échelle de ces agrosystèmes.

La démographie des pays du Sud se caractérise non seulement par des taux élevés, mais également par une urbanisation exceptionnelle. Les agricultures urbaines ou péri-urbaines prennent une place de plus en plus importante. Les systèmes de production agricole bénéficient dans ce contexte de la proximité des marchés et des capitaux pour leur développement. Par ailleurs, les villes produisent également d'importantes quantités de déchets domestiques et des produits résiduels organiques issus des industries agroalimentaires. La littérature révèle pour quelques villes africaines une production de déchets urbains solides comprise entre 0,3 kg/personne/jour et 1,4 kg/personne/jour en Afrique subsaharienne. Ainsi, en 2003 on estimait à environ 750 t/jour la quantité de déchets urbains ménagers collectés à Antananarivo, Madagascar. La part organique de ces déchets urbains récoltés à Antananarivo s'élevait à 65-85 % de la matière sèche totale, constituée de 80 % de matières organiques fermentescibles (déchets de cuisine et de jardinage, bois), 11 % de vieux papiers, cartons et plastiques, 9 % de déchets autres (métaux, textiles, verres, déchets toxiques produits en petite quantité). Toujours à Madagascar, la croissance de la population, ainsi que le développement économique ont amené les experts à estimer que la production de déchets augmentera, d'ici 2023, de 30 %, soit une quantité de déchets urbains évalués à 975 t/jour dont 60 % composés de matières organiques. Sur une année, un gisement de 213 525 tonnes de matières organiques est potentiellement recyclable.

La gestion de ces déchets constitue un enjeu environnemental (pollution) et économique (coût de traitements élevé). Relativement riches en éléments fertilisants pour les sols, ces déchets sont une opportunité pour améliorer durablement la production agricole et la qualité des sols cultivés, notamment aux abords des villes. En zone péri-urbaine est apparue ces dernières décennies une intensification de l'utilisation de déchets bruts sur les champs cultivés dans la périphérie de Ouagadougou. D'autres projets locaux ont mis en avant l'exploitation de ces déchets à travers des programmes de compostage de déchets municipaux ou autres déchets provenant de l'industrie agroalimentaire. Il est apparu nécessaire de consolider ou d'acquérir des connaissances scientifiques sur la qualité de ces produits résiduels organiques utilisés comme fertilisant ou amendement dans les systèmes de production agricole.

Depuis 2006, des équipes pluridisciplinaires en Afrique de l'Ouest et à Madagascar mènent des travaux de recherche sur la valorisation de produits organiques issus des déchets domestiques. À partir de trois études menées à

Ouagadougou (Burkina Faso), à Dakar (Sénégal) et à Antananarivo (Madagascar), il sera discuté des potentialités de recyclage des déchets urbains dans les systèmes de culture en zone péri-urbaine.

Effet de composts des déchets urbains sur le rendement du sorgho et les propriétés des sols

La fraction organique regroupe divers produits : restes alimentaires, déchets verts (feuilles et résidus d'élagage des arbres, pelouses), les déchets de cuisine (épluchures et restes de fruits et légumes), les déchets des marchés et centres commerciaux (invendus alimentaires, résidus de fruits et légumes), les effluents organiques provenant des élevages urbains ou péri-urbains. S'ajoutent à ces résidus organiques des déchets de l'industrie de la transformation alimentaire, par exemple les déchets d'abattoir, mais également les vidanges séchées de fosses d'aisance (dans les quartiers populaires), de la sciure de bois des ateliers de menuiserie, etc. De nombreux projets de compostage de déchets urbains ont été réalisés dans les pays en développement depuis plusieurs décennies, mais se sont généralement terminés par un échec. DRESCHER et KUNZE (2001) ont mis en cause une inadaptation des produits organiques obtenus par rapport aux besoins des agriculteurs, horticulteurs ou pépiniéristes dans leurs systèmes de culture ; inadaptation en termes de coût mais également en termes de qualité agronomique. Selon ces auteurs, il était nécessaire de mieux définir les besoins des agriculteurs pour adapter les techniques de compostage.

Expérimentation au champ d'apports de composts de déchets urbains

Au Burkina Faso, à proximité de Ouagadougou (site de Gampéla 12° 24' N ; 1° 21' O), a été menée entre 2007 et 2008 une étude sur l'effet de différents produits issus du compostage de déchets domestiques et urbains sur la production d'une céréale et sur les propriétés du sol. Différents composts associant dans des proportions différentes des déchets de cuisine, d'abattoirs et des déchets verts ont été testés dans un essai factoriel en station. En plus d'un facteur sur la composition des composts était testé un facteur sur le mode d'apport : localisé au niveau de la plante ou épandu sur l'ensemble de la surface. Six composts ont été confectionnés sur la plateforme de compostage du centre de traitement et de valorisation des déchets urbains de Ouagadougou. Ces composts âgés de 16 semaines ont été produits en 2007 en fosse et en 2008 en tas à partir de déchets d'abattoir (DA), de déchets de cuisine (DC), de déchets verts (DV pour

l'essentiel des feuilles de *Kaya senegalensis*), et du papier (P), incorporés dans les mélanges initiaux selon des proportions variables (tabl. 1). Le dispositif expérimental était un plan factoriel à deux facteurs, les composts (six composts et un témoin sans apport de compost) et le mode d'apport (localisé ou épandu), et un facteur répétition en blocs (3). 42 parcelles élémentaires (12,25 m²) ont été disposées selon un plan en *split plot* : le traitement principal étant le facteur « mode d'apport » et le traitement secondaire, le facteur « compost ». La quantité de matière sèche apportée au sol a été fixée à 3 t/ha/an. Le sol était un sol ferrugineux lessivé induré profond selon la classification CPCS. La variété de sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) était une variété améliorée Sariasol14 (Inera). Les poquets de semis étaient distants de 0,8 m entre les lignes de semis et de 0,4 m sur la ligne. Les semis ont été réalisés en juillet et la récolte en novembre. Quatre sarclages manuels ont permis de contrôler les adventices en cours de saison de culture.

Tableau 1
Composition et caractéristiques des composts testés sur une culture de sorgho à Gambéla en 2007 et 2008 et quantité d'éléments apportés.

Paramètres	Composts											
	DA		DA + DC		DA + DC		DA + DC		DC		DV	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Proportions initiales (%)												
DA	50	60	37,5	40	30	30	45	20	0	0	0	0
DV	45	40	45	40	45	40	45	40	45	40	90	100
DC	0	0	12,5	20	20	30	5	40	50	60	0	0
P	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	10	0
Propriétés du compost												
C (g.kg ⁻¹)	266	367	270	376	302	394	280	367	380	317	426	409
C/N ratio	19	13	18	11	21	18	18	20	18	16	26	35
pH H ₂ O	8,9	8,6	8,7	8,8	8,5	8,1	8,7	8,4	8,4	8,5	8,2	8,3
TM (g.kg ⁻¹)	198	54	251	58	186	62	146	44	176	41	361	93
Apports chimiques initiaux (kg.ha ⁻¹)												
Carbone	754	1 041	745	1 037	831	1 084	778	1 020	1 030	859	1 177	1 130
Azote	40	79	41	91	41	55	42	53	57	54	47	33
Calcium	74	85	66	105	69	85	69	131	100	103	83	91
Potassium	20	31	19	36	19	22	19	31	24	24	17	19
Magnésium	9	9	8	11	8	8	6	11	8	8	8	8
Phosphore	23	20	17	19	14	14	17	11	11	11	6	6

DA : déchets d'abattoirs (contenus des panses d'animaux) ; DC : déchets de cuisine (résidus de légumes) ; DV : déchets verts (feuilles des arbres d'espaces verts de la ville) ; P : déchets de papier (bureaux, emballage, etc) ; TM : taux de minéralisation du carbone organique mesuré par incubation en condition contrôlée pendant 90 jours.

Résultats

Les rendements du sorgho et ses composantes (densité des pieds à la récolte, densité des pieds épiés, nombre de panicules, nombre de panicules remplies, poids de 1 000 grains, rendements grain et paille) ont été mesurés. Des prélèvements de sol (0-20 cm) avant la mise en place, et après chaque récolte ont été effectués. Les teneurs en carbone et azote total, ainsi que le pH ont été mesurés. Pour le traitement apport localisé, des échantillonnages à proximité de la plante et à distance moyenne entre deux plantes ont été réalisés.

L'apport de compost a augmenté significativement les rendements (fig. 1), excepté le compost constitué à l'origine de déchets verts (DV). En 2007, l'augmentation était de 51 % à 130 % par rapport au rendement obtenu sur les parcelles sans apport. Les analyses de variance (KABORE, 2011) indiquaient que la qualité des composts interagissait significativement avec le mode d'apport sur les rendements. Ainsi, en 2007, en épandage, les meilleurs rendements ont été obtenus avec les composts les moins stabilisés et/ou avec une faible disponibilité de l'azote minéral. En revanche, en apport local, les meilleurs rendements ont été mesurés pour les composts les plus stabilisés et caractérisés par des teneurs en azote disponible relativement élevées (fig. 1). En 2008, les rendements du sorgho baissaient dans tous les traitements compost relativement à ceux mesurés en 2007, et ce quel que soit le mode d'apport. Cette baisse des rendements en 2008 a été probablement liée à une forte variabilité pluviométrique et/ou à une baisse de fertilité suite aux exportations d'azote en 2007, supérieures aux apports azotés de la même année. En dépit de cette baisse, l'apport des composts a permis d'augmenter par 2 à 5 fois le rendement grain du sorgho comparativement au témoin.

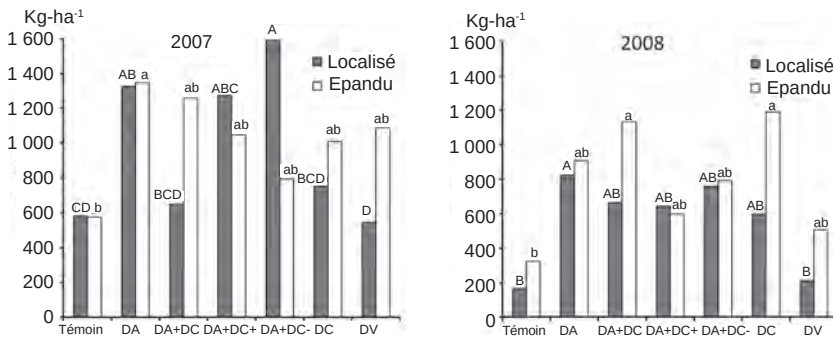


Figure 1

Rendement moyen ($n = 3$) en grain (culture de sorgho) sur des parcelles expérimentales avec apport de composts de composition variée selon deux modes d'apport localisé au niveau de la plante, et épandu sur l'ensemble de la parcelle, en 2007 et 2008 à Gampéla, Burkina Faso. DA : déchets d'abattoirs (contenus des panses d'animaux) ; DC : déchets de cuisine (résidus de légumes) ; DV : déchets verts (feuilles des arbres d'espaces verts de la ville) ; P : déchets de papier (bureaux, emballage, etc). Les moyennes ayant la même lettre indiquée sur chaque histogramme appartiennent à un groupe de valeurs non significativement différentes (LSD, $\alpha = 0,05$). Les lettres minuscules concernent les comparaisons pour le traitement « épandu » et les lettres majuscules pour le traitement localisé.

Selon les paramètres de la régression linéaire (tabl. 2), une corrélation positive apparaissait entre la teneur en phosphore des composts et les rendements des cultures avec un apport localisé. En revanche, pour les apports épandus, le taux de minéralisation des composts agissait positivement sur les rendements obtenus. Les composts de déchets urbains apparaissent comme des alternatives prometteuses et intéressantes pour l'augmentation de la croissance et des rendements des cultures. Cependant, tout compost n'est pas forcément adapté à tout système de culture. Les composts produits dans cette étude présentaient des teneurs faibles en azote et en phosphore. Ce dernier élément, le phosphore, était un élément limitant le rendement si l'apport était réalisé en forte concentration autour de la plante (tabl. 2). De même, selon la technique d'application d'un produit organique, la propriété déterminante, le rendement, peut varier (par exemple, pour des matières épandues, donc en concentration plus faible par unité de surface), plus la matière organique apportée était stable, plus l'effet sur le rendement est positif (tabl. 2).

Il apparaît ainsi clairement qu'il est important d'adapter la qualité du produit organique utilisé comme amendement ou fertilisant au système de culture et à l'itinéraire cultural pour lesquels ce produit est utilisé. Il pourra être nécessaire de combiner les produits résiduels à recycler pour obtenir la valeur agromonomique en adéquation avec son usage.

Tableau 2

Paramètres de la régression linéaire entre les rendements obtenus (2007 et 2008) et les caractéristiques des composts apportés en début de cycle cultural selon deux modes d'apport, localement ou en épandage.
Le modèle testé était : Rendement = Constante + α Propriétés + ε .
Les propriétés des composts sont celles indiquées dans le tableau 1.
Le modèle retenu est le meilleur modèle maximisant la valeur R^2 .

Rendement (mode d'apport)	R ²	Probabilité Test F	Constante (kg.ha ⁻¹)	Variables retenues	α	Probabilité test t : $\alpha = 0$
Localisé	0,383	0,046	730	Phosphore	51	0,019
				Potassium	- 16	0,123
Épandu	0,550	0,011	1 330	C/N	- 30	0,008
				TM	1,6	0,015

Les décharges municipales : un « gisement » de matière organique à exploiter

La gestion des déchets urbains solides est un problème majeur dans les villes au sud du Sahara. Ces villes dont la croissance est très rapide doivent gérer des quantités de déchets de plus en plus importantes. La voie empruntée par ces

ville a été et demeure la mise en dépôt dans des décharges plus ou moins contrôlées. Actuellement, ces décharges sont en général saturées, voire rattrapées par les zones bâties. Elles posent alors d'énormes problèmes environnementaux (pollution de l'air, des eaux, des sols, etc.). À Antananarivo, les déchets urbains solides ont été mis en décharge brute dans le site d'Andralanitra depuis 1966. Ce site d'une superficie de 15 ha continue d'accueillir de nos jours les déchets de la commune urbaine d'Antananarivo. La décharge de Mbeubeuss d'une superficie de 125 à 175 ha reçoit les déchets de l'agglomération dakaroise. On estime à 5 millions de m³ la quantité de matière fermentée cible transformable en criblé de décharge.

Au cours du temps, ces matières organiques se sont minéralisées subissant ainsi une forme de compostage naturel. Des opérateurs informels, voire des associations caritatives exploitent ce gisement de produits résiduels organiques pour fabriquer à partir d'un criblage des parties les plus anciennes de la décharge, un terreau vendu essentiellement pour la fertilisation des sols des espaces verts publics ou privés de la ville. Des tests agronomiques ont été menés à Antananarivo et à Dakar pour évaluer la qualité de ces « terreaux » qui constituent un gisement non négligeable de matières organiques fertilisantes ou pour l'amendement des sols.

Propriétés chimiques des criblés de décharge municipale

Les criblés de décharge sont relativement pauvres en matière organique, notamment en azote total comparativement à des valeurs standards de composts (tabl. 3). Pour un compost, le rapport MO/N et la teneur minimale de MO du criblé de décharge sont généralement fixés respectivement à 40 et à 20 % du produit sec. Dans le terreau d'Andralanitra, le rapport MO/N est de 40,8 ; par contre, la teneur maximale de MO est à 15,8 %, soit des valeurs inférieures aux normes généralement admises. Si on se réfère aux teneurs en matière organique dans les déchets urbains bruts de 65 à 85 %, la faible teneur en MO de ce produit indiquerait un fort processus de minéralisation. Cependant, reconnaissons également que les pratiques de criblage, telles qu'elles sont observées sur les décharges, ne garantissent pas une séparation totale de la matière organique contenue dans ces matériaux. De nombreuses matières minérales qui vont des sables à des matières plastiques, ferreuses ou autres, peuvent se retrouver dans ces terreaux sous forme de particules fines. Ainsi par exemple, la silice serait estimée de l'ordre de 50-60 % de la matière totale (communication personnelle). De même, le brûlis est une pratique courante sur les décharges au Sud et peut augmenter la part de cendres et de charbon de bois dans ces matières. Il serait nécessaire d'approfondir la caractérisation précise du contenu de ce matériau.

En comparaison à des fumiers bovins utilisés par les agriculteurs, le terreau présentait des teneurs plus élevées que le fumier en P₂O₅, MgO et en CaO (tabl. 3). Ces teneurs sont intéressantes dans des sols généralement pauvres en phosphore biodisponible et confèrent aux terreaux de décharge municipale un intérêt comparatif en tant qu'amendement calcique dans les sols acides,

généralement rencontrés dans les sols tropicaux. Le rapport C/N indiquait un produit relativement stable non susceptible d'induire une immobilisation d'une trop grande quantité d'azote, mais également non sujet à une minéralisation rapide avec un risque de perte d'éléments fertilisants par lessivage et/ou lixiviation.

Tableau 3
Propriétés chimiques des fumiers de bovin ou de cheval et des criblés de décharges municipales à Madagascar et au Sénégal.

Paramètres	Fumier de bovin (Madagascar)	Fumier de cheval (Sénégal)	Criblé de décharge d'Andranitra (Madagascar)	Criblé de décharge de Mbeubeuss (Sénégal)
MS (g.kg ⁻¹)	901-908	Nm	918-930	978-995
MO (g.kg ⁻¹)	55-63,31	162,2-181,1	147-158	24,7-68,8
C organique (g.kg ⁻¹)	32-36,8	168-207	82,1-102,0	14-40
N total (g.kg ⁻¹)	13,6-16,8	19,5-26,4	3,6-4,1	1,9-6,4
C/N	20,8-25	11	20,9-25	9-26
P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹)	6,2-8	6,0-14,96	7,9-11	3,6-58,1
K ₂ O (g.kg ⁻¹)	25-28,2	nm	2,9-12,9	3,78
CaO (g.kg ⁻¹)	7-19,3	nm	21,5-31,4	61,6
MgO (g.kg ⁻¹)	4-4,5	nm	3,1-6,5	4,41
pH	9,22	7,19	7,68	7,56
Cd (mg.kg ⁻¹)	nm	nm	0,76	2,66
Cr (mg.kg ⁻¹)	nm	nm	57,3	56,4
Cu(mg.kg ⁻¹)	nm	nm	41,2	172
Hg (mg.kg ⁻¹)	nm	nm	2,87	0,12
Ni (mg.kg ⁻¹)	nm	nm	26,6	25
Pb (mg.kg ⁻¹)	nm	nNm	121	119
Zn (mg.kg ⁻¹)	nm	nm	309	997

MS : matière sèche ; MO : matière organique ; nm : non mesuré.

Expérimentation de l'apport de criblés de décharge

L'agriculture à l'intérieur et autour de la ville d'Antananarivo est très présente. Les bas-fonds sont largement, voire totalement, occupés par la riziculture et les cultures maraîchères. Le développement de cette agriculture passe par la conquête des terres en pente (appelées localement « tanety »). Ces terres sont couvertes par des sols ferralitiques. Que ce soit en culture maraîchère ou pour une mise en culture de terres nouvelles, les apports organiques sont nécessaires. Les criblés de la décharge d'Andranitra sont vendus sous la dénomination

de terreau. Généralement orientés vers les jardins résidentiels ou les espaces de la ville, ces criblés ont été testés sur des cultures de tomate, et sur une culture de céréale (maïs) sur des parcelles non cultivées depuis de nombreuses années et mises en culture.

Apport sur des cultures maraîchères en zone péri-urbaine d'Antananarivo

La figure 2 résume les résultats en termes de rendement (Rdt) obtenus sur une expérimentation où sont comparés des apports de criblés de décharge à des apports organiques conventionnels sur une culture de tomate. Quatre traitements ont été testés sur 10 champs d'agriculteurs de la périphérie d'Antananarivo. Les traitements étaient : T1 : un apport de fumier d'élevage bovin (1 kg par poquet) et trois apports d'engrais minéral (80 g par poquet), T2 : trois apports d'engrais minéral (80 g par poquet), T3 : un apport de criblé de décharge (2,5 kg par poquet) et trois apports d'engrais (80 g par poquet), T4 : un apport de fumier d'élevage bovin (1 kg par poquet) et deux apports de terreau (1,2 kg par apport et par poquet).

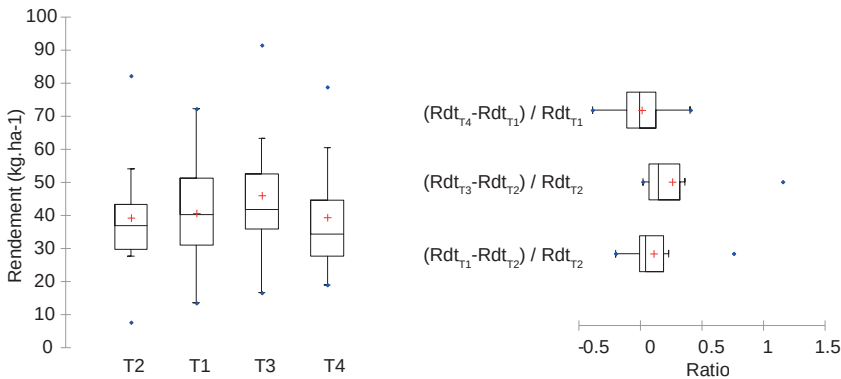


Figure 2

Expérimentation de différents modes de fertilisation d'une culture de tomate.
À droite : représentation en « box plot » des rendements mesurés sur 10 champs pour les différents traitements. À gauche : représentation en box plot des ratios de comparaison des rendements entre traitements.

Les différences de rendements moyens n'étaient pas significatives (fig. 2). En revanche, le gain moyen de rendement lié à l'apport du criblé de décharge par rapport à une fertilisation minérale seule, mesuré par le ratio $(Rdt_{T3} - Rdt_{T2})/Rdt_{T2}$, était significativement positif et de 25,7 % ($p = 0,04$). Le gain moyen du fumier d'élevage de bovin, mesuré par le ratio $(Rdt_{T1} - Rdt_{T2})/Rdt_{T2}$, n'était que de 10,5 %, mais non significativement différent de zéro ($p = 0,240$). Par ailleurs, lorsque le fertilisant minéral était remplacé par du terreau (traitement T4), le gain moyen en rendement par rapport au traitement conventionnel (T1), mesuré par le ratio $(Rdt_{T4} - Rdt_{T1})/Rdt_{T1}$, était nul (fig. 2). Ces résultats indiquaient que, dans ces conditions expérimentales, le terreau

pouvait avoir une valeur équivalente, sinon supérieure à un fumier de bovin. Il est toutefois à noter que cet effet a été obtenu avec des apports en matière sèche supérieurs par rapport au fumier. Par ailleurs, il est à remarquer qu'en moyenne les rendements n'étaient pas significativement moins élevés, lorsque l'on remplace l'engrais minéral azoté par un criblé de décharge. Dans cette situation, ces matières appelées terreau pourraient donc également substituer des engrais minéraux sans effet déprécif en termes de rendement. Il reste cependant à contrôler l'innocuité de ces matières dans un système de culture maraîchère.

Mise en culture des sols ferralitiques des « tanety » en zone péri-urbaine d'Antananarivo

À Lazaina, situé à 20 km d'Antananarivo, sur une parcelle en jachère depuis plus de vingt ans, trois doses d'apport de criblé de décharge (teneur moyenne en C organique 124 g/kg) ont été testées. Les trois niveaux de quantité apportés au sol sur les trois années étaient de : A1 = 3,1 tMS/ha, A2 = 15,5 tMS/ha, et A3 = 32,3 tMS/ha. Ces apports étaient comparés à un traitement fumier d'élevage de bovins (apport de 10,3 tMS/ha sur 3 ans, teneur moyenne en C organique 257 g/kg), et un traitement sans aucun apport organique. Selon un plan factoriel en blocs (4), le facteur apport organique était croisé avec un apport d'engrais minéral complet (300 kg/ha ; 11 N 22 P 16 K). Les rendements en grain ont été mesurés au cours de trois cycles culturaux. La plante cultivée était le maïs. Le sol est un sol ferralitique dont les propriétés physico-chimiques de l'horizon A étaient : argile 250-460 g/kg, carbone total 11,2-14,2 g/kg, azote 0,51-0,79 g/kg, phosphore total 600-829 mg/kg, pH eau 4,3-5,0.

Les rendements en grain mesurés au cours des trois cycles culturaux indiquaient un effet significatif de l'apport d'engrais minéral complet, ainsi que des apports organiques (fig. 3). En l'absence d'engrais minéral, les rendements étaient significativement supérieurs dans les parcelles avec fumier d'élevage de bovins. Dans ce cas, même les apports les plus élevés de criblés de décharge n'ont pas permis d'atteindre les rendements obtenus avec un fumier. En présence d'engrais minéral, l'effet des apports de criblés de décharge était proportionnel à la quantité de matières apportées, avec un minimum requis pour avoir un effet significatif par rapport à une parcelle sans apport organique (fig. 3). En conclusion, sans complément d'engrais minéral, les apports de criblés de décharge doivent être supérieur à 10 t.ha⁻¹ par an. Avec un apport d'engrais, les quantités apportées pourraient être limitées à 5 t.ha⁻¹ par an pour obtenir un effet significatif en production de maïs.

Ces deux expérimentations, l'une dans un environnement d'exploitations agricoles et l'autre, en station montrent clairement que le terreau issu de l'ancienne décharge d'Andralanitra, malgré son caractère très minéral et sa relative pauvreté, était un produit qui pouvait avoir une valeur d'amendement voire de fertilisation. Il convient cependant de définir les principes d'apport et de s'assurer de l'innocuité totale de ce produit.

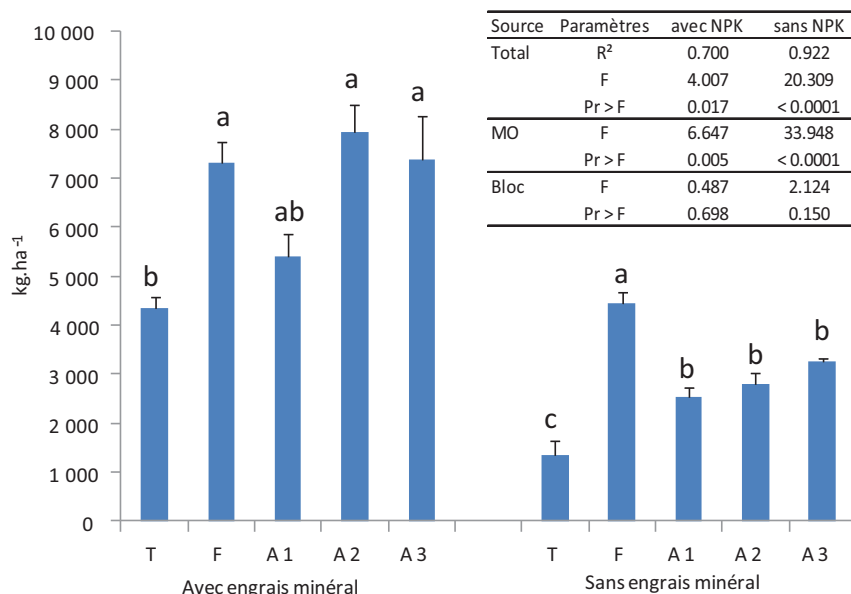


Figure 3

Rendement cumulé de trois années de culture de maïs sur sol ferrallitique amendé annuellement avec du terreau d'Andralanitra (criblé de décharge municipale) à doses croissantes d'apport cumulé sur 3 ans (A1 = 3,1 tMS/ha, A2 = 15,5 tMS/ha et A3 = 32,3 tMS/ha) comparé à des apports de fumier d'élevage de bovins (apport de 10,3 tMS/ha sur 3 ans), et à un témoin sans apport de matière organique, avec apport d'engrais minéral ou non (300 kg/ha ; 11 N 22 P 16 K). Anova ($\alpha = 0,05$) : modèle mixte à deux facteurs MO (apports organiques, facteur fixe) et blocs (facteur aléatoire).

Expérimentation de l'utilisation de criblés de décharge à Dakar en culture maraîchère

La décharge de Mbeubeuss reçoit la plupart des déchets domestiques, municipaux, voire industriels de la ville de Dakar et de sa banlieue depuis 1978. Les criblés de cette décharge municipale font l'objet d'une exploitation commerciale par des opérateurs informels. La vente de ces matières, sous le nom de terreau comme à Madagascar, se fait pour l'essentiel auprès des pépiniéristes et pour les jardins privés ou publics, ainsi que les terrains sportifs. Son utilisation par les agriculteurs, producteurs de légumes ou autres, est plus rare.

En 2010, a été menée à Rufisque une expérimentation pour tester l'effet sur le rendement de parcelles expérimentales cultivées pour la production de tomates. Un apport organique conventionnel (fumier de cheval) était comparé à des apports de terreau selon deux doses : 15 t.ha⁻¹ et 30 t.ha⁻¹. Un traitement sans apport organique était également testé. De l'engrais minéral (azote) a été apporté en trois apports (81 N kg.ha⁻¹).

Les résultats indiquaient que le rendement en tomate était le plus élevé pour le traitement dit conventionnel avec apport de fumier de cheval (fig. 4). Par rapport à un témoin sans apport organique, le rendement avait doublé. L'apport de terreau ne permettait pas d'atteindre les rendements obtenus dans les parcelles avec apport de fumier de cheval. Seule la dose élevée (30 t.ha⁻¹) a permis une légère augmentation de rendement par rapport à un témoin sans apport. Cette absence d'effet positif s'expliquait par des propriétés chimiques nettement différentes entre le fumier de cheval traditionnellement utilisé et le criblé de la décharge de Mbeubeuss. Pour ce dernier, Il est à noter les faibles teneurs en matière organique dues à une richesse relative en matière minérale (pour l'essentiel des sables), ainsi qu'en azote total (tabl. 3).

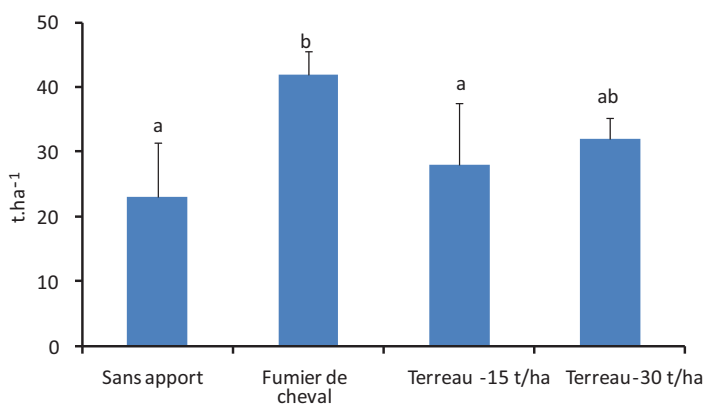


Figure 4

Rendement en tomate sur des parcelles expérimentales avec ou sans apport de matières organiques. Les matières organiques testées étaient le fumier de cheval (15 t.ha⁻¹), le criblé de la décharge de Mbeubeuss (ou terreau) aux doses de 15 t.ha⁻¹ (Terreau-15) ou 30 t.ha⁻¹ (Terreau-30). Les traitements avec apport de matière organique comportaient également un apport d'azote minéral de 81 kgN.ha⁻¹ en trois apports. Les lettres indiquent les résultats d'une anova et un test de comparaison de moyenne (test Newman & Keuls). Les moyennes non significativement différentes portent la même lettre. Les barres d'erreur représentent l'écart type (n = 3).

Discussion et conclusions

Les résultats de ces différentes études ont montré qu'en termes de production agricole, les matières organiques issues de ces déchets pouvaient avoir des effets significatifs sur des rendements de plantes cultivées. Les effets positifs de l'utilisation des matières organiques en général, et en particulier des composts des déchets urbains ménagers sur la production végétale et l'amélioration de la fertilité du sol, sont très souvent soulignés.

Les effets positifs de l'apport de compost ou des criblés de décharge peuvent être attribués à leurs propriétés chimiques. Comme tout produit organique, ils contiennent une richesse relative en éléments chimiques directement disponibles pour la plante, ou disponibles après minéralisation. Ces matières organiques ont bien entendu également les effets généralement attribués aux matières organiques dans les sols : amélioration de la structure des sols, augmentation du pH, de l'activité biologique. D'autres rôles plus complexes peuvent intervenir comme l'augmentation de la capacité de rétention en eau.

Toutefois, ces effets étaient variables selon la nature des produits organiques résiduels. Les criblés de la décharge de Mbeubeuss sont nettement moins riches en matière organique, comparativement à ceux de la décharge municipale d'Antananarivo. La nature des déchets compostés jouent un rôle sur la composition finale du compost. Ainsi, une des conclusions des travaux au Burkina Faso était la relative pauvreté en azote des composts de déchets urbains renvoyant à la faiblesse des teneurs en azote des composés initiaux. La recherche d'une ressource azotée sera donc nécessaire pour améliorer ces composts de déchets urbains. De même, le phosphore contenu dans les sols tropicaux est soit en très faible quantité comme dans les sols ferrugineux du Burkina Faso, soit très peu disponible comme dans les sols ferralitiques de Madagascar. Les résultats observés au Burkina Faso indiquent clairement que les teneurs en phosphore des composts peuvent déterminer le rendement. Il est alors nécessaire d'améliorer les composts en phosphore, ce qui pourrait être envisagé en y ajoutant des phosphates d'origine minière disponibles par exemple au Burkina Faso. La disponibilité du phosphore pour les plantes pourrait être améliorée par une stimulation des symbioses mycorhiziennes. Des études sur le rôle des produits organiques sur le potentiel de mycorhizogène des sols devront être menées dans les conditions des agrosystèmes tropicaux.

Il convient également de prendre en compte les systèmes de culture, ainsi que les conditions environnementales, notamment les types de sol. Ainsi, au-delà de la qualité agronomique des matières, les conditions pédoclimatiques locales où sont utilisées ces matières constituent un facteur important. Leur effet peut être exprimé ou masqué. En Europe, les expérimentations sur la valorisation agricole des déchets urbains, de diverse nature, sont certes plus avancées, mais concernent des déchets urbains compostés généralement par voie industrielle, avec des expérimentations sur leur usage dans les conditions des agricultures industrielles. Ainsi, la notion d'apport localisé n'est généralement pas considérée. Or, nos résultats indiquent que la qualité du produit organique résiduel apporté au sol interagit avec son mode d'application. Il est à noter que les normes disponibles d'homologation des produits organiques à usage agricole sont établies sur des critères d'agriculture de type industriel. Ces normes de valeur agronomique devraient être vérifiées dans les conditions des systèmes de culture des pays du Sud prenant en compte leur spécificité.

Des travaux menés en Afrique indiquent que les agriculteurs sont peu incités à utiliser des composts pour des raisons liées au prix, au temps alloué à la

fabrication, à la distance séparant le lieu de compostage et les champs, etc. La variabilité des propriétés des matières organiques testées et de leur impact sur la production végétale montrent qu'il est nécessaire d'identifier au plus précis les besoins des agriculteurs en termes non seulement économiques, mais également en agronomiques. Seule cette condition permettra de garantir la réussite d'un projet de valorisation agricole des déchets municipaux ou industriels. Enfin, les risques sanitaires devront être pris en compte. Même si ils sont peu prégnants jusqu'à maintenant, du fait d'une relative faiblesse des sources de pollution liée à la nature initiale des déchets domestiques, la convergence des modes de consommation entre les pays du Sud et du Nord amènera à une augmentation des risques sanitaires liés au recyclage des déchets dans les villes au Sud.

Bibliographie

AGRIMONDE, 2009 – *Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable*. Inra-Cirad, France.

AGUILAR F. J., GONZALEZ P., REVILLA J., DE LEON J.-J., PORCEL O., 1997 – Agricultural Use of Municipal Solid Waste on Tree and Bush Crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67 : 73-79.

CHAPUIS-LARDY L., RAMIANDRISOA R. S., RANDRIAMANANTSOA L., MOREL C., RABEHARISOA L., BLANCHART E., 2009 – Modification of P availability by endogeic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy Highlands. *Biology and Fertility of Soils*, 45 : 415-422.

COUR J. M., 2001 – The Sahel in West Africa: countries in transition to a full market economy. *Global Environmental Change*, 11 : 31-47.

CPCS, 1967 – *Classification des sols*. Grignon, France, éd. C. P. d. C. d. Sols, École nationale supérieure d'agronomie, 96 p.

DANSO G., DRECHSEL P., FIALOR S., GIORDANO M., 2006 – Estimating the demand for municipal waste compost via farmers' willingness-to-pay in Ghana. *Waste Management*, 26 : 1400-1409.

DIXON J., GULLIVER A., GIBBON D., 2001 – *Farming Systems and Poverty: Improving Farmers' Livelihoods in a Changing World*. Rome, FAO, Italie.

DRECHSEL P., KUNZE D., 2001 – *Waste composting for urban and peri-urban agriculture: closing the*

rural-urban nutrient cycle in sub-Saharan Africa. Wallingford, UK, IWMI, FAO, Cabi Publishing.

DUPONNOIS R., FOUNOUNE H., MASSE D., PONTANIER R., 2005 – Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, 207 : 351-362.

FAO, 2006 – *World agriculture: towards 2030-2050. Interim report. Prospects for food, nutrition, agriculture and major commodity groups*. Rome, ed. G. P. S. Unit, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

HIEN E., 2004 – *Dynamique du carbone dans un acrisol ferrique du Centre-Ouest-Burkina : influence des pratiques culturelles sur le stock et la qualité de la matière organique*. Montpellier, France, École doctorale biologie intégrative, École nationale supérieure agronomique.

HIEN E., GANRY F., OLIVER R., MASSE D., FELLER C., BALESDENT J., 2008 – Matière organique du sol et productivité végétale sous différentes pratiques agricoles : essai de longue durée et modélisation de la dynamique du carbone dans un environnement soudano-sahélien. *Terres Malgaches*, 26 : 133-136.

HIEN E., KABORE T., BILGO A., SALL S., MASSE D., 2010 – Chemical and microbial properties of farmer's field soils fertilized with municipal solid wastes without pretreatment in the peri-urban zone

of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of biological and chemical sciences*, 4 : 1110-1121.

HOUOT S., CLERGEOT D., MICHELIN J., FRANCOU C., BOURGEOIS S., CARIA G., CIESIELSKI H., 2002 – Agronomic value and environmental impacts of urban composts used in agriculture. In Insam H., Riddech N., Klammer S. (eds) : *Microbiology of Composting*, Springer : 457-472.

KABORE W.-T. T., HIEN E., ZOMBRE P., COULIBALY A., HOUST S., MASSE D., 2011 – Organic substrates recycling in the sub-urban agriculture of Ouagadougou (Burkina Faso) for soils fertilization: description of the different actors and their practices. *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement*, 15 : 271-286.

MANDO A., OUATTARA B., SOMADO A. E., WOPEREIS M. C. S., STROOSNIJDER L., BREMAN H., 2005 – Long-term effects of fallow, tillage and manure application on soil organic matter and nitrogen fractions and on sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. *Soil Use and Management*, 21 : 25-31.

MANLAY R., CHOTTE J., MASSE D., LAURENT J., FELLER C. 2002 – Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 88 : 249-269.

MANLA R. J., ICKOWICZ A., MASSE D., FELLER C., RICHARD D., 2004 – Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna-II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79 : 83-107.

MKHABELA M. S., WARMAN P. R., 2005 – The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106 : 57-67.

MONTEMURRO F., MAIORANA M., CONVERTINI G., FORNARO F., 2005 – Improvement of soil properties and nitrogen utilisation of sunflower by amending

municipal solid waste compost. *Agron. Sustain. Dev.*, 25 : 369-375.

MUSTIN M., 1987 – *Le compost. Gestion de la matière organique*. Paris, François Dusbusc.

NDIENOR M. 2006 – *Analyse des modes de gestion de la fertilisation dans les systèmes maraîchers de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar). Étude de l'intérêt agronomique de l'utilisation de déchets urbains dans ces systèmes*. Paris, INAPG.

NDIENOR M., AUBRY C., RABEHARISOA L. 2011 – Stratégies de construction de la fertilité des terres par les agriculteurs dans les systèmes maraîchers périurbains d'Antananarivo (Madagascar). *Cah. Agric.*, 20 : 280-293.

NZIGUHEBA G., TOSSAH B. K., DIELS J., FRANKE A. C., AIHOU K., IWUAFOR E. N. O., NWOKE C., MERCKX R. 2009 – Assessment of nutrient deficiencies in maize in nutrient omission trials and long-term field experiments in the West African Savanna. *Plant and Soil*, 314 : 143-157.

PIERRAT A., 2006 – *La gestion des déchets à Tananarive : étude de la valorisation des déchets urbains en produits fertilisants. Approche géographique*. Mémoire de master 1 en géographie, univ. Paris-I La Sorbonne-Panthéon, 193 p.

REED S., TOWNSEND A., TAYLOR P., CLEVELAND C., 2011 – « Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils ». In Bünemann E., Oberson A., E. Frossard E. (eds) : *Phosphorus in Action*, Springer Berlin Heidelberg : 339-369.

SEH NGOUN E., OMOKO M., SIMON S., 2010 – « Impacts agronomiques, économiques et environnementaux de quelques amendements organiques à Nkolondom (Yaoundé Cameroun) ». In Roose É. (éd.) : *Lutte antiérosive : efficacité pour la restauration des sols et la protection contre les pluies cycloniques*, Marseille, IRD Éditions, sur CD-Rom, 470 p.

SOUMARÉ M., TACK F. M. G., VERLOO M. G., 2003 – Characterisation of Malian and Belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application. *Waste Management*, 23.

Performances des engrais minéraux et organiques sur la production de laitue et sur la fertilité d'un sol maraîcher à Nkolondom (Yaoundé, Cameroun)

Emmanuel SEH NGOUN

Michel OMOKO

Serge SIMON

Introduction

Problématique

Le diagnostic de la fertilité des sols du Cameroun fait ressortir d'une part, une faible fertilité due aux conditions naturelles et d'autre part, un déclin de la fertilité résultant du mode de gestion inappropriée des sols qui, de manière insidieuse, induit la dégradation des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de ceux-ci (GOLCHIN *et al.*, 1995 ; TEJADA *et al.*, 2006). Parmi les causes les plus fréquentes de cette baisse de fertilité, on peut citer la pauvreté en éléments nutritifs et surtout celle en matière organique. Cette dernière entraîne des conséquences défavorables, telles que la fragilisation de la structure des sols et l'augmentation de la susceptibilité à l'érosion.

NGNIKAM (2000) estime la masse d'ordures ménagères produite dans la ville de Yaoundé à 1 076 tonnes par jour. Tous les acteurs impliqués dans la gestion de ces déchets cherchent des moyens pour assurer la propreté de cette ville et

préserver leur environnement. Par ailleurs, l'agriculture familiale camerounaise représente 95 % des exploitations agricoles du pays (MINADER, 2005). L'une des contraintes à cette activité est le renchérissement des engrais minéraux sur le marché local. La mise sur pied des alternatives aux méthodes de fertilisation conventionnelle (telles que l'usage des engrais minéraux) constitue un moyen de préserver la sécurité alimentaire et de lutter efficacement contre le coût élevé de la vie. Dans ce contexte, il serait judicieux de s'interroger sur l'intérêt de l'usage des amendements organiques comparativement aux engrais minéraux.

Objectifs de l'étude

La présente étude se propose d'évaluer :

- les performances de quelques fertilisations sur la production de la laitue ;
- les performances de ces fertilisations sur l'évolution de la fertilité du sol ;
- les impacts économiques et environnementaux de ces fertilisations.

Localisation de la zone d'étude

Cette étude a été conduite au Cameroun dans la zone péri-urbaine de Yaoundé. Les essais en champ se sont déroulés dans le bas-fond de Nkolondom (11° 25' E-11° 35' E et 3° 50' N-4° 00' N, altitude de 750 m). Les sols dominants sont hydromorphes en fond de vallée et ferrallitiques sur les pentes. Le paysage est parsemé de grosses collines (altitude de 700 m). Le climat local est équatorial guinéen à quatre saisons, caractérisé par une pluviosité annuelle de 1 510 mm et une température moyenne annuelle de 23 °C. La végétation est celle d'une forêt dégradée par l'activité humaine. Le maraîchage constitue l'activité principale des agriculteurs de la localité. On note aussi la pratique de l'élevage de la volaille dans quelques familles.

Matériel et méthodes

Matériel

Le matériel végétal utilisé est la laitue (*Lactuca sativa*), variété « Blonde de Paris ». Deux amendements organiques et des engrais minéraux ont été également utilisés comme matières fertilisantes. Il s'agit d'un compost issu d'ordures ménagères, d'un fumier de poulet de chair, d'urée et d'engrais complexe NPK de formulation 20 10 10 et 12 14 19.

Les analyses des échantillons des sols et des amendements organiques ont été effectuées au laboratoire d'analyse des sols, plantes, engrais et eaux (Laspee)

de l'Irad de Nkolbisson-Yaoundé. Les logiciels utilisés sont les suivants : Microsoft Word, Microsoft Excel, Minitab 15 et SAS.

Méthodes

Le potentiel agronomique des matières fertilisantes a été évalué par la méthode décrite par DAVIDESCU et DAVIDESCU (1982). Cette méthode est basée sur l'expérimentation au champ, complétée par des analyses chimiques de sol et des amendements organiques.

Huit fertilisations (tabl. 1) ont été constituées à partir des amendements organiques et des engrais minéraux. Les performances de ces fertilisations sont évaluées à travers le rendement frais de la laitue pendant deux cycles de culture, dans un dispositif en bloc complet randomisé à quatre répétitions. L'évolution de la fertilité du sol qui en résulte est évaluée à travers la variation du niveau de fertilité des parcelles avant et après culture. L'analyse économique de ces fertilisations est effectuée à partir du ratio du coût de la fertilisation sur le rendement frais.

Tableau 1
Composition des traitements expérimentés.

Types de fertilisations	Code	Premier cycle de culture	Second cycle de culture
Témoin	T0	AUCUNE FERTILISATION	AUCUNE FERTILISATION
Pratique paysanne	T1	Fumure d'entretien : 3,8 kg/m ² de fumier poulet de chair + 54,2 g/m ² de 20 10 10	Fumure d'entretien : 3,8 kg/m ² de fumier poulet de chair + 54,2 g/m ² de 20 10 10
Fumier de poulet de chair (F)	T2	Fumure de fond : 4,8 kg/m ² de fumier poulet de chair	AUCUNE FERTILISATION
Compost d'ordures ménagères (C)	T3	Fumure de fond : 47 kg/m ² de compost	AUCUNE FERTILISATION
Engrais minéral (E)	T4	Fumure de fond : 54,2 g/m ² de NPK 12 14 19 Fumure d'entretien : 37,5 g/m ² de NPK 12 14 19	Fumure d'entretien : 37,5 g/m ² de NPK 12 14 19
Compost + Engrais minéral (C + E)	T5	Fumure de fond : 27,8 kg/m ² de compost Fumure d'entretien : 10 g/m ² d'urée	Fumure d'entretien : 10 g/m ² d'urée
Fumier + Engrais minéral (F + E)	T6	Fumure de fond : 2,8 kg/m ² de fumier de poulet de chair Fumure d'entretien : 37,5 g/m ² de NPK 12 14 19	Fumure d'entretien : 37,5 g/m ² de NPK 12 14 19
Compost + Fumier + Engrais minéral (C + F + E)	T7	Fumure de fond : 13,9 kg/m ² de compost + 1,4 kg/m ² de fumier de poulet de chair Fumure d'entretien : 10 g/m ² d'urée	Fumure d'entretien : 10 g/m ² d'urée

L'unité expérimentale est une parcelle de 2 m x 1 m. La production de chaque parcelle expérimentale était obtenue à partir de 12 plants récoltés au centre de la parcelle. Les échantillons de sol ont été prélevés sur un profil de 20 cm.

L'analyse de la variance et de la régression a été effectuée par le test de FISCHER (1950), selon la procédure GLM (*General Linear Model*). La séparation des moyennes a été effectuée selon LSD (*Least Significant Difference* qui est une application du t-test). Toutes les probabilités ont été appréciées au seuil de 5 %.

Résultats et discussions

Caractéristiques des parcelles avant culture

Les résultats issus de l'analyse des échantillons de sol prélevés sur le site d'étude avant la mise en place des essais sont présentés au tableau 2.

Tableau 2
Caractéristiques des parcelles avant culture.

Type d'analyse	Caractéristiques	Valeurs observées
Granulométrie (en %)	Argile	26,9
	Limon fin	5,9
	Limon grossier	8,8
	Sable fin	13,1
	Sable grossier	43,1
Classe texturale (FAO)	LAS (limono-argilo-sableux)	
Matière organique (en %)	M.O.totale	4,64
	C.O.	2,70
	N total	0,21
	C/N	12,86
Acide phosphorique BRAY II (en mg/kg)	Phosphore assimilable	3,29
Bases échangeables (en cmol/kg)	Ca ²⁺	5,60
	Mg ²⁺	1,05
	K ⁺	0,52
	Na ⁺	0,05
	S	7,22
	CEC	8,79
	S/ CEC	82,14
Acidité/Alcalinité (1 : 2,5)	pH-eau	6,5
	pH-KCl	6,2

Le sol sur lequel l'essai a été conduit est hydromorphe avec une texture sablo-argilo-limoneuse. Conformément au guide proposé par BEERNAERT et BITONDO (1992), ce sol présente un niveau de fertilité élevé, notamment en matière organique. Ce niveau de fertilité résulte de la forte pratique du maraîchage.

Cependant, la teneur en phosphore assimilable reste très faible. Malgré cette richesse en matière organique, un apport supplémentaire se justifie compte tenu de la minéralisation rapide de la matière organique en zone tropicale.

Caractéristiques des amendements organiques expérimentés

Les caractéristiques des amendements organiques testés sont présentées au tableau 3.

Tableau 3
Caractéristiques des amendements organiques expérimentés.

Caractéristiques	Compost d'ordures ménagères	Fumier de poulet de chair	Compost de Yaoundé Ngnikam et al. (1995)	Compost de Cotonou Was et al. (1996)	Compost de France Brula et al. (1995)	Norme Afnor (2006)
MS en % MB	86,11	70,62				< 30
MO en % MB	9,77	15,14	17,7	16	48,5	> 20
C.O. en % MB	5,68	8,80	13,6	8,4	26,3	
N total en % MB	0,52	0,61	0,85	0,30	0,96	Somme N, P ₂ O ₅ et K ₂ O < 3 %
N-NH ₄ en mg/kg	16	42,30				
C/N	10,9	14,4	16	25	26,4	
P ₂ O ₅ en mg/kg	36,10	14,59				
K ⁺ en meq/100 g	1,98	5,32				
Ca ²⁺ en meq/100 g	11,16	0,86				
Mg ²⁺ en meq/100 g	2,04	2,50				
CEC en meq/100 g	18,64	30,22				
S en meq/100 g	15,26	9,19				
S/CEC	81,87	30,41				
pH-eau	7,4	7,9				

Les données du tableau 3 montrent que le compost de France (BRULA *et al.*, 1995) est plus riche que les composts africains. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'en France, les normes de production sont beaucoup plus rigoureuses qu'en Afrique. Comparé aux composts de Yaoundé (NGNIKAM *et al.*, 1995) et de Cotonou (WASS *et al.*, 1996), les amendements organiques utilisés dans l'essai sont de mauvaise qualité, notamment en ce qui concerne la teneur en matière

sèche et la teneur en matière organique. La médiocre qualité de ces amendements a pour origine la présence importante de terre, sans doute introduite lors des retournements de tas confectionnés sur sol nu et non sur une dalle bétonnée.

Performances des fertilisations sur la production de la laitue

L'analyse de la variance montre qu'aucun effet bloc n'est mis en évidence au seuil de probabilité de 5 %. Au contraire, les traitements expérimentés ont eu un effet très hautement significatif sur le rendement de la laitue et sur le coût de fertilisation par unité de laitue produite. Les performances obtenues des différents traitements sont présentées au tableau 4.

Tableau 4
Performances des fertilisations sur le rendement frais de la laitue.

Types de fertilisation	Rendement frais de laitue (en kg/m ²)		
	Cycle 1	Cycle 2	Cumul (1 + 2)
Sans fertilisation	1,7 c	1,2 g	2,9 c
Pratique paysanne	2,7 b	4,4 a	7,2 a
Fumier (F)	2,7 b	2,8 c	5,6 b
Compost (C)	2,6 b	2,4 d	5,1 b
Engrais minéral (E)	1,9 c	1,7 f	3,7 c
C + E	2,6 b	2,2 e	4,9 b
F + E	3,1 a	3,4 b	6,6 a
C + F + E	2,7 b	2,1 e	5,5 b

Les valeurs suivies d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité de 5 %, selon le test LSD.

Sur la base du rendement cumulé, ces traitements sont classés comme suit : pratique paysanne ≥ fumier + engrais > fumier ≥ compost ≥ compost + engrais ≥ compost + fumier + engrais > engrais ≥ témoin. Ces résultats montrent que l'apport des amendements organiques améliore le rendement frais de la laitue. Les meilleures performances sont obtenues lorsque ceux-ci sont associés aux engrais minéraux. Des résultats similaires ont déjà été obtenus par Terman *et al.* (1973), ainsi que par Nzila *et al.* (2007) sur l'amarante potagère (*Amaranthus cruentus*).

Performances des fertilisations sur l'évolution de la fertilité du sol

Après deux cycles de culture de la laitue, des prélèvements de sols ont été effectués sur les parcelles expérimentales. Après analyse, les résultats obtenus ont été comparés à la fertilité initiale des parcelles. Les variations obtenues sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5
Évolution des caractéristiques du sol après fertilisation.

Types de fertilisations	Évolution des caractéristiques du sol							
	MO (en %)	N totale (en %)	C/N	P ₂ O ₅ (en g/kg)	K ₂ O (en g/kg)	S (meq/100 g)	CEC (meq/100 g)	pH-eau
Pratique paysanne	0,57	+ 0,07	- 2,04	- 3	+ 0,39	+ 1,28	+ 2,70	0
Compost d'ordures ménagères (C)	+ 3,34	+ 0,13	+ 0,79	- 23	- 0,26	+ 16,74	+ 4,60	+ 1,2
Fumier de poulet de chair (F)	+ 0,86	+ 0,10	- 2,54	- 43	+ 0,17	+ 3,08	+ 2,73	+ 0,4
Engrais minéral (E)	- 0,34	+ 0,03	- 2,44	- 20,5	- 0,20	+ 0,03	+ 2,43	- 0,1
C + E	+ 3,22	+ 0,14	+ 0,20	- 56	+ 0,28	+ 10,82	+ 3,74	+ 1,3
F + E	+ 0,73	+ 0,06	- 1,31	- 55	+ 0,18	+ 0,28	+ 2,91	- 0,4
C + F + E	+ 0,76	+ 0,06	- 1,23	- 51	- 0,01	+ 3,28	+ 2,66	+ 0,6

Ces résultats montrent que contrairement à l'engrais minéral, l'épandage des amendements organiques permet de restaurer en deux cycles de culture de salade la fertilité du sol, notamment en azote et en matière organique. Cet effet est meilleur avec le fumier de poulet qu'avec le compost de ville. À masse égale, le fumier améliore la teneur en azote 10 fois plus et la teneur en matière organique 2,5 fois plus que le compost. L'apport de la matière organique qui résulte de l'épandage de ces amendements améliore la stabilité du sol et réduit ainsi sa sensibilité à l'érosion. En plus, ces épandages améliorent la capacité de rétention en eau du sol, ainsi que sa perméabilité et sa cohésion.

Cependant, il a été observé une baisse de la teneur en phosphate malgré les différentes fertilisations ; cette baisse est pratiquement deux fois plus importante avec le fumier qu'avec le compost. Contrairement au compost, l'épandage du fumier a amélioré la teneur en potasse des parcelles.

Il a été observé une augmentation de la somme des bases échangeables et de la capacité d'échange cationique (CEC) résultant des différentes fertilisations appliquées. Les meilleures performances ont été obtenues sur les parcelles ayant reçu du compost. Les performances les plus faibles sont observées sur les parcelles fertilisées à l'engrais minéral. Le compost améliore cinq fois plus la somme des bases cationiques que le fumier.

Analyse économique des fertilisations

Les coûts de fertilisation par unité de production sont présentés au tableau 6.

Du tableau 6, on peut déduire le prix de la fertilisation par m² et par kg de salade produit.

Le classement montre que l'engrais minéral est plus rentable que les amendements organiques (fientes ou compost de ville) pour lesquels le rapport prix/qualité est défavorable, surtout pour le compost urbain pauvre en nutriments.

Tableau 6
Performances des traitements expérimentaux sur le coût de fertilisation.

Nature	kg/m ²	Prix de vente (€/kg)	Coût total euro/m ²	Rdt salade kg/m ²	Coût Fertil. /kg salade
Témoin = 0	0	-	0	2,2	0 g
Fumure (fientes) paysanne NPK = 20-10-10	8 0,108	0,06 0,56	0,50	5,5	0,09 d
Fientes de poulet	5	0,06	0,27	4,2	0,07 e
Compost	47	0,06	2,87	3,7	0,77 a
Engrais minéral NPK = 12-14-19	0,129	0,72	0,09	2,8	0,03 f
Compost + Urée	28 0,020	0,06 0,58	1,71	3,7	0,46 b
Fumier + engrais 12-14-19	3 0,075	0,06 0,72	0,21	5,0	0,04 f
Fumier + compost (fond) + urée	1 14 20	0,06 0,06 0,58	0,94	3,6	0,26 c

La meilleure rentabilité est obtenue par la fertilisation minérale pure (la plus légère) et ensuite par la combinaison des fientes avec un engrais minéral NPK bien équilibré par rapport aux besoins des cultures.

La qualité insuffisante du compost pour améliorer les rendements et son coût de vente trop élevé pénalisent l'emploi de cet amendement organique.

Risques sanitaires des amendements organiques

Quatre échantillons composites d'amendements organiques ont été analysés au centre Pasteur de Yaoundé. Les observations montrent que l'usage du compost et du fumier de poule ne présentent pas de danger microbiologique pour la population rurale. Deux échantillons ont été analysés au laboratoire Laspee de l'Irad de Dchang. Les teneurs en métaux lourds (cuivre, zinc, plomb) sont très en dessous des seuils définis par l'Afnor (2006). L'épandage de ces deux amendements organiques ne semble donc pas, à court terme, présenter de risque de contamination du sol.

Conclusions et recommandations

La présente étude compare les performances des NPK minéraux, compost urbain, fumier de poule et composites sur la production de laitue et sur l'évolution de la fertilité du sol. Le traitement et l'analyse des données d'un essai en champ

complété par des analyses en laboratoire montrent que l'épandage des amendements organiques présente un double intérêt :

- ils permettent d'améliorer le rendement frais de la laitue, notamment lorsque ses amendements sont associés aux engrais minéraux ;
- par une élévation des teneurs en azote, en matière organique, en somme de bases échangeables et en CEC, ils permettent de restaurer la fertilité du sol.

Le facteur limitant au développement de leur usage réside dans leur coût élevé comparé à celui des engrais minéraux, même si ceux-ci n'ont qu'un effet fugace sur la fertilité des sols. Afin d'améliorer la rentabilité de ces amendements et favoriser leur adoption en milieu paysan, il est indispensable :

- d'améliorer la qualité du compost d'ordures ménagères en respectant les normes de production afin d'éviter en particulier les contaminations de terre ;
- de rapprocher les sites de production des bassins d'utilisation finale que sont les bas-fonds agricoles ;
- d'associer aux amendements organiques les compléments minéraux, en particulier phosphatés, indispensables pour optimiser la production maraîchère durable.

Bibliographie

AFNOR, 2006 – *Qualité des sols, méthodes de prélèvement d'échantillon de terre*. Norme française homologuée, 80 p.

BEERNAERT F., BITONDO D., 1992 – *Simple and practical methods to evaluate analytical data of soil profiles*. CUDs Dschang, Soil Science Department, 66 p.

BRULA P., NAQUIN P., PERRODIN Y., 1995 – *Étude bibliographique des rejets des différentes techniques de traitement de résidus urbains. Vol. 2. L'incinération et la décharge*. Lyon (France) Insa valor. Division Polden, Ademe (Anger), 74 p.

CIPCRE, 1997 – *Projet pilote de compostage des ordures ménagères dans la ville de Bafoussam*. Rapport d'exécution, 70 p.

DAVIDESCU D., DAVIDESCU V., 1982 – *Evaluation of fertility by plant and soil analysis*. British Library Cataloguing in Publication Data, 379 p.

FISCHER A., 1950 – *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, Edinburgh. *Proc. amer. soc. hort. sci.* : 78-90.

GOLCHIN A., CLARKE P., OADES J. M., SKEJMSTAD J. O., 1995 – The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Austr. J. Soil Res.*, 33 : 975-993.

MINADER, 2005 – *Stratégie nationale de développement du sous-secteur engrais et d'amélioration durable de la productivité des sols au Cameroun*. Rapport, Cameroun, 40 p.

NGNIKAM E., 2000 – *Évaluation environnementale et économique des systèmes de gestion des déchets solides : analyse du cas de Yaoundé au Cameroun*. Thèse doct., Insa Lyon, France, 217 p.

NGNIKAM E., NDOUMBE N. H., WETHE J., 1995 – *Mise en place de dix compostières dans les quartiers de Yaoundé : animation et participation de la population*. Réseau africain du compost, compte rendu de la première conférence. Dakar, 60 p.

NZILA J. D., WATHA-NDOUDY N., NTANGOU M., 2007 – *Impact de la fertilisation organique et minérale sur la production des cultures maraîchères (Basella alba et Amaranthus cruentus) sur sols*

sableux de la région de Brazzaville (Congo).
CRCRT, Congo-Brazzaville : 87-88.

TEJADA M., HERMANDEZ M. T., GARCIA C., 2006
– Application of two organic amendments on soil restoration: effects on the soil biological properties.
J. Environ. Qual., 35 : 1010-1017.

TERMAN.G. L., SOILEAU J. M., ALLEN S. E., 1973
– Municipal waste compost: effects on crop yields

and nutrient content in greenhouse pot experiments.
J. Environ. Qual., 2 : 84-89.

WAAS E., ADJADEME N., BIDAUX A., 1996 –
Valorisation des déchets organiques dans les quartiers populaires des villes africaines. Genève-Suisse, Fonds suisse de la recherche scientifique ; module 7, Développement et Environnement. Crepa, Iagu et Sandec, 143 p.

Rôle des cultures associées pour restaurer la productivité des sols du nord-ouest du Cameroun

Serge VALET

Objectifs

Le XXI^e siècle doit faire face au défi d'alimenter à moyen terme 9 milliards d'humains, tout en améliorant la productivité des sols. Pour cela, il faut pallier la dégradation des sols due à l'intensification agricole qui a été imposée au début du XX^e siècle. L'échec de l'intensification de la monoculture vivrière, récemment reconnue, est expliqué en partie par quelques agronomes (VALET, 1980, 2004) : « Les agronomes ont été formés pour éradiquer les écosystèmes pour créer un système artificiel, simplifié et forcé par l'introduction d'une grande quantité d'engrais et de pesticides » (GRIFFON, 2007). Il faut également prendre en compte le renchérissement du prix des engrais minéraux, la spéculation sur les produits alimentaires, la location de longue durée des terres aux multinationales et la mondialisation de la politique, qui créent un nouveau contexte remettant en cause les pratiques agricoles actuelles. De plus en plus, des chercheurs se penchent sur les cultures associées traditionnelles innovantes dont la supériorité par rapport aux mêmes monocultures semble ne plus faire contestation. En effet, les associations représentent des systèmes agroforestiers et sylvo-pastoraux tant recherchés par certains agronomes (VALET, 2004 ; ROOSE et NDAYIZIGYIE, 1994 ; BALDY et STIGTER, 1993 ; DUPRIEZ et DE LEENER, 2003). Les associations culturales produisent une biomasse plus importante que les monocultures dont une très grande partie reste au sol. Elle assure un « turn over organique » facilité par la prolifération de la microfaune/flore. Les hauts plateaux et montagnes de l'Ouest-Cameroun, entièrement colonisés par



a : cultures associées dans une forêt galerie du Cameroun.

© S.Valet

*b : cultures associées sur un versant du Cameroun :
bananiers, maïs, caféiers, divers légumes, arbustes, etc.*

© S.Valet

les cultures associées traditionnelles et innovantes, offrent le meilleur exemple de la variété des combinaisons possibles d'écosystèmes empiriquement utilisés par les paysans.

Pour comprendre et vérifier comment les cultures associées peuvent restaurer la productivité des sols tropicaux et assurer une production soutenue supérieure aux monocultures, l'étude a porté sur : 1) des essais de fertilisation minérale et organique comparée sur les principales cultures vivrières en monocultures et en association ; 2) les services écosystémiques qui expliquent les réponses obtenues et 3) les conséquences socio-économiques.

Milieu et méthodes

Localisation

Les essais ont été conduits dans l'Ouest-Cameroun, en régions Bamiléké et Bamoun, sur deux axes, de Dschang à Foumban et de Dschang à Bambui et sur un site de moyenne altitude à Kondjock sur quatre zones homo-climatiques (VALET, 2004).

Le climat

L'Ouest-Cameroun forme un groupe de régions très diversifiées à climats variés et souvent contrastés (VALET, 1980). La pluviosité moyenne annuelle diminue du sud au nord de plus de 2 500 mm à 1 450 mm (1921-1968), mais augmente au voisinage des massifs montagneux (tabl. 1). L'ETP moyenne annuelle augmente de 1 120 mm à 1 445 mm. L'insolation augmente de 1 650 h à 2 400 h à l'inverse de la pluviosité. Ainsi, les régions les moins arrosées correspondent à celles qui sont les plus chaudes, à plus fort pouvoir évaporant, ce qui conduit à des risques de sécheresse climatique, voire édaphique en sol peu profond, sur pente forte. Les températures moyennes annuelles diminuent avec l'altitude (tabl. 1).

Tableau 1
Zonation géoclimatique (1921-1968).

Provinces et Zones homo-climatiques	Lieux	Altitude m	P mm moy.	T °C moy.	Insolation h moy.
IId- Chaude et pluvieuse	Kondjock	600	2 500	24	1 650
IIle- Fraîche et brumeuse	Bambui	1 800	2 400	16	1 500
IIId- Douce, relativement sèche	Dschang	1 400	1 900	19	1 900
IIlb-Très chaude, très ensoleillée	Foumbot	1 100	1 675	22	2 400

Source : VALET, 1980.

La géologie

La variabilité pétrographique (roches volcaniques acides et basiques, roches métamorphiques et sédimentaires) conduit à une différenciation, tant géomorphologique que pédologique, par suite des réponses différentes des roches à l'altération et à l'érosion.

Les sols

Les formations géologiques les plus anciennes (socle et basalte ancien) portent des sols ferrallitiques (rouges et jaunes) les plus altérés, alors que les plus récentes ont donné des sols faiblement ferrallitiques brun-rouge sur la série éruptive moyenne et des sols jeunes noirs et bruns sur la série supérieure. La fertilité des sols varie pour le C % de 9 et 9,8 (Kondjock, Bambui), 2,8 et 8,8 (Dschang P2, P5), 2,4 (Babungo), 7,4 (Bansoa), 10 (Galim) et 7,8 (Foumbot) et pour la somme des cations échangeables (méq/100 g) : de 1,8 (Kondjock, Bambui), 8,8 et 10,8 (Dschang P2, P5), 10 (Babungo), 17,3 (Bansoa), 22 (Galim) et 31,5 (Foumbot). Presque tous ces sols étant bien structurés, à forte porosité (de 50 à 70 % en surface et encore de 40 à 50 % dans l'horizon B) et à capacité d'infiltration satisfaisante, ils sont considérés comme ayant une sensibilité faible à moyenne à la dégradation.

Traitements

Les essais de fertilisation minérale et organique à doses croissantes ont été réalisés sur les quatre principales cultures vivrières gérées en cultures pures et en associations bi et tri-spécifiques. (VALET, 2004).

Variétés

Maïs : variétés locales et hybrides (Mexican5, Cuban yellow) ; soja : Coker240 et Z290 ; soja (Cola), taro, macabo et haricot de variétés locales.

Densité et indice d'occupation des sols (IOS)

La densité du maïs est de 40 000 pieds/ha, 10 000 pour les tubercules et pour les légumineuses de 125 000 à 250 000 pieds/ha. Les IOS (IOS = densité de la 1^{re} culture en association : densité de la monoculture + densité de la 2^e culture en association/densité de la monoculture + etc.) sont de 1,49 pour les associations bi et tri-spécifiques. Les semences sont traitées à l'aldrigranox.

Fertilisation minérale

Les 28 essais « courbe de réponse » ont reçu des doses de fertilisation minérale (urée ou sulfate d'ammonium ; phosphate bicalcique ; chlorure de potassium) à des doses variant de 0 à 200 U/ha pour le N et de 0 à 400 U/ha pour le P₂O₅ pour les monocultures et de 0 à 80 ou 120 U/ha pour les associations. Les essais,

en sols riches, ne recevaient qu'un apport complémentaire de K. Le nombre de répétitions varie de 4 à 8 (VALET, 2004).

Fertilisation organique

- Fumier de bovins : essai à doses croissantes (0 à 150 U/ha) comparé aux mêmes doses d'un engrais minéral sur maïs.
- Écobuage traditionnel : enfouissement de résidus végétaux dans une grosse butte et combustion lente. Essai à doses croissantes (0 à 200 U/ha) de P_2O_5 appliqué sur maïs. L'écobuage ne doit être réalisé que tous les cinq ans minimum.
- Bois raméal fragmenté (BRF) : les émondes de *Cassia stipulata*, *siamea* & *spectabilis* des haies sont épandues sur niébé local sur 5 cm d'épaisseur.

Résultats

Fertilisation minérale

Association tri-spécifique (maïs-macabo-taro)

Les rendements du maïs augmentent avec les doses de N et de P_2O_5 pour atteindre des maxima plus rapidement, donc à plus faibles doses, en association qu'en cultures pures (fig. 1A, B et C). Ces doses de N sont de 80 U/ha environ contre 150 U/ha respectivement en association et en cultures pures et de 80 contre 120 à 300 U/ha de P_2O_5 en cultures pures (VALET, 2007). Les rendements sont plus faibles en associations de 1 à 40 % environ selon la fertilité des sols. Pour les tubercules en association les doses maxima de N varient de 30 à 60 U/ha contre 100 U/ha en pure avec des rendements de 40 % inférieurs pour une baisse moyenne de 50 % de N.

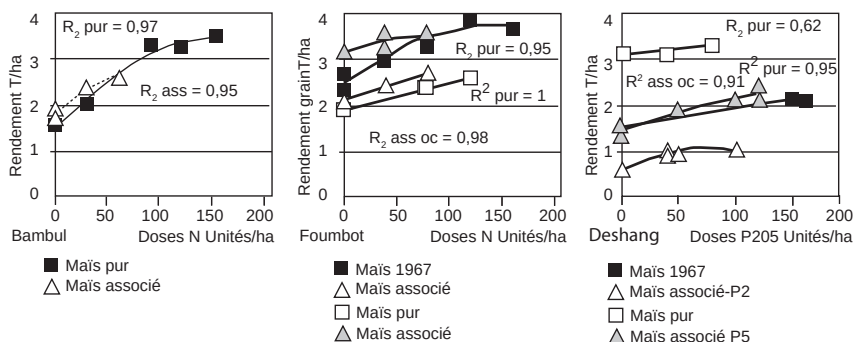


Figure 1

Comparaison des rendements du maïs en monoculture et en association avec macabo + taro sur des sols de faible à très forte fertilité pour différentes doses d'engrais azoté et phosphaté.

Association bi-spécifique (maïs-haricot et maïs-soja)

Pour le maïs associé au haricot, les doses maxima de N sont inférieures à 80 U/ha, alors qu'elles dépassent 80 U/ha en culture pure. Pour le haricot, les doses dépassent 80 U/ha pour les deux systèmes culturaux.

L'association maïs-soja montre pour le maïs une réponse linéaire à l'azote et avec un maximum de 40 à 80 U/ha pour P_2O_5 . Les rendements moyens du maïs en association sont de 5 t/ha et en pur de 7,1 t/ha, soit une différence de 25 % ; ceux du soja sont de 1 t/ha et en pur de 2,4 t/ha, soit une baisse de 60 %. Ceci est obtenu avec des baisses de fertilisant de 30 %.

L'association maïs-soja, en mélange et interligne, montre un effet antagoniste, à l'exemple de l'association maïs-arachide (fig. 2A) (VALET, 2004). Mais les rendements restent toujours supérieurs de 30 % aux cultures pures. L'association maïs-haricot montre une bonne facilitation des deux espèces (fig. 2B). Cette forte baisse de N diminue ses pertes par lessivage et pollution des sols et des eaux.

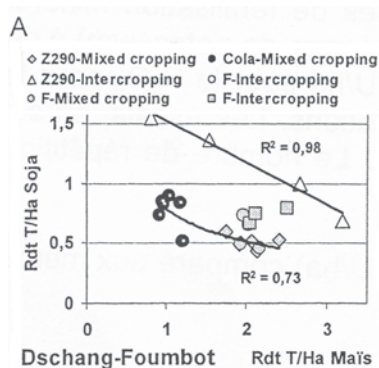


Figure 2a

Corrélation des rendements du maïs et des rendements du soja en association.

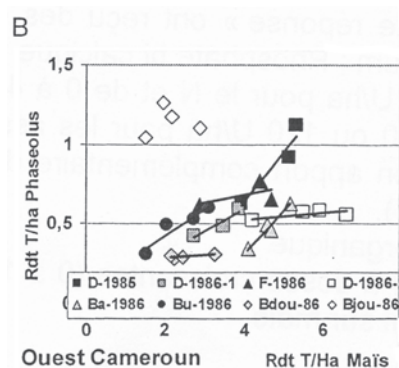


Figure 2b

Corrélation des rendements du maïs et des rendements du haricot en association.
Lieux = D : Dschang ; Ba : Bansoa ; Bu : Bamendjou ;
Bdou : Bamendou ; Bjou : Bandjou.

Fertilisation organique

Fumier de bovins

En monoculture, la réponse à la fumure organique et minérale, au même niveau de N, donne des rendements identiques en maïs jusqu'à 150 U/ha. L'ajout de 10 t/ha de matière organique déplace la dose maximum de N à 200 U/ha avec une augmentation minime du rendement.

Écobuage traditionnel

Pratiqué seulement tous les cinq ans, l'écobuage maximise les apports de P_2O_5 et fournit une augmentation spectaculaire de 3 à 5 t/ha du maïs-grain pour une dose de 200 unités/ha.

Bois raméal fragmenté

KALEMBA et NDOKI (1995) ont démontré que l'épandage d'émondes de *Cassia stipulata*, *siamea* & *spectabilis* fournissait des rendements en niébé de même valeur que la dose de 50 unités/ha de NPK. Le meilleur rendement (406 kg/ha) résultait de l'association BRF de *C. stipulata* avec l'engrais minéral.

Discussion

Indice d'équivalence de l'efficacité de la fertilisation (IEEF)

La création d'un Indice d'équivalence de l'efficacité de la Fertilisation ou IEEF [(IEE (N-P) = Efficacité de N et de P de la culture associée 1/Efficacité de N et de P de la monoculture 1 + Efficacité de N et de P de la culture associée 2/Efficacité de N et de P de la monoculture 2 + Efficacité de N et de P de la culture associée 3/Efficacité de N et de P de la monoculture 3)] permet de porter un jugement objectif et quantifié de l'effet des engrais minéraux sur le système cultural des associations. L'efficacité de la fertilisation représente le rendement par unité de fertilisant (N et P_2O_5). Pour les taros et macabos non testés, une estimation moyenne (Taro = 15 t/ha et macabo = 20 t/ha) a été utilisée pour le calcul de l'IEEF. Cette estimation est pour certains sites bien supérieure aux résultats que l'on aurait pu avoir. Les IEE sont de 2,4 à 3,5 fois plus importants pour le N et de 1,4 fois plus importants pour le P_2O_5 en associations qu'en monocultures (tabl. 2).

Tableau 2
Indice d'équivalence de l'efficacité de N et P_2O_5 des associations.

Fertilisation minérale	Doses Kg/ha	IEE Maïs-macabo-taro	Doses Kg/ha	IEE Maïs soja	IEE Maïs-haricot
N	75-90	3,06 (9)*	40	3,53 (6)	2,36 (5)
P_2O_5	75-100	1,42 (3)	50	1,45 (2)	1,93 (1)

* (9) nombre d'essais.

Ces résultats s'expliquent par certains services écosystémiques que les plantes s'échangent entre elles et qui sont maximisés par le travail cultural manuel. En effet, les gros billons favorisent l'installation et le développement des systèmes racinaires et de la symbiose microbienne grâce à leurs exsudats. Ils assurent un meilleur ameublissement du sol avec l'accroissement de la porosité totale sur une plus grande profondeur (75 cm au lieu de 45 cm sous labour/billonnage mécanisé) et évitent l'engorgement du sol (VALET, 2004).

Services écosystémiques

Le concept de services écosystémiques (SES) (processus par lesquels les agro-écosystèmes produisent des bénéfices pour la société) fournit un cadre analytique plus complet pour comprendre le fonctionnement des cultures associées.

Le foisonnement racinaire (Root Equivalent Ratio)

Il varie de 1,2 à 1,6, voire plus (BALDE, 2011), fonctionnant à des échelles de temps et d'espace différentes, il assure une utilisation plus efficace des nutriments et de l'eau du sol. L'association d'espèces différentes peut stimuler le développement fongique intra-racinaire qui favorise la nutrition minérale et hydrique (DERELLE, 2012).

Le contrôle des maladies et parasites

L'association culturale a beaucoup d'avantages sur le contrôle des maladies et parasites grâce à l'effet de barrière horizontale et verticale : il permet de masquer les plantes aux insectes, de diluer le vecteur, de modifier les températures et l'insolation favorables à la montée dans la tige (ALTIERI *et al.*, 1978 ; BALDY et STIGTER, 1993). Ainsi dans l'association maïs-soja, l'attaque du soja en pur a provoqué l'augmentation du IEEF à 10 à Foubot et à 4 à Bansoa. La multiplicité des pollens et des nectars attirerait les prédateurs des parasites (BUKOVINSKY *et al.*, 2005).

L'asphyxie des adventices

Elle est d'autant plus efficace que la densité des cultures est plus élevée.

L'accroissement de la fourniture en N et P

L'accroissement de la fourniture en N et P grâce à l'augmentation des résidus agricoles, des remontées profondes par les arbres, de l'atmosphère et la baisse de sa lixiviation expliquent les rendements en maïs en association identiques à ceux de la monoculture avec deux fois moins d'engrais minéral ou organique environ (ROOSE et NDAYIZIGYIE, 1994 ; NJOKU *et al.*, 1984). En systèmes agroforestiers, on observe une stabilisation, voire une augmentation de la somme de la matière organique (KOWAL et TINKER, 1959). La symbiose des bactéries et microchampignons favorise une exploitation améliorée du sol avec optimisation de la productivité (DERELLE, 2012).

Pour le phosphore, l'association culturale a un meilleur accès aux différentes formes de P, notamment la forme organique du P par suite de la baisse du pH (BETENCOURT *et al.*, 2010). De plus, une part du léger apport de P serait stockée par des bactéries ; elle est ensuite récupérée suite à leur prédation. Le résultat global est une lutte plus efficace qu'en monocultures contre l'érosion et l'effet de serre, aboutissant à la régénération des sols par des éléments organo-minéraux simples ou complexes stables (BARTHÈS et ROOSE, 2002 ; PEICHL *et al.*, 2006). Concernant les sols peu fertiles, minces, pentus, l'association culturale peut

assurer une meilleure protection et une utilisation efficacement soutenue. L'effet des bactéries et des mycorhizes explique ainsi la possibilité de réduire drastiquement les intrants de synthèse (GIANINAZZI, 2012). Ce système cultural de maximisation des services écosystémiques permet donc, avec moins d'intrants, de produire plus par unité de surface.

Conséquences socio-économiques

Dans le cas du système agraire des associations multiétagées, l'économie en intrants (fertilisation, biocides) et en équipement agricole, l'utilisation supérieure du sol en temps et en surface, la variété des sous-systèmes agraires et la souplesse dans le choix des cultures expliquent les meilleurs bénéfices obtenus. VALET (2007) a démontré que la monoculture de maïs, de soja et arachide sont majoritairement déficitaires au contraire de la monoculture de tubercules (fig. 3). Les bénéfices augmentent avec le nombre de plantes. Avec 12 plantes les bénéfices atteignent 132 500 CFA (cours 1970 : 1 CFA = 200 F), soit 406 euros. Dans les associations, les cultures de cycle court permettent de financer des cultures de cycle plus long selon les potentiels climatiques, topographiques et géo-pédologiques. Ces associations culturales, plus riches en protéines et vitamines, offrent des solutions innovantes pour remplacer ces intrants de plus en plus coûteux et fortement polluants par des mécanismes d'amplification des processus écologiques gratuits et sains.

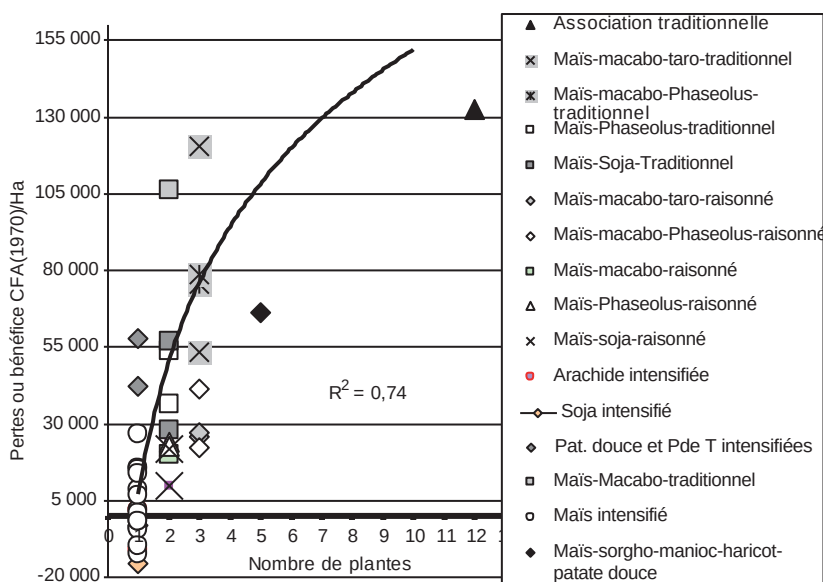


Figure 3

Évolution des pertes et des bénéfices (CFA-1970) en fonction des systèmes de culture : monoculture, bi-tri et multispécifique traditionnel, raisonné et intensifié au Cameroun (1970).

Source : VALET, 2007.

Conclusions : perspectives

Ainsi, face aux défis nouveaux que l'agriculture, l'élevage et la forêt doivent relever, GRIFFON (2007) indique que l'agriculture doit effectuer une nouvelle révolution technologique dans ses systèmes et ses modes de culture et d'élevage. Les associations multiétagées traditionnelles innovantes, grâce à la maximisation des processus biophysiques, offrent les meilleures chances pour assurer l'alimentation de 9 milliards d'humains en 2050. Car ces cultures associées traditionnelles sont capables d'assurer une résilience satisfaisante éco(agro)systémique qui leur assure une durabilité réelle face à une perturbation ou à une série de perturbations naturelles et anthropiques. En effet, les différents services qu'apportent les associations par rapport aux monocultures contrecarrent les risques climatiques, parasitaires, érosifs, qui entraînent l'épuisement organo-minéral du sol, de la société et de l'économie. Ils assurent efficacement non seulement l'alimentation familiale, mais aussi des revenus durables. L'amélioration des systèmes traditionnels sera aisée, car cela ne perturbera absolument pas les paysans puisqu'il y a continuité de leurs principales pratiques. Ces systèmes traditionnels multispécifiques permettent de contrer les variations des cours des matières premières en bourse grâce à leur souplesse. Ils auront aussi l'avantage essentiel de maintenir les jeunes, diplômés ou non, au pays et de baisser la pression démographique dans les villes : ceci assurera le maintien de la cohésion sociale (LAMANDA, 2005). L'un des enjeux de cette intensification écologique des éco-agrosystèmes est la nécessité de renforcer la recherche agronomique sur ces systèmes multispécifiques, combinant des concepts et des outils à la fois écologiques, microbiologiques, géographiques, agronomiques, agro-pédologiques et socioéconomiques pour arriver à la connaissance la plus fine de leurs multiples interactions. L'innovation, déjà entreprise par les paysans depuis 1950, peut se continuer en favorisant les interactions incessantes entre les « *savoirs empiriques* » traditionnels innovants, logiques et stratégiques des paysans et les « *savoirs savants* », analytiques et prédictifs des scientifiques.

Bibliographie

ALTIERI M., FRANCIS C., VAN SCHOONHOVEN A.,
DOLL J., 1978 – A review of insect prevalence in
maize (*zea maise* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris*)
polycultural systems. *Field Crops Res.*, 1 : 33-49.

BALDE A., 2011 – *Analyse intégrée du partage des
ressources (eau, azote et rayonnement) et des
performances dans les systèmes de culture en relais
sous semis direct en zones tropicales subhumides.*
Thèse, Centre international d'études supérieures en
sciences agronomiques, Montpellier, 160 p.

BALDY C., STIGTER C., 1993 – *Agrometeorology
of multiple cropping in warm climate.* Paris, Inra,
236 p.

BARTHÈS B., ROOSE É., 2002 – Aggregate stability
as an indicator for soil susceptibility to runoff and
erosion; validation at several levels. *Catena*, 47 :
133-149.

BETENCOURT E., COLOMB B., CORDIER F.,
GUILLERÉ C., JUSTE E., SOUCHE G., HINSINGER

- P., 2010** – « Soil phosphorus pool differs when durum wheat is grown alone or intercropped with pea or fababean in low versus high-input conditions ». Agro-2010, XIth Congress, Montpellier, August 29-September 3 : 169-170.
- BUKOVINSZKY T., VAN LENTEREN J., VET E., 2005** – *Functioning of natural enemies in mixed cropping systems*. Taylor and Francis group, 125 p.
- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R., PARUELO J., RASKIN R., SUTTON P., VAN DEN BELT M., 1997** – The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 : 253-260.
- DERELLE D., 2012** – « Effet des associations de plantes sur la symbiose mycorhizienne et réponse spécifique des plantes à la mycorhization ». XIV^e colloque scientifique « Alliances au pays des racines », Société nationale d'horticulture de France, Paris : 17-19.
- DUPRIEZ H., DE LEENER PH., 2003** – *Arbres et agricultures multiétagées d'Afrique*. Paris, L'Harmattan, CTA, Terres et Vie, 280 p.
- GIANINAZZI S., 2012** – « La biotechnologie des mycorhizes à arbuscules en horticulture ». XIV^e colloque scientifique « Alliances au pays des racines », Société nationale d'horticulture de France, Paris : 14-16.
- GRIFFON J., 2007** – Lettre d'information, 22, Cirad, 1 p.
- HULUGALLE N., WILLATT S., 1987** – Seasonal variation in the water uptake and leaf water potential of intercropped and monocropped chillies. *Expl. Agric.*, 23 : 273-282.
- KALEMBA L., NDOKI N., 1995** – « Effets d'émondes arbustives et d'engrais minéraux sur le rendement du niébé en cultures en couloirs ». Symposium régional sur la recherche et le développement dans les zones tropicales humides d'Afrique centrale et de l'Ouest, Yaoundé, Cirad, Montpellier : 231-237.
- KOWAL J., TINKER P., 1959** – Soil changes under a plantation established from high secondary forest. *Journal West African Institute Oil Palm Research*, 2 : 376-389.
- LAMANDA N., 2005** – *Caractérisation et évaluation agroécologique de systèmes de culture agroforestiers : une démarche appliquée aux systèmes de culture à base de cocotiers (Cocos nucifera L.) sur l'île de Malo, Vanuatu*. Institut national agronomique Paris-Grignon, discipline : science agronomique, 230 p.
- PEICHL M., THEVATHASAN N., GORDON A., HUSS J., ABOHASSAN R., 2006** – Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 66 : 243-257.
- NJOKU B. O., IGBOKWE M. C., OHIRI A. C., 1984** – « Leaching losses and recovery of fertilizer nitrogen in cassava/maize intercrop grown in lysimeter ». Proc. 6th Symposium Int. Soc. Trop. Root Crops, 288 p.
- ROOSE É., NDAYIZIGYIE FR., 1994** – « L'agroforesterie, la fertilisation minérale et la GCES au Rwanda ». In Roose É. (éd.) : *Introduction à la GCES*, Bull. Pédol. FAO, 70 : 309-326.
- VALET S., 1980** – *Notice explicative des cartes : cartes de zonation géo-climatique (1/400 000), des pentes des paysages agroécologiques (1/200 000) et de mise en valeur agricole des paysages agroécologiques de l'Ouest-Cameroun (1/400 000)*. Montpellier, Gerdar-Irat, 117 p, 8 cartes.
- VALET S., 2004** – Effet de la sécheresse sur les associations culturales vivrières de l'Ouest-Cameroun. *Sécheresse* (J. Libbey Eurotext), 4 (11) : 239-247.
- VALET S., 2007** – « Les associations culturales traditionnelles améliorées : une alternative écologique à l'intensification agricole face au changement climatique, démographique et à la "mondialisation" ». In Roose É., Albergel J., Laouina A., Sabir M. (éd.) : *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi arides*, Enfi-IRD-AUF francophonie, Réseau E-GCES de l'AUF, conférence Isco Marrakech, 14-19 mai 2006 : 152-163.

Gestion des micro-organismes symbiotiques pour une restauration durable de la productivité des agrosystèmes tropicaux et méditerranéens

Claudine FRANCHE

Robin DUPONNOIS

Introduction

La surexploitation des ressources naturelles aboutit principalement à une altération des caractéristiques écologiques du milieu dont les premiers symptômes tangibles sont enregistrés au niveau de la strate épigée (faible densité de recouvrement, diversité appauvrie, baisse de la productivité de l'agrosystème, etc) (PIÉRI, 1991). Ces dégradations facilitent également les processus d'érosion hydrique et éoliens qui se manifestent par une altération des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols (baisse de la teneur en matière organique et en éléments minéraux, altération de la structure du sol, etc) (REQUENA *et al.*, 2001). Il a également été clairement établi que la microflore tellurique était particulièrement affectée par ces processus érosifs tant au niveau de sa structure (abondance, diversité génétique) que de sa diversité fonctionnelle (GARCIA *et al.*, 1997). Parmi les composantes microbiennes sensibles à ces dégradations figurent les champignons mycorhiziens (DUPONNOIS *et al.*, 2001). Ces symbiotes fongiques sont considérés comme des éléments clés dans le fonctionnement du sol, et plus particulièrement dans les milieux arides et

semi-arides (BRUNDRETT, 1991). La symbiose mycorhizienne améliore significativement la croissance de la plante en favorisant sa nutrition minérale et son état sanitaire (SMITH et READ, 2008). Il a été démontré que l'établissement de la symbiose mycorhizienne influençait également quantitativement et qualitativement les caractéristiques de la microflore tellurique (abondance, diversité génétique et fonctionnelle) conduisant à la formation d'un compartiment microbien spécifique communément appelé « mycorhizosphère » (DUPONNOIS *et al.*, 2005). Elle a aussi un impact positif sur l'établissement des endosymbioses racinaires fixatrices d'azote tant avec les légumineuses que les plantes actinorhiziennes. L'ensemble de ces résultats montre que la symbiose mycorhizienne doit être considérée comme une composante majeure dans l'établissement de pratiques culturales visant à assurer une gestion durable des terres.

Ce chapitre a pour principaux objectifs de proposer des critères d'intervention visant à promouvoir durablement le potentiel infectieux mycorhizogène des sols en présentant quelques exemples de pratiques culturales susceptibles d'assurer le maintien du fonctionnement de la symbiose mycorhizienne au sein d'agrosystèmes plus ou moins dégradés.

En fonction de l'ampleur des perturbations enregistrées, la gestion du potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) du sol peut être envisagée selon les stratégies suivantes :

- agroécosystème dégradé : gestion du PIM *via* la mise en place de techniques culturales appropriées visant à promouvoir l'impact de la symbiose mycorhizienne sur la productivité de l'agrosystème (restauration et réhabilitation) ;
- agroécosystème très gravement dégradé : adoption de la technique de mycorhization contrôlée associée à l'introduction d'espèces végétales et de symbiotes mycorhiziens exotiques au milieu.

Ces stratégies seront plus particulièrement développées en prenant comme modèles biologiques les plantes fixatrices d'azote (légumineuses, espèces actinorhiziennes telles que les Casuarinaceae) connues pour pouvoir se développer dans des conditions environnementales hostiles (carences en azote minéral) et pour améliorer la fertilité des sols (plus particulièrement en azote) et la productivité de l'agrosystème (VAN DER HEIJDEN *et al.*, 2006).

La gestion du potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) par la valorisation de la biodiversité végétale locale

La rotation culturale basée sur la succession légumineuses/céréales aboutit généralement à une élévation du PIM et de la teneur en N biodisponible et à une amélioration de la qualité sanitaire du milieu de culture (ex : effet antagoniste

contre les nématodes phytoparasites) (BAGAYOKO *et al.*, 2000). La conjugaison de ces impacts aboutit à une amélioration significative de la productivité de la culture de céréales associée à cette rotation culturale (BAGAYOKO *et al.*, 2000). De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de ces rotations culturales légumineuses/céréales sur les teneurs en azote biodisponible pour les plantes (PIERCE et RICE, 1988). Toutefois et dans les zones arides et semi-arides, les carences en phosphore sont considérées comme les principaux facteurs limitant la productivité des cultures céréalières. Dans ce contexte, les conséquences sur l'environnement tellurique des rotations culturales associant des successions légumineuses/céréales pourraient favoriser l'enrichissement du sol en P biodisponible (ALVEY *et al.*, 2001). Outre l'incidence des légumineuses sur les caractéristiques abiotiques du milieu favorisant la mobilisation du P soluble à partir des formes de phosphate inorganique (OHWAKI et HIRATA, 1992), ces plantes peuvent également améliorer le PIM du sol et faciliter l'expression de la symbiose mycorhizienne sur le développement de la culture céréalière (BAGAYOKO *et al.*, 2000). En étudiant une rotation culturale associant le niébé (*Vigna unguiculata*) et le mil au Niger, BAGAYOKO *et al.* (2000) ont montré que cette pratique culturale améliorait en moyenne le rendement en grains de la culture céréalière de 22 %. Ces effets bénéfiques étaient fortement corrélés aux taux de colonisation des symbiotes fongiques sur les racines de mil.

La mycorhization contrôlée

Il est maintenant parfaitement admis que le développement optimal d'une plante est atteint lorsque le taux d'infection mycorhizienne est élevé (GARBAYE, 1988). De nombreux travaux ont également démontré que l'effet de la mycorhization dépendait des symbiotes associés. Ces résultats ont permis de définir une pratique culturale, appelée « mycorhization contrôlée », basée sur la sélection de souches fongiques performantes suivant un paramètre donné (ex : amélioration de la croissance, résistance au stress salin, etc.) pour améliorer les performances de systèmes culturels agricoles ou forestiers. L'efficacité de la mycorhization contrôlée est fonction de deux paramètres principaux : la fertilité du sol et les caractéristiques du potentiel mycorhizien du site. Cette technique d'inoculation est donc particulièrement efficace dans des milieux gravement dégradés (ex : remblais, sites miniers) où la diversité et l'abondance des propagules mycorhiziennes sont très faibles. Cette stratégie de réaffectation du milieu trouve sa pleine expression en foresterie ou en agroforesterie, alors que des contraintes techniques limitent son utilisation chez les plantes de grande culture (ex : production importante d'inocula fongiques, etc.). De nombreux essais expérimentaux d'inoculation contrôlée ont été réalisés dans les milieux méditerranéens et tropicaux présentant des degrés de dégradation importants comme la fixation des dunes côtières ou la phytostabilisation des sites post-miniers en utilisant des

espèces exotiques d'arbres fixateurs d'azote à croissance rapide comme les acacias, filaos, etc. (DOMMERGUES *et al.*, 1985). Cette conception de la valorisation de la symbiose en sélectionnant des symbiotes performants, compétitifs vis-à-vis de la microflore native et fréquemment inoculés à des espèces exotiques, a été remise en question ces dernières années, du fait principalement de la démonstration de l'importance de la conservation de la diversité des peuplements de champignons mycorhiziens pour assurer un fonctionnement optimal du sol. En effet, DABIRE *et al.* (2007) ont montré que l'introduction dans le sol d'une souche de champignon mycorhizien hautement compétitrice pouvait entraîner une baisse significative de la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique et donc fragiliser le sol en regard de contraintes environnementales.

La nodulation contrôlée

Dans certaines zones dégradées des régions arides et semi-arides, des expériences d'introduction des espèces ligneuses de la famille des Casuarinacées ont été entreprises (ZHONG *et al.*, 2011). Originaires d'Australie et du sud-est de l'Asie, ces arbres à croissance rapide et aux usages multiples sont caractérisés par une plasticité du système racinaire qui leur permet de s'associer à la fois avec des champignons ectomycorhiziens, des champignons mycorhiziens à arbuscules et avec le micro-organisme fixateur d'azote *Frankia*. Utilisés en agroforesterie, ou encore pour protéger les zones littorales des typhons et stabiliser les dunes, les Casuarinas contribuent à fixer jusqu'à 60 kg d'azote par hectare et par an (DIOUF *et al.*, 2008). Le développement des nodosités racinaires abritant *Frankia* est le résultat d'un échange de signaux spécifiques produits à la fois par la plante et par le micro-organisme (FRANCHE et BOGUSZ, 2011). Si ceux-ci sont encore mal caractérisés, on sait en revanche qu'il existe une spécificité d'hôte et que certaines souches de *Frankia* isolées à partir de l'espèce *Casuarina glauca* seront par exemple incapables de noduler l'espèce *Allocasuarina verticillata*. L'inoculation en pépinière avec les souches de *Frankia* appropriées constitue donc un préliminaire indispensable dans le cas où le sol est dépourvu des endosymbiotes spécifiques, ce qui est une situation fréquente en Afrique pour les Casuarinacées. En complément de ce traitement, la sélection des champignons endomycorhiziens et (ou) ectomycorhiziens compatibles avec les espèces sélectionnées assurera le succès des projets de plantation (DUPONNOIS *et al.*, 2003).

Conclusions et perspectives

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre montre que la gestion du potentiel mycorhizien du sol constitue une approche performante pour améliorer la qualité des sols méditerranéens et tropicaux. Cependant, cette

pratique d'ingénierie écologique doit être raisonnée en fonction des caractéristiques du milieu, mais également en fonction des objectifs affichés (restauration, réhabilitation ou réaffectation du milieu). Étant donné que l'abondance, mais aussi la diversité des peuplements mycorhiziens constituent les principaux indicateurs de l'efficacité de la symbiose sur le développement de la plante, il est recommandé de valoriser les ressources naturelles mycorhiziennes résilientes dans un environnement donné et de redonner au potentiel mycorhizien un niveau compatible avec une productivité optimale du système cultural. Cette gestion *in situ* peut être réalisée *via* des rotations culturales associant des plantes hautement mycotrophes ou en utilisant des espèces végétales endémiques et hautement adaptées aux conditions défavorables caractérisant ces milieux dégradés (carences minérales, déficit en eau, etc.). La mycorhization contrôlée, et en conséquence la simplification induite de la communauté mycorhizienne, doit être réservée à des situations très particulières où le système a perdu ses caractéristiques originelles (ex : sites post-miniers) et où l'intervention humaine est obligatoire.

Afin de raisonner au mieux la valorisation des ressources mycorhiziennes des sols, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur les processus biologiques régissant l'évolution spatio-temporelle et le rôle de la symbiose mycorhizienne dans les mécanismes assurant la capacité de résilience des éco- et agrosystèmes.

Toutefois et malgré le potentiel de la symbiose mycorhizienne pour améliorer la productivité des agrosystèmes dans le cadre d'une gestion durable des sols, potentiel qui a été démontré dans de multiples expérimentations, force est de constater que cette technique d'ingénierie écologique reste malheureusement très peu développée dans le monde agricole et plus particulièrement en Afrique. Un effort conséquent doit être entrepris pour vulgariser cette technique afin qu'elle soit prise en compte et valorisée dans les itinéraires culturels habituellement adoptés dans les régions tropicales et méditerranéennes.

Bibliographie

ALVEY S., BAGAYOKO M., NEUMANN G., BUERKERT A., 2001 – Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil*, 231 : 45-54.

BAGAYOKO M., BUERKERT A., LUNG G., BATIONO A., ROEMHELD V., 2000 – Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nématodes. *Plant & Soil*, 218 : 103-116.

BRUNDRETT M. C., 1991 – « Mycorrhizas in natural ecosystems ». In Macfayden A., Begon M., Fitter A. H. (eds) : *Advances in Ecological Research*, 21, Academic Press Ltd., London : 171-313.

DABIRE A. P., HIEN V., KISA M., BILGO A., SANGARE K. S., PLENCHETTE C., GALIANA A., PRIN Y., DUPONNOIS R., 2007 – Responses of soil microbial catabolic diversity to arbuscular mycorrhizal inoculation and soil disinfection. *Mycorrhiza*, 17 : 537-545.

- DIOUF D., SY M.-O., GHERBI H., BOGUSZ D., FRANCHE C., 2008** – « *Casuarinaceae* ». In Kole C. R., Scorza R., Hall T. C. (eds) : *Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Forest Tree Species*, 9, Blackwell Publishing, Oxford, UK : 279-292.
- DOMMERGUES Y. R., DUHOUX E., DIEM H. G., 1985** – *Les arbres fixateurs d'azote*. Éditions Espaces, 34, 528 p.
- DUPONNOIS R., PLENCHETTE C., THIOULOUSE J., CADET P., 2001** – The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology*, 17 : 239-251.
- DUPONNOIS R., DIÉDHILOU S., CHOTTE J. L., OUREY SY M., 2003** – Relative importance of the endomycorrhizal and (or) ectomycorrhizal associations in *Allocauarina* and *Casuarina glauca*. *Canadian Journal of Microbiology*, 49 : 281-287.
- DUPONNOIS R., FOUNOUNE H., MASSE D., PONTANIER R., 2005** – Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, 207 : 351-362.
- FRANCHE C., BOGUSZ D., 2011** – « Signaling and communication in the actinorhizal symbiosis ». In Perotto S., Baluska F. (eds) : *Signaling and communication in plant symbioses*, Springer : 73-92.
- GARBAYE J., 1988** – Les plantations forestières tropicales : un champ privilégié pour la mycorrhization contrôlée. *Bois et Forêts des Tropiques*, 216 : 23-34.
- GARCIA C., ROLDAN A., HERNANDEZ T., 1997** – Changes in microbial activity after abandonment of cultivation in a semi-arid Mediterranean environment. *Journal of Environment Quality*, 26 : 285-291.
- OHWAKI Y., HIRATA H., 1992** – Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid contents in plant tissues and phospholipid levels in roots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38 : 235-243.
- PIERCE F. J., RICE C. W., 1988** – « Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use ». In Hargrove W. L. (ed.) : *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*, ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI : 21-42.
- PIÉRI C., 1991** – « Les bases agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres des savanes au sud Sahara ». In : *Savanes d'Afrique, terre fertile ?* Actes des rencontres internationales (10-14 décembre 1990), Montpellier : 43-47.
- REQUENA N., PEREZ-SOLIS E., AZCON-AGUILAR C., JEFFRIES P., BAREA J. M., 2001** – Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied Environmental Microbiology*, 67 : 495-498.
- SMITH S., READ J., 2008** – *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd ed. Academic Press, 800 p.
- VAN DER HEIJDEN M. G. A., BAKKER R., VERWAAL J., SCHEUBLIN T. R., RUTTEN M., VAN LOGTESTIJN R., STAEHELIN C., 2006** – Symbiotic bacteria as a determinant of plant community structure and plant productivity in dune grassland. *FEMS Microbiology Ecology*, 56 : 178-187.
- ZHONG C., PINYOPUSARERK K., KALINGARE A., FRANCHE C., 2011** – *Improving smallholder livelihoods through improved Casuarina productivity*. China Forestry Publishing House, 264 p.

Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux

Éric BLANCHART

Pascal JOUQUET

Introduction

Une littérature scientifique croissante suggère que la régulation des cycles biogéochimiques majeurs par les invertébrés du sol pourrait être utilisée pour l'amélioration des services écosystémiques (voir notamment les synthèses de LAVELLE *et al.*, 2006 ; DECAËNS *et al.*, 2006 ; BARRIOS, 2007). Parmi les invertébrés du sol, les ingénieurs du sol (ROOSE, 1976) semblent jouer un rôle prédominant. Ils sont principalement, mais pas exclusivement, les vers de terre et les termites. Bien que moins répandues que ces deux groupes d'organismes, d'autres espèces peuvent jouer un rôle similaire dans la régulation des fonctions de l'écosystème (i.e., les bousiers en Afrique du Sud, BROWN *et al.*, 2010 ; les vers blancs [larves de Coléoptères Scarabéidae], BROWN *et al.*, 2001 ; RABARY *et al.*, 2008 ; les fourmis, FOLGARAIT, 1998 ; les diplopodes, TOYOTA *et al.*, 2006). La reconnaissance croissante de leur importance dans la régulation des cycles biogéochimiques majeurs et dans le transfert de matière et d'énergie dans les écosystèmes conduit à suggérer le développement d'une activité d'ingénierie du sol comme une pierre angulaire pour la définition de pratiques agricoles plus durables (DE GOEDE et BRUSSAARD, 2002). Plusieurs articles majeurs ont été publiés au cours des vingt dernières années sur le potentiel des ingénieurs du sol pour la réhabilitation des sols. Une synthèse contemporaine sur l'utilisation

des ingénieurs du sol pour restaurer des écosystèmes dégradés, mettant à jour la littérature croissante, est maintenant appropriée. Dans ce chapitre, nous présentons les principales fonctions réalisées par ces organismes, puis nous révisons les méthodes développées pour favoriser l'activité des ingénieurs du sol en identifiant les obstacles entravant le développement de recherches sur le sujet. Enfin, nous donnons des exemples d'utilisation de l'activité de vers de terre et de termites pour la réhabilitation de la qualité et du fonctionnement des sols à travers certaines études de cas. En conclusion, nous considérons les points de recherche qui sont à développer pour permettre l'innovation de pratiques modernes et durables de réhabilitation d'écosystèmes dégradés.

Principales fonctions des ingénieurs du sol

En plus d'agir comme des détritivores, les vers de terre et les termites modifient la disponibilité des ressources pour les autres espèces, à travers la création de biopores et d'agrégats biogéniques (LAVELLE *et al.*, 1997 ; JOUQUET *et al.*, 2006). Ils sont impliqués dans la plupart des fonctions clés du sol, telles que la décomposition des résidus organiques à la surface du sol et de la matière organique du sol, le recyclage des nutriments, l'infiltration de l'eau et sa rétention dans le sol, l'érosion du sol, la croissance des plantes, les émissions de gaz à effet de serre, etc. (LAVELLE et SPAIN, 2001). C'est pourquoi on considère généralement que les ingénieurs du sol sont des composantes essentielles à la qualité du sol et leurs abondances et diversité ont été proposées comme des bioindicateurs de la santé des écosystèmes (PAOLETTI, 1999 ; RUIZ *et al.*, 2011) ou pour estimer le niveau de réhabilitation de sites miniers (BOYER et WRATTEN, 2010). Les recherches récentes sur les processus par lesquels les ingénieurs du sol, et notamment les vers de terre influencent la croissance végétale en zone tropicale, ont permis d'accroître considérablement notre connaissance du fonctionnement du sol. Les vers agissent sur les plantes en libérant plus de nutriments disponibles pour les plantes (N et P minéral), en modifiant les communautés de micro-organismes et en stimulant leur activité, en contrôlant les agents des maladies, en libérant des phytohormones ou encore en stimulant les symbioses entre plantes et micro-organismes (rhizobium, mycorhizes) (BAROT *et al.*, 2007 ; CHAPUIS-LARDY *et al.*, 2010 ; BERNARD *et al.*, 2012). La présence de vers de terre peut aussi modifier la germination des graines, la démographie et les communautés de plantes (LAOSSI *et al.*, 2010a ; 2011) et changer l'allocation des ressources chez les plantes (JANA *et al.*, 2010). Mais les plantes ne répondent pas toutes de la même façon à la présence de vers de terre. Tout dépend des espèces de vers et de plantes impliquées ou des caractéristiques du sol (LAOSSI *et al.*, 2010b).

Par exemple, une expérience récente a montré que les variétés rustiques répondaient mieux à la présence de vers de terre que les variétés sélectionnées par des méthodes modernes (NOGUERA *et al.*, 2010).

Méthodes pour relancer l'activité des ingénieurs du sol

Trois stratégies existent pour relancer l'activité des ingénieurs de l'écosystème au champ. Une méthode directe consiste à introduire les ingénieurs du sol *in situ*. Cette méthode ne concerne que les vers de terre, puisque l'élevage des termites est difficile, lent, voire impossible, notamment pour les espèces de termites humivores et champignonnistes (JOUQUET *et al.*, 2011a). L'introduction de vers de terre dans les sols dégradés est souvent confrontée à des conditions de sol inhospitalières (e.g. faible humidité du sol, faibles ressources nutritives, fortes concentrations en polluants...). En conséquence, la sélection d'espèces de vers de terre ou de groupes écologiques appropriés est capitale pour assurer l'établissement réussi et leur diffusion dans l'écosystème. Par exemple, en fonction de la ressource organique disponible, des espèces endogées peuvent être préférées aux espèces anéciques qui nécessitent un établissement préalable de plantes (fournissant la litière) ou l'application d'amendements organiques (LANGMAACK *et al.*, 2002). Dans un sol très acide, des espèces acido-tolérantes doivent être préférées à des espèces moins tolérantes. Différentes méthodes ont été décrites pour optimiser l'élevage des vers de terre, leur inoculation, et l'établissement de populations saines *in situ* (BUTT *et al.*, 1995). Dans certaines situations, la revégétalisation de sites dégradés peut être tentée avant l'introduction de vers de terre afin de garantir l'alimentation des vers de terre (GANIHAR, 2003). Malgré tout, le principal obstacle gênant l'utilisation de cette méthode est notre difficulté à obtenir suffisamment d'individus de vers de terre. Excepté les quelques espèces disponibles sur le marché, comme appâts pour la pêche et ceux utilisés en lombriculture, la plupart des espèces trouvées dans les champs ne sont pas commercialisées et nécessitent la mise en place d'élevage en culture. Ce processus n'est pas toujours faisable et peut ralentir les programmes de réhabilitation. Pour cette raison, et parce qu'elles tolèrent une plus grande étendue de conditions physicochimiques et climatiques que les espèces natives, les espèces exotiques et parfois invasives sont généralement préférées (GARCIA et FRAGOSO, 2003 ; GANI HAR, 2003 ; BLANCHART *et al.*, 2004a ; NOGUERA *et al.*, 2011), ce qui peut entraîner d'autres problèmes environnementaux comme une diminution de la biodiversité locale et une altération des fonctions de l'écosystème (CHAUVEL *et al.*, 1999 ; GONZÁLEZ *et al.*, 2006).

Le développement des vers de terre et des termites peut aussi être favorisé par des méthodes indirectes. L'intensification agricole, comme le travail du sol et

les produits phytosanitaires, et la simplification du paysage entraînent généralement une perte de biodiversité (STOATE *et al.*, 2001 ; BENTON *et al.*, 2003 ; FOLEY *et al.*, 2005). En revanche, des pratiques agricoles plus durables d'intensification écologique (MCGARRY *et al.*, 2000) et une plus grande complexité du paysage (FLOHRE *et al.*, 2011) sont des conditions plus favorables pour accroître l'abondance et la diversité des vers de terre, des termites et d'autres invertébrés du sol. Le développement de la macrofaune du sol étant souvent limité par la quantité des ressources disponibles, l'application de mulch ou d'amendements organiques permet généralement un développement d'espèces locales de vers de terre et de termites (BLANCHART *et al.*, 2006). Malgré tout, le succès de cette approche reste dépendant de la qualité des ressources organiques. Certaines études concluent également que l'absence ou la réduction du travail du sol sont préférées à des pratiques culturales plus intensives (BLANCHART *et al.*, 2006, 2007). Ces méthodes étant indirectes, leur efficacité dépend de nombreux paramètres non contrôlés, tels que le climat et l'activité d'autres organismes qui pourraient ralentir le développement des ingénieurs du sol par des relations de compétition et/ou de prédation.

Restauration de la productivité des agrosystèmes

Dans cette partie, nous présentons quelques études de cas traitant de l'utilisation de vers de terre et de termites dans la restauration de la productivité des agrosystèmes ou dans la réhabilitation de terres dégradées. Les dégradations physiques, chimiques, biologiques sont très répandues et résultent généralement de l'intensification de pratiques culturales (travail du sol trop intense, manque d'apports de matière organique, etc.), d'une gestion non durable de la fertilisation ou d'une exploitation non durable des ressources.

Restauration des stocks de matière organique

Les pratiques durables mises en œuvre dans certains systèmes de culture permettent à la fois une augmentation des stocks de carbone ou de matière organique des sols et une augmentation des densités, biomasses et diversités des ingénieurs du sol. Au Bénin, l'utilisation de la plante de couverture *Mucuna pruriens* var. *utilis* en interculture de maïs permet au bout de 11 ans d'accroître considérablement les stocks de carbone dans l'horizon 0-40 cm de sol (41,4 MgC.ha⁻¹ contre 24,2 MgC.ha⁻¹ pour les traitements sans *Mucuna*), les biomasses de macrofaune (40,6 g.m⁻² contre 10,1 g.m⁻²), les densités de vers de terre (579 ind.m⁻² contre 121 ind.m⁻²) et de termites (6 747 ind.m⁻² contre 2 632 ind.m⁻²) et les rendements en grain de maïs (3 500 kg.ha⁻¹ contre 200 kg.ha⁻¹) (BARTHÈS

et al., 2004 ; BLANCHART *et al.*, 2006). Bien que les relations de cause à effet ne soient pas démontrées, on peut penser que la plus grande abondance d'ingénieurs du sol a un impact sur la productivité, notamment par une modification du régime hydrique du sol, la mise à disposition de nutriments ou encore la protection physique de la matière organique dans les agrégats. Au Brésil, les techniques de semis direct sous couverture végétale SCV permettent également, dans la région des Cerrados, d'améliorer les propriétés des sols, en comparaison avec des systèmes labourés : augmentation des stocks de carbone (83,6 MgC. ha⁻¹ dans des systèmes SCV de 13 ans contre 67,8 MgC.ha⁻¹ sous labour), des biomasses de macrofaune (38 g.m⁻² contre 0,8 g.m⁻²), et notamment des biomasses de larves de Coléoptères (34 g.m⁻² contre 0 g.m⁻²) pour lesquelles on observe une très bonne corrélation avec les stocks de carbone et donc avec l'ancienneté du système SCV (BLANCHART *et al.*, 2007). Si une corrélation positive entre biomasse ou densité d'ingénieurs et stocks de carbone est souvent mise en évidence, on peut se poser la question du rôle effectif des ingénieurs du sol sur ce stockage de carbone. Les processus mis en œuvre par les ingénieurs du sol peuvent être à la fois une accélération de la décomposition de la matière organique sur le court terme (COQ *et al.*, 2007) et une protection physique dans les agrégats sur le long terme (LAVELLE *et al.*, 1998 ; NGO *et al.*, 2011).

Restauration de la fertilité

Très peu d'études mettent en œuvre une manipulation des ingénieurs du sol pour une réhabilitation de la fertilité du sol. L'exemple le plus remarquable en zone tropicale est celui des plantations de thé en Inde du Sud où l'incorporation simultanée de vers de terre, de résidus de taille de thé et de fumier dans des fossés creusés entre les rangs de théiers a permis une augmentation des rendements (production de feuilles vertes) atteignant 275 % (supérieure à l'augmentation observée avec des engrais seuls) et des bénéfices de l'ordre de 5 500 \$ par hectare en 1991 (SENAPATI *et al.*, 1999). Cette réussite a permis un fort développement de cette technique en Inde. Ce système montre que l'introduction des ingénieurs du sol et le déclenchement de leur activité positive n'ont pu se faire que conjointement avec un apport de matière organique.

Réhabilitation des sols compactés

Les études menées sur les vers de terre endogés en zone tropicale montrent qu'il est possible de distinguer deux groupes fonctionnels de vers de terre : les compactants et les décompactants (BLANCHART *et al.*, 1997). Les compactants sont généralement des vers de terre de taille moyenne à grande qui produisent des biostructures de grande taille dont l'accumulation entraîne une augmentation de la densité apparente d'un sol. Dans certaines situations extrêmes, le développement de ces vers de terre peut entraîner une imperméabilisation du sol avec des phénomènes d'anoxie, comme cela a pu être observé en Amazonie (CHAUVEL *et al.*, 1999 ; BARROS *et al.*, 2001). Vis-à-vis de l'érosion, ces vers

de terre exercent deux actions qui sont (i) de produire des turricules stables à la surface du sol et ainsi d'augmenter la rugosité de surface et (ii) de créer des galeries de grande taille qui permettent une infiltration rapide de l'eau, mais pas sa rétention. Ces deux fonctions sont un frein au ruissellement et à l'érosion (BLANCHART *et al.*, 2004a). Les vers de terre décompactants, généralement représentés par des vers de terre de petite taille, produisent des turricules de petite taille dont l'agencement résulte en une diminution de la densité apparente du sol. Les capacités de rétention en eau sont accrues, mais le risque d'érosion est augmenté, les turricules produits à la surface du sol étant labiles et pouvant aisément entraîner la formation d'une croûte imperméable à la surface du sol lors des fortes pluies (ROOSE, 1976). Quoi qu'il en soit, les recherches menées sur cette question semblent confirmer que la présence simultanée de groupes fonctionnels variés (compactants et décompactants) est le gage d'un bon fonctionnement du sol et donc de l'écosystème.

La capacité des termites à se développer dans des environnements difficiles et à favoriser l'infiltration de l'eau dans des sols encroûtés, et donc à réhabiliter les sols et à régénérer le couvert végétal, a été clairement démontrée en Afrique et en Asie (MANDO *et al.*, 1996 ; MANDO et BRUSSAARD, 1999 ; PARDESHI et PRUSTY, 2010). Dans ces études, l'application de mulch ou de matière organique dans ou sur le sol, comme dans le cas des systèmes agricoles et forestiers « zaï » (ROOSE *et al.*, 1999), déclenche l'activité des termites qui créent ensuite des galeries ouvertes à travers la croûte à la surface du sol. Il en résulte une augmentation de la conductivité hydraulique du sol et de la rétention en eau et une diminution de la densité apparente du sol. Le changement des caractéristiques du sol sous l'activité des termites est suffisant pour créer les conditions nécessaires au développement de la végétation naturelle ou à une production agricole sur des sols préalablement dégradés. Le principal obstacle à ces techniques est qu'elles demandent un important travail humain. Par exemple, la technique zaï nécessite 300 heures.ha⁻¹ de travail difficile, la disponibilité et le transport de 3 000 kg.ha⁻¹ de substrats organiques (ROOSE *et al.*, 1999). Un autre inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté à contrôler la décomposition de l'amendement organique et un lessivage potentiel des nutriments minéraux peut apparaître (FATONDI *et al.*, 2009).

Réhabilitation des sols érodés

L'installation de cultures maraîchères sur les vertisols magnésio-sodiques du sud-est de la Martinique (Antilles) entraîne en quelques années de fortes pertes en terre par érosion, en raison d'un déclin rapide des stocks de matière organique. La restauration des propriétés du sol peut se faire sur le moyen terme en réinstallant des prairies irriguées et fertilisées qui permettent une restauration des stocks de matière organique et des communautés de vers de terre. Des études expérimentales, au champ, sur 5 ans, ont permis de montrer que les vers de terre, malgré des biomasses très importantes (plus d'une tonne.ha⁻¹) ne jouaient qu'un rôle tout à fait mineur sur la restauration des propriétés du sol, à la différence des racines de Graminées (BLANCHART *et al.*, 2004b).

Dans le nord du Vietnam, la production d'agrégats biogéniques en surface des sols par les vers de terre et les termites influence de façon significative les propriétés hydro-pédologiques des sols. La forte stabilité structurale des turricules produits en surface des sols par une espèce anécique, *Amyntas khami*, entraîne une augmentation de la rugosité des sols, favorisant ainsi l'infiltration de l'eau et réduisant l'exportation de sol et nutriments dans les jachères (JOUQUET *et al.*, 2008a, b). À l'inverse, les turricules granulaires d'une espèce de ver de terre endogée, *Metaphire posthuma*, et les placages de termites, constitués d'agrégats de petite taille, apparaissent comme moins stables que les agrégats de sol du milieu environnant. Ils se fragmentent rapidement lors d'événements pluvieux et sont entraînés avec l'eau de ruissellement, favorisant alors la formation de croûte structurale en surface des sols et l'exportation de sédiments et nutriments (N et P).

La notion de groupe fonctionnel prend ici toute son importance et il apparaît que toutes les espèces n'ont pas le même effet sur l'érosion des sols : certaines espèces, ou groupes fonctionnels, favorisent l'infiltration de l'eau et réduisent le détachement des sols et l'exportation de matière, alors que d'autres ont des effets contraires.

Réhabilitation de la productivité par utilisation de lombricompost

De nombreuses études ont montré une influence positive des amendements organiques sur la fertilité des sols, les rendements et les services écosystémiques (HERENCIA *et al.*, 2008 ; GOMIERO *et al.*, 2008). Un processus intéressant pour améliorer la qualité des amendements organiques est le lombricompostage qui implique l'activité de vers de terre épigés (EDWARDS et ARANCON, 2004). Au cours des deux dernières décennies, la lombriculture a été appliquée pour la gestion de nombreux types de déchets et de boues, pour les convertir en un substrat destiné à améliorer la fertilité des terres. De façon surprenante, peu de recherches ont été menées sur l'utilisation de ce substrat pour la restauration du sol. Des études récentes menées au nord du Vietnam tendent à montrer que le lombricompost pourrait être intéressant pour réhabiliter les sols dégradés par l'érosion (JOUQUET *et al.*, 2011b ; NGO *et al.*, 2011). L'épandage de lombricompost peut augmenter la croissance des plantes de façon similaire à celle mesurée lorsque des fertilisants chimiques sont utilisés, mais les propriétés du sol sont nettement améliorées (pH, teneur en matière organique, ammonium et capacité d'échange cationique plus élevés) et les pertes en nutriments minéraux considérablement réduites (JOUQUET *et al.*, 2011b). Pourtant, bien qu'apparemment plus intéressant que le compost pour la réhabilitation du sol, le lombricompost peut devenir moins efficace en présence du ver de terre exotique *Dichogaster bolau* (JOUQUET *et al.*, 2010). En conséquence, de nouvelles recherches doivent être entreprises sur cette question pour tester, *in situ*, et dans d'autres situations pédoclimatiques, la valeur de ce substrat pour la restauration de la qualité du sol.

Vers une restauration du sol plus intensive

L'abondante littérature sur le rôle des ingénieurs du sol montre qu'ils n'affectent pas toujours de façon significative le fonctionnement du sol, ni toujours dans le même sens et que tous les ingénieurs du sol n'ont pas forcément un rôle bénéfique. Il est donc probable que certaines espèces doivent être préférées à d'autres, si l'objectif est de réhabiliter le fonctionnement ou la productivité du sol.

Une meilleure compréhension de l'influence de la complexité des paysages pourrait être une approche prometteuse. Augmenter l'hétérogénéité dans les écosystèmes pourrait être une approche intéressante pour maintenir des populations de vers de terre au champ qui pourraient ensuite diffuser dans tout l'écosystème.

Une récente étude suggère également qu'un rétablissement plus rapide des populations d'ingénieurs du sol pourrait être obtenu par l'utilisation de substrats chimiques ou organiques qui pourraient agir comme attractant pour les ingénieurs du sol (ZIRBES *et al.*, 2011).

De façon surprenante, alors qu'il existe une abondante littérature soulignant les rôles clefs que jouent les espèces ingénieurs du sol dans le fonctionnement des écosystèmes, leur utilisation pour la réhabilitation des écosystèmes dégradés reste inexplorée. Comme nous avons essayé de le mettre en lumière dans ce chapitre, les raisons en sont multiples. Parmi elles, le fait qu'il est difficile, voire impossible dans certaines situations, de séparer le rôle des ingénieurs du sol des effets d'autres variables, telles que le changement d'utilisation des pratiques culturales, l'apport de résidus organiques, etc.

De l'ensemble des exemples donnés, il apparaît également que la grande majorité des travaux réalisés portent sur les vers de terre et que le rôle des termites a été jusqu'à présent très peu étudié. Une explication réside dans notre difficulté à contrôler et utiliser les termites par comparaison aux vers de terre plus facilement manipulables, mais une autre raison est peut-être également la mauvaise réputation des termites, perçus bien souvent comme ravageurs de culture. De même, l'activité des fourmis, comme ingénieurs du sol, reste inexploitée, alors que leur activité de creusement peut, localement et dans certaines circonstances, être équivalente ou supérieure à celle des termites et vers de terre.

Pour conclure, une meilleure appréciation des rôles des ingénieurs du sol et le développement de techniques innovantes, telle que l'utilisation de molécules attractives permettant d'orienter le déplacement des vers de terre ou l'utilisation des variétés de plantes adaptées aux populations de vers de terre, doivent se développer à la fois pour assurer une meilleure productivité agricole, mais aussi pour favoriser les fonctions écologiques permettant la réhabilitation d'écosystèmes dégradés.

Bibliographie

- BAROT S., UGOLINI A., BEKAL BRIKCI F., 2007** – When do soil decomposers and ecosystem engineers enhance plant production? *Functional Ecology*, 21 : 1-10.
- BARRIOS E., 2007** – Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, 64 : 269-285.
- BARROS E., CURMI P., HALLAIRE V., CHAUVEL A., LAVELLE P., 2001** – The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma*, 100 : 193-213.
- BARTHÈS B., AZONTONDE A., BLANCHART E., GIRARDIN C., VILLENAVE C., LESAINTE S., OLIVER R., MARIOTTI A., FELLER C., 2004** – Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, 20 : 231-239.
- BENTON T. G., VICKERY J. A., WILSON J. D., 2003** – Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, 18 : 182-188.
- BERNARD L., CHAPUIS-LARDY L., RAZAFIMBELO T., RAZAFINDRAKOTO M., PABLO A. L., LEGNAME E., POULAIN J., BRÜLS T., O'DONOHUE M., BRAUMAN A., CHOTTE J. L., BLANCHART E., 2012** – Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil. *The ISME Journal*, 6 : 213-222.
- BLANCHART E., LAVELLE P., BRAUDEAU E., LE BISSENAIS Y., VALENTIN C., 1997** – Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry*, 29 : 431-439.
- BLANCHART E., ALBRECHT A., ALEGRE J., DUBOISSET A., VILLENAVE C., PASHANASI B., LAVELLE P., BRUSSAARD L., 1999** – « Effects of earthworms on soil structure and physical properties ». In Lavelle P., Brussaard L., Hendrix P. (eds) : *Earthworm management in tropical agroecosystems*, Cabi Publishing : 149-172.
- BLANCHART E., ALBRECHT A., BROWN G. G., DECAËNS T., DUBOISSET A., LAVELLE P., MARIANI L., ROOSE É., 2004a** – Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104 : 303-315.
- BLANCHART E., ALBRECHT A., CHEVALLIER T., HARTMANN C., 2004b** – The respective roles of biota (roots and earthworms) in the restoration of physical properties in vertisol under a *Digitaria decumbens* pasture (Martinique). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103 : 343-355.
- BLANCHART E., VILLENAVE C., VIALLATOUX A., BARTHÈS B., GIRARDIN C., AZONTONDE A., FELLER C., 2006** – Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42 : 136-144.
- BLANCHART E., BERNOUX M., SARDA X., SIQUEIRA NETO M., CERRI C. C., PICCOLO M., DOUZET J. M., SCOPEL E., FELLER C., 2007** – Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72 : 81-87.
- BOYER S., WRATTEN S. D., 2010** – The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencat mining – A review. *Basic and Applied Ecology*, 11 : 196-203.
- BROWN G. G., PASINI A., BENITO N. P., DE AQUINO A. M., CORREIA M. E. F., 2001** – « Diversity and functional role of soil macrofauna communities in Brazilian no-tillage agroecosystems: a preliminary analysis ». *International Symposium on Managing Biodiversity in Agricultural Ecosystems*. Montreal, Canada, 8-10 novembre 2001.
- BROWN J., SCHOLTZ C. H., JANEAU J.-L., GRELLIER S., PODWOJEWSKI P., 2010** – Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) can improve soil hydrological properties. *Applied Soil Ecology*, 46 : 9-16.
- BUTT K. R., FREDERICKSON J., MORRIS R. M., 1995** – An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. *Ecological engineering*, 4 : 1-9.
- CHAPUIS-LARDY L., BRAUMAN A., BERNARD L., PABLO A. L., TOUCET J., MANO M. J., WEBER L.,**

- BRUNET D., RAZAFIMBELO T., CHOTTE J. L., BLANCHART E., 2010 – Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on the microbial structure and activity related to CO₂ and N₂O fluxes from a tropical soil (Madagascar). *Applied Soil Ecology*, 45 : 201-208.
- CHAUVEL A., GRIMALDI M., BARROS E., BLANCHART E., DESJARDINS T., SARRAZIN M., LAVELLE P., 1999 – Pasture damage by an Amazonian earthworm. *Nature*, 398 : 32-33.
- COQ S., BARTHÈS B. G., OLIVER R., RABARY B., BLANCHART E., 2007 – Earthworm activity affects soil aggregation and soil organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues – An experimental study (Madagascar). *Soil Biology and Biochemistry*, 39 : 2119-2128.
- DECAËNS T., JIMÉNEZ J., GIOIAC C., MEASEY G., LAVELLE P., 2006 – The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42 : S23-S38.
- DE GOEDE R. M. G., BRUSSAARD L., 2002 – Soil zoology: an indispensable component of integrated ecosystem studies. *European Journal of Soil Biology*, 38 : 1-6.
- EDWARDS C. A., ARANCON N., 2004 – « The use of earthworms in the breakdown of organic wastes to produce ». In Edwards C. A. (ed.) : *Earthworm ecology*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press : 345-371.
- FATONDJI D., MARTIUS C., BIELDERS C. L., KOALA S., VLEK P. L. G., ZOUGMORE R., 2009 – Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85 : 225-239.
- FLOHRE A., FISCHER C., AAVIK T., BENGTSSON J., BERENDSE F., BOMMARCO R., CERYNGIER P., CLEMENT L. W., DENNIS C., EGGERS S., EMMERSON M., GEIGER F., GUERRERO I., HAWRO V., INBCHAUSTI P., LIIRA J., MORALES M. B., ONATE J. J., PÄRT T., WEISSER W. W., WINQVIST C., THIES C., TSCHARNTKE T., 2011 – Agricultural intensification and biodiversity partitioning in European landscapes comparing plants, carabids, and birds. *Ecological Applications*, 21 : 1772-1781.
- FOLEY J. A., DE FRIES R., ASNER G. P., *et al.*, 2005 – Global consequences of land use. *Science*, 309 : 570-574.
- FOLGARAIT P. J., 1998 – Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity and Conservation*, 7 : 1221-1244.
- GANIHAR S. R., 2003 – Nutrient mineralization and leaf litter preference by the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on iron ore mine wastes. *Restoration Ecology*, 11 : 475-482.
- GARCÍA J. A., FRAGOSO C., 2003 – Influence of different food substrates on growth and reproduction of two tropical earthworm species (*Pontoscolex corethrurus* and *Amyntas corticis*). *Pedobiologia*, 47 : 754-763.
- GOMIERO T., PAOLETTI M. G., PIMENTEL D., 2008 – Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27 : 239-254.
- GONZÁLEZ G., HUANG C. Y., ZOU X., RODRÍGUEZ C., 2006 – Earthworm invasions in the tropics. *Biological Invasions*, 8 : 1247-1256.
- HERENCIA J. F., RUIZ J. C., MORILLO E., MELERO S., VILLAVARDE J., MAQUEDA C., 2008 – The effect of organic and mineral fertilization on micronutrient availability in soil. *Soil Science*, 173 : 69-80.
- JANA U., BAROT S., BLOUIN M., LAVELLE P., LAFFRAY D., REPELLIN A., 2010 – Earthworms influence the production of above- and below-ground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana*. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 : 244-252.
- JONES C.G., LAWTON J.H., SHACHAK M., 1994 – Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69: 373-386.
- JOUQUET P., DAUBER J., LAGERLOF J., LAVELLE P., LEPAGE M., 2006 – Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 32 : 153-164.
- JOUQUET P., BOTTINELLI N., PODWOJEWSKI P., HALLAIRE V., TRAN DUC T., 2008A – Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*, 146 : 231-238.
- JOUQUET P., PODWOJEWSKI P., BOTTINELLI N., MATHIEU J., RICOY M., ORANGE D., TRAN DUC T., VALENTIN C., 2008B – Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. *Catena*, 74 : 13-21.
- JOUQUET P., PLUMERE T., THUY DOAN THU, RUMPEL C., TOAN TRAN DUC, ORANGE D., 2010

– The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms. *Applied Soil Ecology*, 46 : 125-133.

JOUQUET P., TRAORÉ S., CHOOSAI C., HARTMANN C., BIGNELL D., 2011A – Influence of termites on ecosystem functioning: ecosystem services provided by termites. *European Journal of Soil Biology*, 47 : 215-222.

JOUQUET P., BLOQUEL E., THU DOAN T., RICOY M., ORANGE D., RUMPEL C., TRAN DUC T., 2011B – Does compost and vermicompost improve macro-nutrient retention and plant growth in degraded tropical soils? *Compost Science & Utilization*, 19 : 15-24.

LANGMAACK M., SCHRADER S., RAPP-BERNHARDT U., KOTZKE K., 2002 – Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma*, 105 : 141-152.

LAOSSI K. R., NOGUERA D., BAROT S., 2010A – Earthworm-mediated maternal effects on seed germination and seedling growth in three annual plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 : 319-323.

LAOSSI K. R., DECAËNS T., JOUQUET P., BAROT S., 2010B – Can we predict how earthworm effects on plant growth vary with soil properties? *Applied and Environmental Soil Science*, 20 : article ID 784342.

LAOSSI K. R., NOGUERA D., DECAËNS T., BAROT S., 2011 – The effects of earthworms on the demography of annual plant assemblages in a long-term mesocosm experiment. *Pedobiologia*, 54 : 127-132.

LAVELLE P., BIGNELL D., LEPAGE M., 1997 – Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33 : 159-193.

LAVELLE P., PASHANASI B., CHARPENTIER F., GILOT C., ROSSI J. P., DEROUARD L., ANDRE J., PONGE J. F., BERNIER N., 1998 – « Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics ». In Edwards C. A. (ed.) : *Earthworm Ecology*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press : 103-122.

LAVELLE P., SPAIN A. V. 2001 – *Soil Ecology*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic, 654 p.

LAVELLE P., DECAËNS T., AUBERT M., BAROT S., BLOUIN M., BUREAU F., MARGERIE P., MORA P., ROSSI J. P., 2006 – Soil invertebrates and ecosystem

services. *European Journal of Soil Biology*, 42 : S3-S15.

MANDO A., STROOSNIJDER L., BRUSSAARD L., 1996 – Effects of termites on infiltration into crusted soil. *Geoderma*, 74 : 107-113.

MANDO A., BRUSSAARD L., 1999 – Contribution of termites to the breakdown of straw under Sahelian conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 29 : 332-334.

MCGARRY D., BRIDGE B. J., RADFORD B. J., 2000 – Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Research*, 53 : 105-115.

NGO P. T., RUMPEL C., DIGNAC M. F., BILLOU D., TRAN DUC T., JOUQUET P., 2011 – Transformation of Buffalo manure by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils. *Ecological Engineering*, 37 : 269-276.

NOGUERA D., RONDÓN M., LAOSSI K. R., HOYOS V., LAVELLE P., CRUZ DE CARVALHO M. H., BAROT S., 2010 – Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 : 1017-1027.

NOGUERA D., LAOSSI K. R., LAVELLE P., CRUZ DE CARVALHO M. H., ASAKAWA N., BOTERO C., BAROT S., 2011 – Amplifying the benefits of agroecology by using the right cultivars. *Ecological Applications*, 21 : 2349-2356.

PAOLETTI M., 1999 – The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74 : 137-155.

PARDESHI M., PRUSTY B. A. K., 2010 – Termites as ecosystem engineers and potentials for soil restoration. *Current Science*, 99 : 11-11.

RABARY B., BLANCHART E., ANDRIAMANANTENA Z., HERVOUET C., DOUZET J. M., MICHELLON R., MOUSSA N., CHOTTE J. L., 2008 – Activités biologiques et dynamique de la matière organique du sol sous systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale (Hauts plateaux de Madagascar). *Terre malgache*, 26 : 29-33.

ROOSE É., 1976 – *Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical*. Rapport interne Orstom, Abidjan, 56 p.

- ROOSE É., KABORÉ V., GUENAT C., 1999** – Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13 : 343-355.
- RUIZ N., MATHIEU J., CÉLINI L., ROLLARD C., HOMMAY G., LORIO E., LAVELLE P., 2011** – Ibos: a synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrates communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 : 2032-2045.
- SENAPATI B., LAVELLE P., GIRI S., PASHANASI B., ALEGRE J., DECAËNS T., JIMENEZ J. J., ALBRECHT A., BLANCHART E., MAHIEU M., ROUSSEAU L., THOMAS R., PANIGRAHI P. K., VENKATACHALAM M., 1999** – « In-soil earthworm technologies for tropical ecosystems ». In Lavelle P., Brussaard L., Hendrix P. (eds) : *Earthworm management in tropical agroecosystems*, Cabi Publishing : 199-238.
- STOATE C., BOATMAN N. D., BORRALHO R. J., RIO CARVALHO C., DE SNOO G. R., EDEN P., 2001** – Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management*, 63 : 337-365.
- TOYOTA A., KANEKO N., ITO M. T., 2006** – Soil ecosystem engineering by the train millipede *Parafontaria laminata* in a Japanese larch forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 : 1840-1850.
- ZIRBES L., MARK M., VRANCKEN V., WATHELET J. P., VERHEGGEN F., THONART P., HAUBRUGE E., 2011** – Earthworms use odor cues to locate and feed on microorganisms in soil. *PLoS ONE*, 6 : 21927.

Valorisation agro-énergétique des déchets d'abattoir par méthanisation

Jean-Louis FARINET

Condensé

En zone soudano-sahélienne, les abattages contrôlés de toute viande engendrent la production d'une grande quantité de déchets de nature essentiellement organique. C'est une source de biomasse de qualité, disponible et facilement mobilisable, en vue d'une valorisation par méthanisation. Les déchets organiques sont transformés par voie anaérobie dans un réacteur fermé. Cette transformation engendre la production de biogaz qui est utilisable comme combustible par les ménages ou comme carburant dans les moteurs à combustion. Les résidus de digestion font l'objet d'une maturation pour obtenir un compost facilement transportable et utilisable sur les champs.

Le Cirad a participé à deux projets en Afrique visant à démontrer la faisabilité technique et économique de la méthanisation des déchets d'abattoir. Le premier au début des années 1990 au Sénégal, en collaboration avec la Sogas (<http://uved-matorg.cirad.fr>) et le second en 2001 en Égypte, en collaboration avec le GOVS (FARINET et FOREST, 2003).

Les déchets d'abattoir

La capacité de production d'un abattoir s'exprime en tonnes de carcasses (Tc) et la quantité de déchets méthanisables est généralement exprimée par rapport à la tonne de carcasse produite (kg/Tc). Au Sahel, un bovin abattu correspond

à 0,135 Tc et un ovin ou caprin à 0,012 Tc. Une bonne partie des sous-produits du cinquième quartier est généralement bien valorisée en Afrique (abats, peau, tête et pattes). Les cornes et onglons sont prisés par l'artisanat et les fabricants d'engrais. Certains déchets ne trouvent cependant pas de débouché et constituent un risque pour l'environnement, car ils sont évacués avec les eaux usées. Il s'agit d'abord du sang qui n'est pas récupéré dans des conditions sanitaires suffisantes pour être valorisé. Il y a ensuite les matières stercoraires (contenu des panses et intestins) produites au niveau de la triperie. Ces matières sont très humides, mais de consistance solide. La simple collecte séparée de ces matières permet à elle seule de réduire de 80 % la charge organique des eaux usées d'un abattoir. Enfin, du fumier peut être récupéré sur les parcs d'attente des animaux avant l'abattage. L'ensemble de ces déchets représente en moyenne 280 kg/Tc par an avec un taux de matières sèches de l'ordre de 15 %. Ainsi, la quantité de déchets mobilisables pour l'ensemble des abattoirs du Sénégal atteint 5 100 tonnes/an pour une capacité d'abattage estimée en 2005 à 18 300 Tc/an.

Une technique de méthanisation adaptée

La méthanisation en continu des déchets solides nécessite l'emploi d'un réacteur à flux piston, tel que le procédé industriel Valorga ou le procédé rustique Transpaille développé par le Cirad (ELMALEH *et al.*, 1992). Le temps de séjour des déchets dans ces réacteurs est de 20 à 30 jours : il s'adapte bien aux variations de charge. La quantité de biogaz produite est équivalente à 7 m³/Tc avec 65 % de méthane. Il est valorisé au sein même de l'abattoir pour la production d'eau chaude (Égypte) ou pour la cogénération de chaleur et d'électricité (Sénégal).

Un compost de qualité

Étant donné la richesse des déchets digérés en MO, azote et phosphore, ceux-ci sont transformés en compost en les laissant mûrir et sécher en tas à l'air libre pendant au minimum deux mois. La production de compost stabilisé représente alors 18 % de la quantité initiale de déchets. Sa valeur fertilisante est détaillée dans le tableau qui suit :

Une maturation plus poussée de ce produit permet, après mélange avec du sable, de l'utiliser comme support de culture pour les pépinières. Au Sénégal, la commercialisation de ce produit permet une forte valeur ajoutée sur le marché local. (FARINET, 1994) et la durée d'amortissement du coût des installations est alors de 6 à 7 ans.

Tableau 1
Valeur fertilisante des déchets.

Compost	Mat. sèche	MO	N total	P2O5	K2O	CAO	MgO
Teneurs en %	85	52	2,0	2,4	0,9	3,	0,7
Production potentielle	784	408	15,6	18,8	7,1	27,4	5,5

Au Sénégal (t/an)

Bibliographie

ELMALEH S., ELYAMAN F., FARINET J.-L., FOREST F., 1992 – Hydrodynamique et cinétique de méthanisation en réacteur séquentiel. *Entropie*, 168 : 21-25.

FARINET J.-L., 1994 – La commercialisation du compost sous forme de plants en mottes. *Agriculture et développement*, 1 : 49-51.

FARINET J.-L., FOREST F., 2003 – « Agro-energetic valorisation of slaughterhouse waste in Africa ». Int. Seminar on aerobic digestion of slaughterhouse wastes, Inra, Narbonne, France.

Valorisation des urines humaines et animales pour la fertilisation des sols tropicaux : une revue

Éric ROOSE

Ernest KOUAKOUA

Problématique : explorer toutes les sources de nutriments

Nous avons constaté à la lecture des chapitres présentés dans cette deuxième partie que la dégradation de la productivité des sols tropicaux provient en majorité des pertes de MO et des nutriments du sol par minéralisation accélérée des MO du sol (MOS), par lessivage dans les eaux de drainage, volatilisation par les microbes et érosion des nutriments. Tous les résultats exposés montrent l'intérêt de la fumure organique et du paillage pour maintenir la fertilité des sols cultivés. Malheureusement, la biomasse récoltée sur un hectare ne suffit pas à assurer la nutrition du bétail, la production du fumier, l'entretien du bilan des MO du sol et le paillage qui serait nécessaire pour protéger ce champ contre l'érosion. On recherche donc d'autres sources de biomasse comme les résidus industriels (canne à sucre, brasserie, abattoirs, etc), l'agroforesterie et les déchets de production forestière (BRF), les déchets urbains ou familiaux.

Or dans certains pays à forte population où les paysans ne disposent pas facilement d'engrais minéraux, les urines et déjections humaines et animales font l'objet de récolte journalière et de valorisations diverses. En Inde, les urines sont utilisées comme médicaments, antiseptique ou anti-cancer ou comme bio-fertilisant pour soutenir la production de diverses cultures (maraîchage, maïs, coton, arachides, piment) (TANMOY KARAK et PRADIP BHATTACHARYA, 2011).

Jusqu'il y a quelques années, les paysans chinois venaient en ville récolter les « produits familiaux de la nuit » pour fumer leurs champs de choux. Au Burkina Faso, une ONG collecte les urines dans une coopérative pour réduire le coût de la fumure des jardins maraîchers. Au Niger et au Tchad, le Groupe Urgence et Développement et l'ONG Secadev (2009) proposent des latrines bon marché, pour traiter l'assainissement des camps de réfugiés et produire de façon écologique des engrais biologiques pour redémarrer la production agricole. On a vu dans les chapitres 19 à 21 que la qualité des « fumiers » dépend beaucoup de l'utilisation de litière et des urines. Or on a constaté sur le terrain que vers la fin de la saison sèche, les foin sont quasi inexistantes et les résidus de cultures sont consacrés en priorité à l'alimentation du bétail plutôt qu'à fournir une litière sous les animaux ou un paillis sur la surface des champs (Dugué *et al.* chap. 30). Après l'analyse des déchets urbains (Seh *et al.*, chap. 20 ; Masse *et al.*, chap. 19) et industriels (Roose *et al.*, chap. 18) et les rejets d'abattoir (Farinet, chap. 24), nous voudrions attirer l'attention sur le potentiel de fertilité des urines humaines et animales pour compléter la restitution de nutriments naturels disponibles dans les campagnes.

Contenu des urines humaines

Un adulte en bonne santé brûle une partie de ses réserves en sucres et protéines pour ses besoins énergétiques et évacue les déchets sous forme de gaz et d'urines.

On trouve dans les urines (JÖNSSON *et al.*, 2004) :

- de l'azote total : urée (85 %), N-nitrates et N-NH₄ : 2 à 9 g/l ;
- du carbone organique et de nombreuses molécules d'hormones : 3,6 à 6,7 g/l ;
- de la potasse sous forme soluble ionisée : 1 à 3 g/l ;
- du phosphore, sous forme peu soluble de phosphate de calcium : 0,1 g/l ;
- du calcium, du magnésium : 0,1 g/l ;
- des oligoéléments : 0,01 g/l ;
- pH : 6 à 9.

Les teneurs sont donc très variables en fonction de la qualité du régime alimentaire et de la quantité d'eau absorbée. L'urine est un engrais liquide à action rapide, bien équilibré, riche en azote et potasse, mais contenant aussi des petites quantités de phosphates de calcium, du magnésium et pas mal d'oligoéléments. La séparation des urines à la source permet de produire l'un des engrais les plus propres pour la production agricole. Certaines hormones et autres produits pharmaceutiques sont excrétés dans les urines, mais le risque d'effets négatifs sur les végétaux et la santé humaine est plus faible que lorsqu'on utilise les boues d'épuration, les eaux recyclées ou le fumier de ferme (RICHERT *et al.*, 2011).

Flux des nutriments et valorisation des déjections humaines

Tableau 1
Apports des déchets d'un homme adulte.

	Urines	Fèces	Total
Masse humide (kg/he/an)	550	51	601 kg
Masse sèche (kg)	21	11	32 kg
N (kg)	4	0,55	4,55 kg
P (kg)	0,36	0,18	0,54 kg
K (kg)	1,4	0,2	1,6 kg

Source : JÖNSSON *et al.*, 2004.

L'estimation de l'excrétion de nutriments (tabl. 1) varie en fonction des habitudes alimentaires de chaque pays : de 2 à 4 kg d'azote, 0,2 à 0,4 kg de phosphore et 1 à 1,3 kg de potasse par personne/an (JÖNSSON *et al.*, 2004). En Afrique occidentale, la production annuelle d'excréta d'un adulte apporterait 2,8 kg d'azote, 0,5 kg de phosphore et 1,3 kg de potasse selon les statistiques de la FAO (RICHERT *et al.*, 2011). Ces quantités ne sont pas très importantes si on les répand sur un hectare, mais elles peuvent atteindre des concentrations suffisantes (50 à 100 kg de N/ha) si on les concentre sur des petites parcelles maraîchères de 300 m². De plus, les familles africaines regroupent souvent plus de 6 à 10 personnes : leur cumul n'est plus négligeable. L'apport de ces engrais biologiques augmente la production (de 50 à 70 %) et la qualité des céréales (plus de protéines), mais réduit celle des patates (plus aqueuses). On obtient plus d'efficacité sur des sols sableux pauvres et si on synchronise les apports en engrais et les besoins des plantes qui diminuent en phase générative. La quantité de nutriments excrétés est voisine de la quantité des nutriments dans la nourriture ingérée : on peut donc prévoir le volume des bio-déchets et les nutriments à ajouter pour atteindre la production voulue sans dégrader les propriétés chimiques du sol. En principe, en restituant dans des trous ou des rigoles proches des cultures les déchets sur la surface utilisée pour produire la récolte, on maintient durablement la fertilité du champs (JÖNSSON *et al.*, 2004).

En Afrique, la fertilité du sol diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'habitat : cela s'explique par le retour des déchets du ménage (déchets de cuisine, cendres et déjections) et des animaux élevés au piquet ou dans l'enclos. Au Rwanda et Burundi, une fois la fosse d'aisance à moitié pleine, on la rebouche et on y plante un bananier ou un arbre fruitier qui va en profiter, tout en protégeant la famille des dangers sanitaires. L'azote et la potasse des urines étant hydrolysables, les effets sont rapides mais passagers : par contre, les phosphates liés aux MO ou au calcium sont assimilés plus lentement par les plantes. Les nutriments

inclus dans les fèces sont disponibles plus lentement, une fois les MO minéralisées. Les urines peuvent aussi servir d'accélérateur de compost. La collecte des urines se fait dans des flacons à large col, dans des jerrycans de 20 l. ou dans des WC récoltant séparément les phases aqueuses et solides dans des cuves produisant du gaz et des engrais. Au Niger (projet Aguié) et au Tchad (ONG Secadev), divers modèles de latrines ont été développés traitant à part les urines et les fèces (par dessèchement) ou ensemble (compostage avec apports d'herbes) (MORGAN, 2009 ; SCHÖNNING et STENSTRÖM, 2004).

Les urines fraîches sont généralement stériles. Leur conservation entraîne une évolution rapide des formes d'azote-urée en N-NH_4 et une forte augmentation du pH (jusqu'à 9) des urines et du sol qui les absorbe.

On peut estimer la valeur des urines produites par un adulte de 4 à 7 € par an en comparant leur apport en nutriments avec celui des engrais minéraux disponibles localement (RICHERT *et al.*, 2011) : multiplié par le nombre de personnes dans une famille, une coopérative ou un village, cette ressource n'est plus négligeable. L'amélioration de la production de maïs par l'apport des urines d'une personne peut atteindre 40 €. On a montré qu'il n'y avait pas de différence significative d'effet sur la production végétale d'un apport d'urée minérale ou de l'apport correspondant en urine. En Inde (Musiri), l'application de 50 litres d'urine par plant de bananier plus 75 % de la dose de K recommandée a donné un accroissement de 47 % du nombre de fruits obtenus avec les engrais minéraux. L'urine doit être entreposée dans des récipients fermés et incorporée rapidement dans le sol sans toucher les plantes, en fonction des besoins de chaque plante, en particulier aux premiers stades de la croissance. Un délai d'un mois entre la récolte et la dernière dose doit être respecté car une fois dans leur phase reproductive, les plantes absorbent moins les nutriments du sol.

Flux des déjections animales et apports de divers animaux d'élevage

La production journalière spécifique de déjections est une constante dont la médiane égale 9 % du poids vif de l'animal. Les teneurs en kg/tonne de fumier varient beaucoup en fonction des animaux et de leur alimentation. Ainsi, les fumiers de caprins et ovins sont plus riches en azote, ceux des volailles, lapins, porcs et caprins sont plus riches en phosphates, les urines de bovins et de porc sont plus riches en potasse (voir tabl. 2). Comme la richesse des fumiers dépend de l'alimentation et aussi de la fertilité du sol, les teneurs en nutriments des fumiers sont plus faibles en Afrique où l'usage des engrais minéraux est encore très limité.

Tableau 2

Caractérisation des déjections animales en France en kg par tonne de produit.

Espèce	Produit	Mat. sèche	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Production kg/jour
Bovin	urine	70 à 80	8-10	0,1	14-15	
	fumier	130-260	3-4	1,8-4	4-15	30
Caprin	fumier	476	6,1	5,2	5,7	5
Ovin	fumier	384	8,2	2,1	12,3	
Chevaux	fumier	326	6,7	2,3	5-12	35
Porcs	fumier	250	4,7	4,5	5,5	12
Porcs	urine	22-40	3-5	0,1-1	4-5	
Volaille	fumier	250-400	10-30	10	7	0,2
Lapin	fumier	260	2,7	10	11,6	0,2

Source : AUDOUIN, 1991.

Hénin conclut qu'en France les apports de nutriments dûs à l'élevage sont équivalents à ceux des engrais minéraux.

En Afrique, la part des engrais minéraux NPK est beaucoup plus faible. L'azote provient pour moitié des urines, la potasse pour 85 % des urines, tandis que le phosphore peu soluble se fixe sur les argiles par le calcium et circule sous forme solide (95 % dans les fèces). Le sol sert d'épurateur des eaux.

Rares sont les paysans qui récoltent séparément les urines des animaux, mais il existe en Inde des clubs de séniors qui sont enthousiastes des effets des urines de vache sur la santé des hommes et des cultures (désinfectant), sur la protection contre les insectes (12 jours), sur la production de diverses cultures et sur l'économie des ménages. Cela tient à la composition complexe des urines : 95 % d'eau, 2,5 % d'urée, 1 % de potasse et des traces de divers minéraux, hormones et enzymes dont les effets ne se font sentir que sur une récolte.

Au Maroc, BADRAOUI et STITOU (2002) donnent la composition des fumiers de bovins et d'ovins en zone méditerranéenne : elle varie en fonction du mélange de litières, de fèces et d'urines et du menu des animaux (tabl. 3).

Tableau 3

Composition de fumiers + litières ± décomposés au Maroc (kg par tonne).

	MS	Humus	N total	P2O5	K2O	Ca	Mg
Bovins	120 à 170	50 à 100	4 à 5	2,5 à 3	5 à 6	3 à 4,5	0,2 à 1
Ovins	280 à 320	100 à 150	8 à 8,5	2 à 2,4	6,6	-	-

Les fumiers d'ovins sont plus riches en MS, en humus et en azote. GUERIN et ROOSE (2014) expliquent que les chèvres et les ovins consomment plus d'arbustes riches en lignines que les bovins plus friands de graminées. Les bovins

restituent 10 à 20 kg d'azote dilué dans 1 000 à 2 500 litres d'urine par an : l'azote des urines, composé à 75 % d'urée, est rapidement volatilisé s'il est déposé sur des sols secs et peu argileux en saison chaude. Le phosphore assimilable par les plantes est peu abondant dans les sols, les fourrages, les fumiers (3 kg/an) et les urines (0,1 kg/an). Les restitutions de potassium sont proportionnelles aux quantités consommées, soit 25 kg en moyenne dont 85 % sont dans les urines (22 kg/bovin/an). Un bovin adulte rejette 5 kg/an de calcium dans les fèces et 0,1 kg dans les urines. Parallèlement, les rejets en magnésium sont faibles : 4 kg/an dans les fèces et 0,4 kg dans les urines. Les ovins et surtout les caprins ont des urines plus concentrées, si bien qu'on peut estimer les rejets dans leurs urines à 1/10 de ceux des bovins (UBT) (GUERIN et ROOSE, 2014).

Valorisation des urines animales

Sur un sol argileux sur basalte en Nouvelle-Zélande, LEDGARD *et al.* (1982) ont montré que l'apport d'urine de bovin augmente la production de graminée pendant 2 ou 3 mois (essentiellement par l'apport d'azote), mais réduit la production de trèfle, ainsi que sa fixation d'azote atmosphérique. À la longue, l'apport d'urine peut modifier la composition des pâturages en faveur des graminées. Mais le potassium interagit avec l'azote pour améliorer le taux de protéine des fourrages. Étant donné les fortes doses de N et K apportées sur de faibles surfaces (0,45 m²), on peut observer des pertes de N-urines par dénitrification (5 à 60 %) et par lessivage importantes (N et K) sur les terres pâturées.

Les urines peuvent améliorer la digestibilité des pailles de riz, le taux de protéines, le taux de fibres et de MS digestible de plus de 70 % : l'urée des urines animales est aussi efficace que l'urée minérale ordinaire (SAADULLAH *et al.*, 1980).

Sur les pâturages, l'action des urines est rapide mais fugace (max. 3 mois), tandis que les fèces sont plus riches en composés organiques insolubles qui agissent pendant 1 à 2 ans (LANCON, 1976). Les urines favorisent les plantes nitrophiles susceptibles d'absorber rapidement les excès d'azote, réduisent le taux de P et enrichissent les fourrages en K, Ca, Mg et N. En augmentant la charge animale tournante, on réduit les refus, on améliore la flore, mais on risque d'augmenter le lessivage de N et K solubles. En répandant les bouses, on augmente la production végétale, mais une partie est refusée par les animaux (odeurs !) (LANCON, 1976)

En Afrique, on peut observer trois scénarios concernant l'usage des rejets animaux sur les terres agricoles.

1) En milieu d'élevage extensif sur parcours naturels, les urines et fèces sont dispersés sur le parcours : 50 % sont abandonnés sur l'aire de repos ou près de la zone d'abreuvement. Broyés et mélangés au sol des parcs de nuit par les sabots des animaux, fèces et urines sont exposés au soleil (volatilisation de l'azote) et aux pluies (lessivage et érosion). Les poudrettes de faible qualité (présence de germes et de graines d'adventices et pauvres en nutriments) sont exportées sur les champs avec une forte proportion de terre enrichie de la surface du parc. Certains éleveurs peuhls cultivent alors ces surfaces enrichies et obtiennent de bons rendements en céréales, s'il pleut suffisamment.

À Mbissiri dans le Nord-Cameroun (près de Tchollire), la recherche d'une zone homogène apte aux expérimentations sur les risques d'érosion en fonction des systèmes de culture intensive a montré que la surface jadis occupée par un troupeau gardé au piquet a produit 35 quintaux de maïs/ha au lieu de 25 alentour dans la savane arborée soudanienne. De même, le pH était de 7 au lieu de 5,6, le taux de MO de 1,6 au lieu de 1,2 %, le taux d'azote de 0,08 au lieu de 0,01 %. Les effets des apports de fèces et des urines ont duré plusieurs années (BOLI *et al.*, 1993).

Il existe encore une tradition de contrat entre éleveurs et agriculteurs qui permet au troupeau nomade de consommer les résidus des cultures à condition d'y stationner chaque nuit pendant 3 à 4 semaines, assurant ainsi la fumure (fèces et urines) de ces champs. Cette technique évite le transport de la biomasse et du fumier et améliore le taux de carbone et de nutriments avant le labour et la culture principale. Le risque de volatilisation de l'azote est limité, si on laboure la terre dès la fin du contrat.

2) Pour réduire les risques de gazéification de l'azote, de lessivage et d'érosion des nutriments, on peut apporter dans le parc de nuit une litière d'herbes, de branchages ou de résidus de culture, qui mélangés aux déjections et broyés par les sabots, vont augmenter le volume et la qualité du fumier. Il faut déjà disposer d'une charrette pour transférer les résidus puis le fumier, à moins de procéder au semis direct sous la litière et de butter les pieds, lorsque la litière sera bien décomposée. Reste à maîtriser les adventices (herbicide de contact ou désherbage manuel). On peut imaginer des parcs mobiles en encadrant les champs cultivés de haies vives et en alternant les cultures exigeantes après fumure et les plantes moins exigeantes (manioc, patates, niébés, arachides) pendant 2 à 4 ans.

3) Enfin dans le stade le plus intensif, la biomasse est rentrée à l'étable où le bétail vit en permanence ou dans une fosse compostière remplie de résidus de récolte lignifiés (cotonniers, sorgho, branchettes de haie vive). La production de fumier se fait à l'ombre et bénéficie 6 à 9 fois par jour de l'apport d'eau, d'azote, de potasse et de nutriments des urines de telle sorte que le développement microbien produit une température supérieure à 70 °C qui tue les germes des maladies et des semences d'adventices. Le fumier produit est de bien meilleure qualité et double de quantité (1 500 kg de fumier au lieu de 650 kg de poudrette par UBT).

Conclusions

Les urines d'origines humaines fournissent un engrais naturel bon marché, disponible pour tous, riche en azote et potasse, mais équilibré par de nombreux oligoéléments minéraux et organiques (hormones) : ses effets sont rapides, mais fugaces (quelques mois) et conviennent pour des cultures fruitières ou maraîchères intensives sur de petites surfaces.

Les urines animales complètent les rejets solides pour produire des fumiers de bonne qualité si les déjections sont couvertes par une litière riche en carbone. Les rejets étant concentrés sur de petites surfaces, ils augmentent l'hétérogénéité de la fertilité des sols des parcours et pâturages et entraînent des pertes par volatilisation, drainage et érosion. Pour réduire ces pertes il faut distribuer les urines diluées dans des trous ou sillons situés près des racines, sans toucher les plantes elles-mêmes. Leur influence sur les insectes et maladies est encore mal connue. L'usage des urines et fumiers s'est répandu depuis le renchérissement du prix des engrais minéraux : leurs effets sont semblables à applications équivalentes. Mais les usages et coutumes locales peuvent freiner l'extension de leur usage pour la production agricole.

Bibliographie

AUDOUIN L., 1991 – Rôle de l'azote et du phosphore dans la pollution animale. *Rev. Sc. Technique. Aff. Int. Épizotie*, 10 (3) : 629-654.

BADRAOUI M., STITOU M., 2002 – Status of soil survey and soil information systems in Morocco . *Options Méditerranéennes*, B, 34 p.

BOLI Z., ROOSE É., BEP B., SANON K., WAECHTER FL., 1993 – Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux en zone soudanienne du Nord-Cameroun (Mbissiri, campagnes 1991 et 1992). *Cah. Orstom, sér. Pédol., Spécial érosion et restauration des sols*, 28 (2) : 309-325.

GROUPE URD, 2009 – Latrines à déshydratation à l'est du Tchad, 5 p.

GUERIN H., ROOSE É., 2014 – « Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agro-systèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale ». In Roose É.

(éd.) : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Marseille, IRD Éditions, 19 p.

JÖNSSON H., STINTZING A. R., VINNERAS B., SALOMON E., 2004 – *Guidelines on the use of urine and faeces in crop production*. EcoSanres publication Series Report 2004, 2. Stockholm Environment Institute, Sweden.

LEDGARD S. F., STEELE K. W., SAUNDERS W. H., 1982 – Effets of cow urine and its major constituents on pasture. *Newzeeland Journal of Agricultural Research*, 25 : 61-68.

LANCON B., 1976 – Effet pissat et bousat sur le rendement d'une graminée. In : *Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets*, 122 p.

MORGAN P., 2009 – Des latrines hygiéniques à faible coût qui produisent du compost pour l'agriculture dans un contexte africain : www.ecosanres.org/pdf_files/ToiletsThatMakeCompost-FrenchVersion-lowres.pdf

- RICHERT A., GENSCH R., JÖNSSON H., STENSTRÖM T., DAGERSKOG L., 2011** – *Conseils pratiques pour une utilisation de l'urine en production agricole*. Stockholm Environment Institute (SEI), EcoSanres Series, 2011 (3) : 54 p.
- SAADULLAH M., HAQUE M., DOLBERG F., 1980** – Treating rice straw with animal urine. *Trop. Animal Prod.*, 5 (3) : 273-277.
- SCHÖNNING C., STENSTRÖM T. A., 2004** – Recommandations pour un usage sans risque de l'urine et des matières fécales dans les systèmes d'assainissement écologiques. www.reseaucrepa.org/page/782
- TANMOY KARAK, PRADIP BHATTACHARYA, 2011** – Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: an achievable reality. *Resources, conservation & recycling*, Elsevier, 55 : 400-408.

Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux

Philippe HINSINGER

Yacine NDOUR

Thierry BECQUER

Lydie CHAPUIS-LARDY

Dominique MASSE

Perturbation du cycle biogéochimique du phosphore

Au cours de la Révolution verte, à l'échelle globale, l'utilisation des engrais minéraux azotés et phosphatés s'est accrue à un rythme largement supérieur à l'accroissement de la production agricole mondiale de denrées alimentaires. Ainsi, selon les données issues de la FAO, entre 1961 et 2008, la production mondiale de céréales a été multipliée par 2,9, tandis que la consommation d'engrais azotés s'est accrue d'un facteur 8,8 et que celle des fertilisants phosphatés a augmenté d'un facteur 3,6 (HINSINGER *et al.*, 2011). En d'autres termes, si cette augmentation de la production alimentaire mondiale a permis quasiment de suivre l'évolution de la demande d'une démographie grandissante, elle s'est faite au travers d'une diminution de l'efficacité des intrants minéraux, particulièrement l'azote, mais aussi le phosphore (P). La perturbation du cycle biogéochimique du P en lien avec l'utilisation d'engrais en agriculture est considérable, en particulier en termes de flux d'érosion entre les compartiments terrestres et aquatiques (BOUWMAN *et al.* 2009 ; PENUELAS *et al.*, 2013). Ces flux de P en lien avec l'érosion constituent la principale perte de P le long de sa chaîne

d'utilisation, mais il existe de nombreuses autres pertes tout au long de celle-ci, qui est actuellement considérée comme excessivement inefficace (CORDELL *et al.*, 2009). Ainsi, sur les 14 millions de tonnes de P utilisées annuellement pour la fabrication des engrais phosphatés, il est estimé que les pertes par érosion représenteraient 8 millions de tonnes (soit 57 %), tandis que seuls 3 millions de tonnes de P se retrouveraient *in fine* dans l'alimentation humaine, soit à peine 21 % des intrants utilisés en agriculture (CORDELL *et al.*, 2009). Enfin, ces 3 millions de tonnes sont retrouvés dans les déjections humaines, dont seule une fraction est recyclée en agriculture, le reste constituant une autre perte effective majeure.

Une utilisation accrue de fertilisants phosphatés demeure particulièrement nécessaire en Afrique où, dans de nombreux cas, un déséquilibre existe entre les apports de fertilisants et les exportations par les productions et les pertes (RISKIN *et al.*, 2013), notamment par érosion, conduisant à la baisse des teneurs en nutriments et à la dégradation des sols (DRECHSEL *et al.*, 2001). À titre d'exemple, l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés, qui est en moyenne de 9,1 kg ha⁻¹ en Afrique, peut être inférieure à 1 kg ha⁻¹ dans certains pays (Congo, Madagascar, Niger, etc.) (FAO, 2014). Cependant, alors que pour l'azote, la ressource utilisée pour la fabrication des engrais minéraux n'est pas limitée, les phosphates naturels qui sont les roches exploitées pour la fabrication des engrais phosphatés sont désormais reconnus comme une ressource finie, leur pic de production devant être atteint dans les prochaines décennies (CORDELL *et al.*, 2009 ; PENUELAS *et al.*, 2013). Outre les tensions géopolitiques qui risquent de voir le jour du fait que le Maroc, avec les gisements situés en Mauritanie et dans les zones convoitées du Sahara occidental, détiendrait près de 70 % de la réserve mondiale, les prix des engrais phosphatés vont poursuivre leur augmentation actuelle, compte tenu de la demande croissante sur cette ressource finie (BRUNELLE *et al.*, 2015), creusant ainsi les écarts entre pays développés et pays en développement, notamment en Afrique subsaharienne (PENUELAS *et al.*, 2013). En outre, ces prix devraient connaître d'autres fluctuations importantes comme celle qui s'est produite en 2008, année lors de laquelle les prix ont été multipliés par 8 pour ne jamais revenir à leur niveau de 2007. Cela tient en partie au fait que, dans une moindre mesure que pour les engrais azotés, la production et le transport des engrais phosphatés sont largement dépendants de l'énergie fossile. Le prix croissant des engrais phosphatés les rend de plus en plus inaccessibles aux nombreux agriculteurs des pays en développement qui ne disposent pas d'une trésorerie suffisante. Par ailleurs, en raison notamment du manque d'infrastructures de transport, le prix des engrais est supérieur dans de nombreux pays africains à ce qu'il est en Europe (CORDELL *et al.*, 2009), et cette situation ne pourra s'améliorer sans politique ambitieuse de développement d'infrastructures routières pérennes (VAN DER VELDE *et al.*, 2013). Enfin, la raréfaction de la ressource en phosphates naturels va conduire l'industrie des engrais à devoir exploiter des gisements de moindre qualité, présentant notamment de plus fortes teneurs en contaminants problématiques tels que le cadmium. Il est fort possible ici encore que les pays les plus pauvres aient ainsi accès à des fertilisants

phosphatés de plus mauvaise qualité, conduisant à une entrée accrue de cadmium dans les denrées alimentaires qu'ils produisent. Ces différents points questionnent la durabilité des pratiques de fertilisation phosphatée actuelles et renforcent la nécessité d'envisager des solutions alternatives telles qu'une intensification écologique des agroécosystèmes (HINSINGER *et al.*, 2011).

La biogéochimie du phosphore dans les sols tropicaux

Contrairement à l'azote, P est assez abondant dans la croûte terrestre, dont la teneur moyenne est de $1,2 \text{ g P kg}^{-1}$, principalement sous la forme de minéraux phosphatés (phosphates de calcium) de la famille des apatites. Cependant, au cours de la formation des sols et de leur altération, leur teneur en P total diminue, la part présente sous forme organique augmentant au détriment des formes inorganiques, ainsi que l'ont montré des travaux sur des chronoséquences (CHADWICK *et al.*, 1999). Dans ce contexte, il a bien été montré qu'aux stades les plus jeunes de développement des sols, les écosystèmes naturels terrestres étaient principalement limités par la faible teneur et disponibilité de l'azote, alors qu'aux stades les plus avancés de leur évolution, ils devenaient davantage limités par P (VITOUSEK et FARRINGTON, 1997). C'est typiquement le cas des sols tropicaux qui se caractérisent souvent, excepté dans les régions volcaniques ou sédimentaires, par des degrés d'altération poussée et ainsi, par de faibles teneurs en P. En outre, dans ces sols, l'abondance de minéraux secondaires tels que les oxydes de fer et d'aluminium est propice à une forte rétention des ions phosphates, limitant leur disponibilité. Les sols tropicaux contribuent ainsi très largement aux sols jugés comme problématiques, en termes de limitation de la nutrition phosphatée des plantes, qui représenteraient 5,7 milliards d'hectares dans le monde (HINSINGER, 2001). Cette contrainte édaphique d'une faible disponibilité du P est telle que PENUELAS *et al.* (2013) ont récemment montré qu'elle pourrait fortement réduire la capacité des écosystèmes terrestres à séquestrer du carbone pour participer à la mitigation du changement climatique. Une caractéristique majeure des ions phosphates est qu'ils se définissent par une faible mobilité dans les sols, comparativement à d'autres anions majeurs tels que le nitrate qui est au contraire très mobile (BARBER, 1995). Cela tient au fait qu'il existe dans le cas du phosphate de nombreux processus qui contribuent à maintenir très faible sa concentration dans la solution du sol (HINSINGER, 2001) : il s'agit en premier lieu de processus physico-chimiques d'adsorption sur les constituants portant des charges positives, tels que les oxydes métalliques, les argiles et les matières organiques. La protonation croissante de leurs surfaces lorsque le pH diminue fait que leur capacité d'adsorption est accrue en sols acides, tels que fréquemment rencontrés dans les sols les plus altérés des régions tropicales. Ces processus sont plus ou moins réversibles, la désorption des ions phosphates contribuant à la réalimentation de la solution du sol se produisant

lorsque la concentration de cette dernière diminue, en particulier en présence d'autres anions minéraux (sulfate) ou organiques (citrate, par exemple) susceptibles de s'échanger (DUPUTEL *et al.*, 2013). L'abondance des oxydes de fer et d'aluminium, combinés au pH acide de nombreux sols tropicaux, contribue très largement à expliquer le caractère limitant du P dans ces sols (HINSINGER, 2001). Un second ensemble de réactions physico-chimiques intervient dans le contrôle de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol. Il s'agit des processus de précipitation et dissolution de minéraux phosphatés tels que les phosphates de calcium à pH neutre ou alcalin, et de fer ou d'aluminium dans les sols à pH très acide (LINDSAY, 1979). Le pH est un paramètre-clé de leur devenir. Les phosphates de calcium se dissolvent lorsque le pH diminue, alors que le phénomène inverse est observé pour les phosphates de fer et d'aluminium (HINSINGER, 2001). Le chaulage des sols acides peut donc modifier ces équilibres. Enfin, des processus biologiques contribuent également au contrôle de la concentration en ions phosphates dans la solution du sol. Il s'agit en premier lieu des processus d'immobilisation microbienne qui contribuent à l'élaboration de molécules organiques, et en second lieu de l'acquisition de P par les racines des végétaux. *In fine*, P est ainsi incorporé dans différents types de composés organiques qui nécessiteront d'être hydrolysés pour libérer à nouveau les ions phosphates. Ces processus de minéralisation du P organique du sol mettent en jeu des enzymes de la grande famille des phosphatases (QUIQUAMPOIX et MOUSAIN, 2005) qui sont produites par les organismes du sol et les racines des végétaux. La part du P présente dans les pools microbien et organique du sol est généralement plus importante dans les écosystèmes présentant de plus fortes teneurs en matières organiques, tels les écosystèmes forestiers. Elle tend à être plus élevée dans les sols tropicaux où les processus d'altération poussée ont contribué à la disparition plus ou moins complète du pool de P inorganique contenu dans les minéraux primaires apatitiques (TURNER *et al.*, 2013).

La biodisponibilité du phosphore pour les plantes

La biogéochimie complexe du P dans les sols, impliquant de multiples processus physico-chimiques et biochimiques, rend difficile l'évaluation de la disponibilité du P, comme en témoigne la multitude de méthodes développées dans les laboratoires d'analyse de routine (près d'une vingtaine, HARMSSEN *et al.*, 2005). Elles constituent toutes de piètres indicateurs de la biodisponibilité du P pour les plantes qui a pour caractéristique intrinsèque d'être éminemment variable selon l'espèce végétale concernée (HARMSSEN *et al.*, 2005), voire même selon le génotype au sein d'une espèce donnée, en lien avec leurs aptitudes à modifier la disponibilité du P dans la zone de sol influencée par les plantes, i.e. la rhizosphère (HINSINGER *et al.*, 2015). En raison de la faible mobilité des ions phosphates dans le sol, ce volume

de sol situé autour des racines vivantes est réduit, son épaisseur étant de l'ordre du millimètre (HINSINGER, 2001 ; HINSINGER *et al.*, 2015). Elle est le lieu des flux de matière entre le sol et la plante, qui sont liés à la coexistence de multiples processus intenses liés à la physiologie des racines et à l'écologie des communautés du sol, microbiennes en particulier (HINSINGER *et al.*, 2015) : (i) absorption de l'eau et des nutriments, se traduisant par un abaissement important de la concentration des nutriments peu mobiles comme les ions phosphates et par l'entretien d'un gradient de diffusion vers les racines, (ii) modification de pH pouvant atteindre 2 à 3 unités, (iii) exsudation de carboxylates (citrate, malate, etc.) et autres composés organiques stimulant les activités microbiennes, (iv) sécrétion de phosphatases, etc. La faible mobilité des ions phosphates dans les sols impose par ailleurs à la plante de maximiser sa surface d'échange avec le sol, en développant un système racinaire finement ramifié, en se dotant de poils racinaires capables de multiplier d'un facteur 2 à 10 le volume de la rhizosphère (LYNCH, 2007) et, pour la plupart d'entre elles, en s'associant à des champignons symbiotiques pour former des mycorhizes dont les hyphes mycéliens permettent d'accéder à des ions phosphates situés à plusieurs centimètres de la surface des racines (THONAR *et al.*, 2011). Les espèces végétales et leurs génotypes diffèrent considérablement dans leur aptitude à mettre en jeu ces divers processus, ainsi que dans les communautés microbiennes qu'ils sélectionnent dans leur rhizosphère. Ceci explique l'aptitude de certaines espèces à tolérer des conditions de très faible disponibilité ($< 5\text{-}10 \text{ mg P kg}^{-1}$ selon la méthode Olsen) où d'autres espèces manifesteraient des symptômes de carence phosphatée marqués, et seraient incapables d'accomplir leur cycle de vie. Ainsi, de nombreuses espèces de la famille des Protéacées et des Cyperacées ont été décrites en Afrique du Sud, Australie et Nouvelle-Calédonie, pour leur aptitude à tolérer de très faibles disponibilités en P du sol. Elles mettent en jeu des architectures racinaires singulières (cluster roots des Protéacées) et/ou la production massive de composés organiques (carboxylates et/ou phosphatases) permettant de mobiliser le P réputé non disponible (WRAGE *et al.*, 2010 ; LAMBERS *et al.*, 2010). Ces traits se retrouvent également chez certaines espèces cultivées, notamment parmi les légumineuses (cf. *infra*).

La gestion de la nutrition phosphatée des cultures tropicales

Mieux exploiter la diversité du monde végétal et les ressources génétiques

La sélection variétale telle qu'elle a été pratiquée lors de la Révolution verte a certainement contre-sélectionné les traits impliqués dans l'adaptation à des conditions limitantes en nutriments tels que P, puisqu'elle reposait sur le principe

de sélectionner les génotypes les plus performants en conditions d'apport massif d'intrants minéraux (LYNCH, 2007). Il convient désormais de revoir les schémas de sélection en vue de mieux tirer partie de l'aptitude de certains génotypes à faire face à des conditions de faible disponibilité, au travers de la valorisation des traits racinaires et rhizosphériques impliqués dans l'acquisition du P (WISSUWA *et al.*, 2009). Il a ainsi été montré récemment que le gène PSTOL1 de tolérance à la carence en P chez le riz, au travers de la stimulation de la formation de racines, était présent chez de nombreuses variétés locales en Asie du Sud-Est et en Afrique, mais absent chez les variétés modernes issues de la sélection sous apport d'engrais phosphatés (GAMUYAO *et al.*, 2012). Il existe de nombreuses perspectives pour tirer partie de la multiplicité des moyens déployés par les végétaux pour faire face à la faible disponibilité du P dans le sol, et augmenter ainsi l'efficacité d'acquisition de ce nutriment chez les plantes cultivées. Outre l'accent mis sur l'acquisition du P dans la plupart des recherches actuelles, des travaux sont nécessaires sur son utilisation dans la plante. LAMBERS *et al.* (2010) ont en effet montré que les végétaux des écosystèmes les plus pauvres en P avaient la faculté d'abaisser fortement la concentration en P dans leurs tissus. Réduire la teneur en P des grains, qui représente une large part du P de la plante cultivée chez les céréales et l'essentiel de ce qui est exporté, apparaît comme une voie prometteuse d'augmentation de l'efficacité d'utilisation de ce nutriment chez les plantes d'intérêt agronomique, sans impact négatif en matière d'alimentation humaine. Elle aurait au contraire l'avantage de réduire la teneur en phytate, principale forme de stockage de P dans la graine, qui est connu pour ses propriétés anti-nutritionnelles. Le phytate contribue en effet à diminuer la biodisponibilité du fer et du zinc chez les animaux monogastriques et l'homme, qui constitue un enjeu majeur en matière de nutrition et santé humaine (SANDS *et al.*, 2009).

Davantage recourir à des assemblages d'espèces dans le temps et dans l'espace

La diversité d'aptitude à faire face à la faible disponibilité du P au sein du monde végétal a déjà été soulignée précédemment, principalement à l'intérieur d'une espèce. La gamme de variation est évidemment plus grande entre espèces végétales. Les agricultures traditionnelles ont toujours su tirer parti de cette diversité fonctionnelle en associant des espèces multiples dans le temps et/ou dans l'espace, tandis que l'intensification de l'agriculture a conduit à simplifier considérablement l'agroécosystème, à rendre uniforme le champ cultivé et le système de culture, le cas le plus extrême étant la monoculture (GABA *et al.*, 2015). L'intensification écologique repose au contraire sur l'élaboration de rotations diversifiées, intégrant des plantes particulièrement efficaces pour l'acquisition du P, par exemple *via* l'exsudation d'anions organiques par des légumineuses comme le lupin blanc (HORST *et al.*, 2001) ou le pois d'Angole (AE *et al.*, 1990). L'augmentation de la disponibilité de P qui en résulte dans le sol permet à la culture suivante d'avoir une meilleure nutrition phosphatée.

Une autre voie possible repose sur la culture en association d'espèces contrastées dans leur aptitude à la mobilisation du P du sol, telles que les cultures associées céréales-légumineuses (LI *et al.*, 2007 ; HINSINGER *et al.*, 2011) ou des systèmes relevant de l'agroforesterie (ISAAC *et al.*, 2012). Cette option permet de valoriser un partage de la ressource si les deux espèces associées mobilisent des pools de P du sol différents (HINSINGER *et al.*, 2011). Elle permet également de tirer parti d'interactions positives entre les espèces associées, l'une pouvant faciliter l'acquisition du P de l'autre, par une augmentation de la disponibilité du P dans la rhizosphère (BETENCOURT *et al.*, 2012). Des espèces végétales particulièrement performantes peuvent être également utilisées en inter-culture (*cover crop* ou plantes de couverture) ou en association au titre de plantes de service, leur rôle étant d'augmenter la disponibilité du P pour la plante cultivée. Des espèces telles que *Tithonia diversifolia* sont utilisées à cette fin en Afrique subsaharienne. Plusieurs mécanismes peuvent être impliqués, notamment l'excrétion d'acides organiques dans la rhizosphère et la stimulation des activités enzymatiques (phosphatases) permettant l'hydrolyse de P organique et la production d'ions phosphates disponibles pour les plantes cultivées (GEORGE *et al.*, 2002).

Utiliser plus efficacement les intrants minéraux et organiques

Outre le problème de leur coût, les engrais phosphatés solubles s'avèrent fréquemment peu efficaces dans les sols tropicaux, en raison du pouvoir fixateur de ces derniers qui est souvent très élevé. Dans ce cadre, il s'avérerait judicieux d'utiliser des formulations à libération lente d'ions phosphates (*slow release fertilizers*) parmi lesquels figurent en premier lieu les phosphates naturels. Lorsqu'il s'agit de phosphates apatitiques, leur application directe est particulièrement judicieuse en sols acides, qui sont favorables à leur dissolution, et de nombreux travaux ont montré leur plus grande efficacité agronomique relativement aux engrais solubles conventionnels tels que le superphosphate (KHASAWNEH et DOLL, 1978). Cependant, les phosphates naturels ont des teneurs en P plus faibles que les engrais solubles, ce qui grève le prix de leur transport et diminue leur champ d'application dans les pays du Sud où les infrastructures routières sont une limite majeure au transport des matières fertilisantes (VAN DER VELDE *et al.*, 2013). Plus accessibles pour les petits agriculteurs africains, les déchets verts tirés des ressources locales peuvent être combinés aux apports de phosphates naturels pour en augmenter la solubilisation. Ainsi, NZIGUHEBA *et al.* (2002) rapportent une augmentation des rendements de maïs cultivé sur un sol kenyan, lorsque des résidus de *Tithonia diversifolia* sont combinés en quantité suffisante à un apport de phosphate naturel. En Afrique de l'Ouest, l'apport de résidus de coupe d'un arbuste local (*Piliostigma reticulatum*) permet sans apport supplémentaire de fertilisants commerciaux d'augmenter la concentration en phosphates dans la solution du sol, au bénéfice des cultures (mil et arachide) recevant cet amendement (DOSSA *et al.*, 2008).

Les matières organiques qui participent à la gestion de la fertilité biophysique et chimique des sols dans les terroirs agricoles concernent pour l'essentiel les résidus de récolte ou de défriche (y compris les systèmes racinaires des plantes cultivées ou présentes dans les jachères), les déjections animales déposées directement sur les sols ou redistribuées à partir des zones de parage ou à travers des fumiers récoltés dans les zones de stabulation, et enfin les déchets domestiques des villages. En périphérie des villes, les déchets urbains d'origine domestique ou industrielle constituent également une ressource organique largement utilisée par l'agriculture péri-urbaine. Rabekotonany (communication personnelle) a réuni, en provenance de l'île de la Réunion ou de Madagascar, 531 produits organiques résiduels de différentes origines : des effluents d'élevage plus ou moins intensifs par rapport à ceux provenant d'industries agroalimentaires. Les teneurs en P de ces produits étaient en moyenne de $15,7 \text{ g P kg}^{-1}$ (avec un coefficient de variation de 90 %). Les effluents d'élevage étaient les plus riches en P, notamment les fientes de volaille ou les lisiers de porc, 70 % du P ingéré par un animal se retrouvant dans les déjections (CHABALIER *et al.*, 2006). KABORÉ *et al.* (2011) distinguent différents produits résiduels organiques selon les catégories d'utilisateurs autour de la ville de Ouagadougou au Burkina Faso : les maraîchers préfèrent des matières riches en éléments fertilisants provenant de l'élevage, tandis que les producteurs de céréales utilisent des produits organiques avec des teneurs relativement élevées en P, K ou Ca qu'ils vont trouver notamment dans les déchets municipaux. L'accessibilité et la disponibilité de tel ou tel fertilisant ou amendement restent, bien entendu, un critère prépondérant pour ces deux catégories d'agriculteurs.

Les techniques d'usage de ces différentes matières en tant que fertilisant ou amendement sont également variées. Il s'agit principalement de mettre en adéquation la libération des nutriments contenus dans des intrants organiques avec les besoins des plantes. Ainsi, avant leur application, ces matières organiques exogènes peuvent subir des transformations plus ou moins avancées. Le compostage est l'une des pratiques les plus préconisées dans les projets de développement agricole. Par ailleurs, jouer sur les quantités apportées, notamment en concentrant les apports autour de la plante, s'avère être un principe que l'on retrouve dans de nombreuses pratiques culturales, notamment dans des sols où la disponibilité en éléments nutritifs est naturellement faible, telle qu'on peut l'observer dans les régions intertropicales. L'exemple du *zai* dans les régions sahéliennes (déjà évoqué dans un autre chapitre) peut être repris : les matières organiques apportées localement dans une cuvette aménagée dans le sol peuvent ainsi constituer des apports par unité de surface parfois très conséquents. De même, pendant la saison sèche dans les régions soudano-sahéliennes, les animaux d'élevage sont souvent concentrés sur de petites surfaces pendant plusieurs semaines, accentuant les effets sur le long terme (FRESCHET *et al.*, 2008). Plus largement, à l'échelle des écosystèmes ou agroécosystèmes, on peut observer à partir des zones d'habitation des gradients de fertilité et de rendements agricoles. Cette variabilité n'est pas liée à des différences intrinsèques des sols, mais à une redistribution des ressources organiques disponibles sur le terroir agricole (MANLAY *et al.*, 2004a, b).

Dans cette étude, le bilan des entrées et sorties de P entre les différentes parties du terroir d'un village de Haute Casamance montre que les champs de brousse cultivés en rotation culture-jachère exportent du P vers les champs de case qui sont cultivés en permanence en céréales pour la production vivrière. Ces transferts sont principalement dus à l'élevage, soulignant l'importance de l'intégration de l'agriculture et de l'élevage dans la viabilité des systèmes de production agricole soudano-sahéliens.

L'augmentation du prix des engrais minéraux importés a replacé au centre des réflexions l'intégration des déjections animales, voire humaines, et le recyclage des effluents produits localement dans le raisonnement de la fertilité des sols. Une étude en cours à Madagascar (Fanjaniaina *et al.*, communication personnelle) montre que les exportations par une culture de riz peuvent être pour partie compensées par des apports de fumier. Les analyses chimiques de la minéralomasse du riz, conduites sur 70 parcelles en milieu paysan, ont montré que les exportations étaient, en moyenne, de 13,7 kg de N, 2 kg de P, 3 kg de K par tonne de grains et 11,5 kg de N, 0,6 kg de P, 12,0 kg de K par tonne de pailles. Pour le fumier apporté aux parcelles, les teneurs étaient de 9 kg de N, 1 kg de P, 7 kg de K. Un apport de 5 à 6 t ha⁻¹ de fumier serait donc nécessaire pour compenser les exportations occasionnées par une production de 2 tonnes de grains et 2 tonnes de pailles par hectare. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une bonne gestion des ressources organiques dans des systèmes intégrant agriculture et élevage au niveau des exploitations agricoles, ou au niveau des paysages, afin de compenser les transferts de fertilité liés aux exportations des cultures. Ils montrent aussi le déséquilibre potentiel entre une production de paille de l'ordre de 2 t ha⁻¹ et des besoins en fumier d'environ 5-6 t ha⁻¹ pour avoir un bilan équilibré. L'utilisation raisonnée des autres ressources organiques de l'exploitation, incluant les déjections humaines, est donc nécessaire, sans que cela ne soit suffisant. Il est toutefois à noter que, dans le cas d'une céréale comme le riz, le flux de P est nettement moins important que ceux de N et K.

Évaluer le potentiel d'inoculants microbiens et de bio-effecteurs

Une alternative aux intrants minéraux repose dans l'usage de biofertilisants, i.e. divers types d'inoculants microbiens. Parmi eux figurent trois catégories principales : (i) les champignons mycorhizogènes, en vue de faciliter la formation de la symbiose mycorhizienne des cultures, (ii) les micro-organismes solubilisateurs de phosphates, principalement des bactéries, mais aussi des champignons qui agissent en augmentant la disponibilité du P minéral (par la production d'acides) et/ou organique (par la production d'enzymes) et (iii) des rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR : *plant growth promoting rhizobacteria*) dont les modes d'action sont variés, résultant souvent en une stimulation de la croissance racinaire *via* la production de substances hormonales. L'efficacité de ces divers inoculants microbiens n'est pas souvent démontrée au champ cependant (FAYE *et al.*, 2013), principalement parce que les populations microbiennes introduites

sont peu compétitives par rapport aux communautés résidentes des sols, mais également en raison de la mauvaise qualité de nombreuses formulations commerciales qui souffrent d'un manque réel de contrôle qualité en amont de la commercialisation (HERRMANN et LESUEUR, 2013). De nombreux auteurs ont promu l'utilisation de souches isolées localement, en vue d'obtenir des inoculants plus compétitifs, mais cette stratégie ne permet pas toujours d'atteindre une bonne efficacité (NDUNG'U-MAGIROI, 2012). La combinaison de différents types d'inoculants peut cependant s'avérer parfois très efficace, comme l'ont montré MÄDER *et al.* (2011) pour des combinaisons de PGPR et d'inoculants mycorrhiziens sur des systèmes céréaliers en Inde. Il existe, en plus des inoculants microbiens, de nombreux produits qui ont la capacité de stimuler la croissance végétale au travers de leurs effets sur les systèmes racinaires, qualifiés de bio-effecteurs ou bio-stimulants, mais leur efficacité au champ pour l'amélioration de la nutrition phosphatée a été à ce jour peu éprouvée dans les contextes tropicaux.

Maintenir et favoriser l'activité de la macrofaune du sol

Les organismes géophages de la macrofaune du sol peuvent affecter le cycle du P dans le sol. L'ingestion sélective de particules fines et les conditions physico-chimiques particulières rencontrées durant le transit par l'intestin modifient les formes du P du sol (CHAPUIS-LARDY *et al.*, 2011). La stimulation de l'activité microbienne initiée durant le transit intestinal et qui perdure dans les déjections fraîches conduit à une minéralisation accrue du P organique. Ainsi, les déjections de certaines espèces de vers de terre ou de termites couramment observées en milieu tropical ont une teneur en phosphates plus élevée que le sol environnant non ingéré (CHAPUIS-LARDY *et al.*, 1998, 2011 ; LÓPEZ-HERNÁNDEZ *et al.*, 2006). Dans le cas du ver de terre pantropical *Pontoscolex corethrurus*, CHAPUIS-LARDY *et al.* (2009) ont montré que le passage par le tractus intestinal du ver en sols à haut pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphates favorisait également la dynamique d'échange entre la phase solide et la solution du sol. L'impact des organismes de la macrofaune dépend cependant des propriétés particulières du sol, de la source de P organique et des comportements spécifiques des organismes, notamment leur régime alimentaire. Favoriser la diversité, l'abondance et l'activité de la macrofaune du sol par des pratiques culturales adaptées (e.g. agriculture de conservation) est une piste non négligeable pour améliorer la gestion de la nutrition phosphatée des cultures en milieu tropical.

Conclusions

Le phosphore est une ressource rare dans de nombreux sols des régions inter-tropicales, qui par ailleurs présentent fréquemment un fort pouvoir fixateur restreignant encore davantage la disponibilité de ce nutriment qui constitue ainsi

un des principaux facteurs limitants dans les agroécosystèmes de ces régions. L'accès à la fertilisation phosphatée est cependant restreint pour des raisons de manque de trésorerie et d'infrastructures (coûts de transport rédhitoires). Le caractère non renouvelable et fini des gisements de phosphates naturels utilisés pour fabriquer les engrais phosphatés remet en cause la durabilité des pratiques de fertilisation à l'échelle mondiale et se traduit par une augmentation inéluctable des prix de ces fertilisants minéraux. Dans ce contexte, il est essentiel de mieux utiliser l'ensemble des ressources (roches, déchets et déjections) disponibles localement, et de développer des approches alternatives telles que les pratiques relevant de l'intensification écologique des agroécosystèmes, qui sont fondées sur une meilleure valorisation de processus biologiques ou écologiques. Parmi ces pratiques figurent notamment l'exploitation de la diversité végétale, au travers de la sélection de variétés efficaces dans leur capacité d'acquisition et d'utilisation de P, au travers de l'utilisation de rotations ou d'associations de cultures qui permettent de mieux exploiter les différents pools de P du sol, minéral et organique. Les autres pratiques reposent notamment sur une meilleure utilisation des intrants organiques comme source alternative de P, ou de biofertilisants (inoculants microbiens). La combinaison de ces différentes pratiques mérite d'être davantage explorée et développée. La nécessité de préserver cette précieuse ressource que constitue le P des sols tropicaux renforce, en outre, le besoin de mettre en œuvre des techniques de travail du sol minimisant les pertes par érosion (abordée dans d'autres chapitres), telles que les techniques développées dans le cadre de l'agriculture de conservation.

Bibliographie

- AE N. A. J., OKADA K., YOSHIHARA T., JOHANSEN C., 1990** – Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*, 248 : 477-480.
- BARBER S. A., 1995** – *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*, 2nd edn. Wiley, New York.
- BETENCOURT E., DUPUTEL M., COLOMB B., DESCLAUX D., HINSINGER P., 2012** – Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biol. Biochem.*, 46 : 181-190.
- BOUWMAN A. F., BEUSEN A. H. W., BILLEN G., 2009** – Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB0A04.
- BRUNELLE T., DUMAS P., SOUTY F., DORIN B., 2015** – Evaluating the impact of rising fertiliser prices on crop yields. *Agric. Economics*, 46, 653-666.
- CHABALIER P., VAN DE KERCHOVE V., SAINT MACARY H., 2006** – *Guide de la fertilisation organique à la Réunion*. Montpellier, Cirad, 362 p.
- CHADWICK O. A., DERRY L. A., VITOUSEK P. M., HUEBERT B. J., HEDIN L. O., 1999** – Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 397 : 491-497.
- CHAPUIS-LARDY L., BROSSARD M., LAVELLE P., SCHOULLER E., 1998** – Phosphorus transformations in a Ferralsol through ingestion by *Pontoscolex corethrurus*, a geophagous earthworm. *Eur. J. Soil Biol.*, 34 : 61-67.
- CHAPUIS-LARDY L., RAMIANDRISOA R. S., RANDRIAMANANTSOA L., MOREL C., RABEHARISOA L., BLANCHART E., 2009** – Modification of P availability by endogeic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy Highlands. *Biol. Fertil. Soils*, 45 : 415-422.

- CHAPUIS-LARDY L., LE BAYON R. C., BROSSARD M., LÓPEZ-HERNÁNDEZ D., BLANCHART E., 2011 – « Role of soil macrofauna in P cycling ». In Bünenmann E. K., Oberson A., Frossard E. (eds) : *Phosphorus in Action – Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*, Springer Soil Biology Series 26, Springer, NY, USA : 199-213.
- CORDELL D., DRANGERT J.-O., WHITE S., 2009 – The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environ. Change*, 19 : 292-305.
- DOSSA E., BAHAM J., KHOUMA M., SENE M., KIZITO F., DICK R. P., 2008 – Phosphorus Sorption and Desorption in Semiarid Soils of Senegal Amended With Native Shrub Residues. *Soil Sci.*, 173 : 669-682.
- DRECHSEL P., GYIELE L., KUNZE D., COFIE O., 2001 – Population density, soil nutrient depletion, and economic growth in sub-Saharan Africa. *Ecol. Economics*, 38 : 251-258.
- DUPUTEL M., DEVAU N., BROSSARD M., JAILLARD B., JONES D. L., HINSINGER P., GÉRARD F., 2013 – Citrate adsorption can decrease soluble phosphate concentration in soils: Results of theoretical modeling. *Appl. Geochem.*, 35 : 120-131.
- FAO, 2014 – *FAO statistical yearbook 2014: Africa food and agriculture*. FAO, Regional Office for Africa, Accra.
- FAYE A., DALPE Y., NDUNG’U-MAGIROI K., JEFWA J., NDOYE I., DIOUF M., LESUEUR D., 2013 – Evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants. *Can. J. Plant. Sci.*, 93 : 1201-1208.
- FRESCHET G., MASSE D., HIEN E., SALL S. N., CHOTTE J.-L., 2008 – Long-term evolution of organic matter from manuring practice in a tropical cultivated soil and its consequences on soil ecosystem services. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 123 : 175-184.
- GABA S., LESCOURRET F., BOUDSOCQ S., ENJALBERT J., HINSINGER P., JOURNET E. P., NAVAS M. L., WÉRY J., LOUARN G., MALÉZIEUX E., PELZER E., PRUDENT M., OZIER-LAFONTAINE H., 2015 – Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agron. Sust. Dev.*, 35, 607-623.
- GAMUYAO R., CHIN J. H., PARIASCA-TANAKA J., PESARESI P., CATAUSAN S., DALID C., SLAMET-LOEDIN I., TECSON-MENDOZA E. M., WISSUWA M., HEUER S., 2012 – The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. *Nature*, 488 : 535-539.
- GEORGE T. S., GREGORY P. J., WOOD M., READ D. J., BURESH R. J., 2002 – Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. *Soil Biol. Biochem.*, 34 : 1487-1494.
- HARMSSEN J., RULKENS W., EIJSACKERS H., 2005 – Bioavailability: concept for understanding or tool for predicting? *Land Contam. & Reclamation*, 13 : 161-171.
- HERRMANN L., LESUEUR D., 2013 – Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Appl. Microbiol. Biotech.*, 97 : 8859-8873.
- HINSINGER P., 2001 – Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237, 173-195.
- HINSINGER P., BETENCOURT E., BERNARD L., BRAUMAN A., PLASSARD C., SHEN J., TANG X., ZHANG F., 2011 – P for two, sharing a scarce resource – Soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiol.*, 156 : 1078-1086.
- HINSINGER P., HERRMANN L., LESUEUR D., ROBIN A., TRAP J., WATHAISONG K., PLASSARD C., 2015 – Impact of roots, microorganisms, and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. *Ann. Plant Rev.*, 48 : 377-408.
- HORST W. J., KAMH M., JIBRIN J. M., CHUDE V. O., 2001 – Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant Soil*, 237 : 211-223.
- ISAAC M. E., HINSINGER P., HARMAND J. M., 2012 – Nitrogen and phosphorus economy of a legume tree-cereal intercropping system under controlled conditions. *Sci. Tot. Environ.*, 434 : 71-78.
- KABORÉ W. T., HIEN E., ZOMBRE P., COULIBALY A., HOUOT S., MASSE D., 2011 – Valorisation de divers substrats organiques dans l’agriculture péri-urbaine de Ouagadougou (Burkina Faso) pour l’amendement et la fertilisation des sols : acteurs et pratiques. *Biotech. Agron. Soc. Environ.*, 15 : 271-286.
- KHASAWNEH F. E., DOLL E. C., 1978 – The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30 : 159-206.
- LAMBERS H., BRUNDRETT M. C., RAVEN J. A., HOPPER S. D., 2010 – Plant mineral nutrition in

ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. *Plant Soil*, 334 : 11-31.

LI L., LI S. M., SUN J. H., ZHOU L. L., BAO X. G., ZHANG H. G., ZHANG F. S., 2007 – Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104 : 11192-11196.

LINDSAY W. L., 1979 – *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York, USA.

LÓPEZ-HERNÁNDEZ D., BROSSARD M., FARDEAU J. C., LEPAGE M., 2006 – Effect of different termite feeding groups on P sorption and P availability in African and South American savannas. *Biol. Fertil. Soils*, 42 : 207-214.

LYNCH J. P., 2007 – Roots of the second green revolution. *Aust. J. Bot.*, 55 : 493-512.

MÄDER P., KAISER F., ADHOLEYA A., SINGH R., UPPAL H. S., SHARMA A. K., SRIVASTAVA R., SAHAI V., ARAGNO M., WIEMKEN A., JOHRI B. N., FRIED P. M., 2011 – Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India. *Soil Biol. Biochem.*, 43 : 609-619.

MANLAY R. J., ICKOWICZ A., MASSE D., FLORET C., RICHARD D., FELLER C., 2004A – Carbon, nitrogen and phosphorus spatialized budget of a village territory of the West African savanna – I. Element pools and mixed-farming system structure. *Agric. Syst.*, 79 : 55-81.

MANLAY R. J., ICKOWICZ A., MASSE D., FLORET C., FELLER C., RICHARD D., 2004B – Carbon, nitrogen and phosphorus spatialized budget of a village territory of the West African savanna – II. Element flows and functioning of the mixed-farming system. *Agric. Syst.*, 79 : 83-107.

NDUNG’U-MAGIROI K. W., HERRMANN L., OKALEBO J. R., OTHIENO C. O., PYPERS P., LESUEUR D., 2012 – Occurrence and genetic diversity of phosphate-solubilizing bacteria in soils of differing chemical characteristics in Kenya. *Ann. Microbiol.*, 62 : 897-904.

NZIGUHEBA G., MERCKX R., PALM C. A., MUTUO P., 2002 – COMBINING *TITHONIA DIVERSIFOLIA* AND FERTILIZERS FOR MAIZE PRODUCTION IN A PHOSPHORUS DEFICIENT SOIL IN KENYA. *AGROFOR. SYST.*, 55 : 165-174.

PENUELAS J., POULTER B., SARDANS J., CIAIS P., VAN DER VELDE M., BOPP L., BOUCHER O., GODDERIS Y., HINSINGER P., LLUSIA J., NARDIN E., VICCA S., OBERSTEINER M., JANSSENS I. A., 2013 – Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Comm.*, 4.

QUIQUAMPOIX H., MOUSAIN D., 2005 – « Enzymatic hydrolysis of organic phosphorus ». In Turner B. L., Frossard E., Baldwin D. S. (eds) : *Organic Phosphorus in the Environment*, Wallingford, Cabi Publishing : 89-112.

RISKIN S. H., PORDER S., SCHIPANSKI M. E., BENNETT E. M., NEILL C., 2013 – Regional Differences in Phosphorus Budgets in Intensive Soybean Agriculture. *BioScience*, 63 : 49-54.

SANDS D. C., MORRIS C. E., DRATZ E. A., PILGERAM A. L., 2009 – Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods. *Plant Sci.*, 177 : 377-389.

THONAR C., SCHNEPF A., FROSSARD E., ROOSE T., JANS A. J., 2011 – Traits related to differences in function among three arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 339 : 231-245.

TURNER B. L., LAMBERS H., CONDRON L. M., CRAMER M. D., LEAKE J. R., RICHARDSON A. E., SMITH S. E., 2013 – Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. *Plant Soil*, 367 : 225-234.

VAN DER VELDE M., SEE L., YOU L., BALKOVIC J., FRITZ S., KHABAROV N., OBERSTEINER M., WOOD S., 2013 – Affordable Nutrient Solutions for Improved Food Security as Evidenced by Crop Trials. *PLOS One* 8, e60075.

VITOUSEK P. M., FARRINGTON H., 1997 – Nutrient limitation and soil development: experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochem.*, 37 : 63-75.

WISSUWA M., MAZZOLA M., PICARD C., 2009 – Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits. *Plant Soil*, 321 : 409-430.

WRAGE N., CHAPUIS-LARDY L., ISSELSTEIN J., 2010 – Phosphorus, plant biodiversity and climate change. *Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science*, Sustainable Agriculture Reviews 3, Lichtfouse E. (Series Ed.), Springer, Dordrecht : 147-169.

Conclusions de la deuxième partie

Effets de la gestion de la biomasse

Éric ROOSE

Dans la première partie de cet ouvrage, les auteurs ont montré que la dégradation des sols en question dépend essentiellement de la perte de nutriments et de carbone par minéralisation microbienne et par érosion.

Dans cette deuxième partie, nous tirons les conclusions des divers auteurs sur les effets des jachères courtes composées de légumineuses arbustives, des bananeraies, des arbres à croissance rapide, sur l'efficacité du brûlis de la biomasse et des charbons de bois, des fumiers et du paillage sur la fertilité organique des sols et la production des cultures.

Les systèmes de jachère et de brûlis de la biomasse

Dans leur ouvrage de synthèse du projet « Jachère en Afrique occidentale », FLORET, LE FLOCH', PONTANIER, SERPANTIÉ *et al.* (2000) ont analysé l'impact des jachères longues et naturelles sur la biodiversité, le rendement des cultures suivantes, l'agressivité des adventices et l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols au bout d'une mise en défens d'autant plus longue que le bioclimat est sec et pauvres en nutriments.

Ikpe *et al.* ont montré sur deux essais dans le sud du Nigeria sur sol ferrallitique acide que des jachères courtes de légumineuses (*Tephrosia* ou *Lablab*) de deux ans, pâturées ou non, ont réduit considérablement les risques de ruissellement et d'érosion : par conséquent, les sols de ces jachères arbustives à légumineuses présentent un meilleur taux de C, N, P, K, Ca, Mg., que la jachère naturelle, mais pas forcément un meilleur pH. Le broutage par les moutons rapporte 9 % de rendement en manioc et maïs en plus, grâce à la récupération des urines. Les urines apportent 1/3 de l'azote et 1/10 de K, Ca, Mg, P de l'apport du fumier. L'adoption de cette technique ne sera durable que si les paysans estiment que le bilan économique est positif malgré le supplément de travail.

Razafindrakoto a étudié l'influence de jachères de 5 à 10 ans de légumineuses arbustives. Par rapport à la jachère naturelle à *Aristida multicaulis*, les jachères de *Flemingia congesta*, *Calliandra calothyrsus* et surtout *Tephrosia vogelii* ont amélioré fortement la fertilité du sol dégradé acide (Ultisol), l'infiltration, la MO et la stabilité structurale et réduit le ruissellement, l'érosion et les pertes en nutriments. L'abondance en litière, MO et azote sont à l'origine de cette restauration de la productivité en haricots. Mais on peut se demander s'il est nécessaire de prolonger sur 5 à 10 ans la jachère ou si seulement 3 ans suffisent, car les paysans manquent de terre. Enfin, l'enfouissement de toute cette biomasse demande beaucoup d'énergie : ne pourrait-on pas tenter de semer directement les cultures sous la litière ? Les vers de terre et autres fousisseurs se chargeront comme sous forêt d'enfouir les résidus organiques.

Duchaufour *et al.* ont constaté dans les collines du Burundi qu'après dix années de culture intensive, les sols de bananeraie sont en meilleur état que les parcelles en friche : épais horizon humifère toujours frais, forte fixation de carbone et enracinement plus profond des cultures. Cela proviendrait d'une production abondante de biomasse au cours de la culture des bananiers, laquelle, rangée perpendiculairement à la pente, réduirait de 60 % le ruissellement et l'érosion en nappe. Avec un apport minéral complémentaire, « ces jachères à bananeraie » apportent une forte valeur ajoutée par actif (ce qui permet une densité de 1 000 habitants/km²) plus forte que dans le système caféier paillé, pourtant très prisé localement.

Harmand *et al.* ont comparé la restauration de la productivité des sols après cinq années de jachère herbacée (*Andropogon*) ou forestière à *Acacia polyacanta*, à *Senna siamea* ou à *Eucalyptus camaldulensis* au sud de Garoua (nord du Cameroun), sur sol ferrugineux tropical, sableux, pauvre en MO et en nutriments. La pluie annuelle moyenne est de l'ordre de 1 050 mm concentrés en six mois. La jachère arborée a augmenté la production de biomasse et l'ETR, réduit le drainage et la lixiviation des nutriments par rapport aux jachères herbacées. Malgré l'exportation du bois, la jachère forestière, soumise au feu, transfère mieux les minéraux des horizons de plus de 40 cm de profondeur vers la litière et l'horizon humifère que la savane herbacée. Les *Acacia polyacanta* fixent l'azote de l'air, le stockent efficacement dans le réseau racinaire et recyclent rapidement les nutriments de la litière de telle sorte que le rendement des cultures

après 5 ans de jachère est le meilleur. Les eucalyptus prélèvent beaucoup de nutriments du sol et les stockent dans leur biomasse (peu de racines, mais beaucoup de litière minéralisant lentement), mais restituent peu de nutriments : ils acidifient le sol et réduisent sa capacité d'échange de cations. Le *Senna siamea* démarre rapidement, mais ralentit brutalement le cycle de l'azote : la production des cultures après jachère est proche de celle après graminées. Au bout de 5 ans, le sol sous jeune plantation forestière est moins riche que sous savane, mais après un certain temps de latence, variable selon les espèces, le sol forestier accumule plus de MO et de nutriments que les savanes herbeuses. L'eucalyptus semble ici peu adapté à un système agroforestier (trop gourmand en eau et nutriments) ; cependant, le brûlis de sa litière et des résidus d'exploitation corrige amplement l'effet dépressif de l'arbre sur le pH, la CEC et le taux de calcium et phosphore assimilable. L'*acacia polyacanta* pourrait être conservé dans les champs sur certaines lignes pour constituer un parc fournissant du petit bois d'énergie et des feuilles (fourrage ou paillage) et continuant à apporter du C et N aux cultures.

Peltier *et al.* décrivent les résultats d'un projet de développement de la production vivrière et énergétique (charbon de bois) sur les sols sableux très pauvres du plateau Bateke à proximité de Kinshasa, la capitale du Congo RDC. En 2004, le projet Mampu pouvait être satisfait d'avoir augmenté la production vivrière (maïs et manioc), la production de charbon de bois à partir des plantations d'*Acacia auriculiformis*, les revenus des coopérateurs et la création d'emplois ruraux sur 8 000 ha de sols pauvres. L'alternance de cultures vivrières et la plantation forestière ont enrichi le sol en MO, amélioré la CEC, mais réduit le pH. Seul le brûlis des branchages et de la litière après récolte et carbonisation du bois permet de remonter le pH pendant les deux années de culture. Cependant au cycle suivant (après 24 ans de production intensive sans apport minéral), le sol commence à montrer des signes de fatigue due à l'exportation de minéraux par les cultures intensives vivrières et forestières : il faudra envisager l'apport de phosphate de chaux broyé avant la culture de maïs. D'autres modèles agroforestiers basés sur la valorisation des espèces locales à usages multiples devraient être testés sur des sols moins pauvres.

Rumpel a montré que l'enfouissement de grandes quantités de charbon de bois pyrolysé (biochar), peu sensible à la dégradation microbienne en régions chaudes, pourrait amender durablement les sols sableux tropicaux pauvres en nutriments, en capacité de stockage des nutriments, du carbone et de l'eau. Combiné à des apports raisonnés de nutriments minéraux ou à du compost, le biochar (20 t/ha) améliore le rendement des cultures en Bolivie de 30 à 140 %, retient mieux le N + P + C, allège les sols tassés et améliore l'infiltration et la résistance à l'érosion hydrique.

Nzila a étudié une technique traditionnelle africaine d'écobuage consistant à grouper dans des billons et brûler à l'étouffée les hautes herbes de la savane de la vallée de Niari au Congo Brazzaville. Cette technique très ancienne et connue en Amazonie a permis d'augmenter la production de manioc et de prolonger la

période de culture entre deux jachères. Le brûlis à l'étouffée sous une fine couche de terre a certes réduit le carbone de 30 % et l'azote total de 20 %, mais augmenté l'azote ammoniacal (facilement assimilable), le phosphore assimilable, les bases échangeables et le pH, ce qui a permis de réduire la toxicité du manganèse et de l'aluminium.

Roose a montré l'influence très positive du paillage sur la réduction du ruissellement et de l'érosion, si bien qu'après paillage complet sous bananeraie, la restauration de la production est beaucoup plus efficace. Au Burkina Faso, l'apport de biomasse sous forme de paillage ou enfouï par labour de résidus de céréales (riches en cellulose) ou de branchettes (plus riches en lignine) n'a guère donné d'amélioration significative d'un sol sableux. Le rendement en grain de sorgho a augmenté de 10 à 40 % pour une dose de 1,6 t MS/ha/an (mais non significatif statistiquement) et de 160 à 210 % pour un apport de 6 t de MS/ha/an. Cependant, la disponibilité de cette ressource en branchettes n'est pas courante en zone sahélienne et dispersée en zone soudanienne : il faudrait donc augmenter la densité des parcs et des haies vives sur les zones cultivées. Mais de toute façon, il restera une vive concurrence entre l'alimentation du bétail, le besoin en énergie et la couverture des sols dégradés.

Les fumiers, le compost ou le paillage

Personne ne conteste l'intérêt du fumier (et à défaut, du compost) pour amender et fertiliser les sols cultivés tropicaux, mais on dispose à peine du tiers de la biomasse souhaitable pour en produire assez pour les terres cultivées (6 t de fumier tous les 2 ans) : il y a donc forte compétition entre les divers usages de la biomasse (fourrage, bois de service/énergie/construction, paillage). En outre, il s'agit d'un transfert de nutriments aux dépens des parcours. Ces parcours étant appauvris donnent des fourrages carencés, des animaux et des fumiers carencés, si bien qu'il faut intervenir pour combler les exportations par les cultures et par l'élevage, en particulier par du phosphate de chaux pulvérisé intégré dans l'amendement organique. Le compost est l'alternative au fumier dans les zones sans bétail. Son efficacité est la même que celle du fumier, mais il est limité par le travail, l'eau et la quantité de biomasse nécessaire pour déclencher la fermentation. Le compost exige beaucoup d'eau et de travail, mais n'apporte ni nourriture, ni revenu comme l'élevage (lait et viande) ! Fumiers et compost produisent beaucoup de gaz à effet de serre : près de 40 % du carbone sont ainsi perdus pour le sol.

Guerin a analysé les transformations et réduction des fourrages (2 t de MS/UBT/an) par la digestion des fibres, des hémicelluloses et produits azotés (capture par la carcasse et pertes gazeuses énergétiques de 50 % du carbone et 20 % des minéraux)

avant la production de 660 kg/UBT/an de poudrettes dans le parc, plus les urines et autant sur le parcours où le bétail reste une dizaine d'heures par jour. Il y a transfert de fertilité du parcours vers les champs cultivés qui représente en système extensif 350 kg de carbone, 10 kg d'azote, 0,7 kg de P, 2 kg de K et 2 à 4 kg de Ca et Mg par UBT. À cet apport solide par les fèces il faut joindre l'apport par les urines de l'ordre de 15 kg d'azote (très volatil) et 20 kg de potasse.

Ganry et Thuriès ont cherché à améliorer la quantité et la qualité des fumiers (C/N et rapport taux de fibres/taux de contenu cellulaire) produits généralement dans les fermes de la zone semi-aride d'Afrique occidentale. Ils ont montré qu'on pouvait distinguer trois types de « fumier » de qualité croissante. Les poudrettes, mélange de fèces séchés et pulvérisés mêlés à la terre du parc, appauvri à la fois par le soleil et par les eaux de pluies, n'ont pas fermenté et gardent donc quantité de graines d'adventices et de germes de maladies. Le deuxième type est obtenu en apportant régulièrement de la paille sous les animaux constituant ainsi une litière riche en carbone susceptible de fixer l'azote des urines, de doubler la masse du fumier (1,200 kg de fumier-MS.UBT/an) et d'augmenter l'apport en cations (indispensables pour maintenir le pH). Enfin, le troisième type – rarement rencontré – est le vrai fumier humecté par les urines des animaux élevés à l'étable sur une litière et accumulé en tas ou en fosse, bien abrités du soleil et de la pluie, pour évoluer en compost débarrassé des germes de maladies et des adventices (fermentation poussée à plus de 70 °C). Les améliorations proposées portent sur l'augmentation de la biomasse fourragère (cultures fourragères, agroforesterie, haies vives et parcs de légumineuses), l'apport de phosphate de chaux dans le fumier en cours de compostage et l'optimisation du mode d'apport du fumier à la culture. Il est bien connu que l'apport de fumier améliore le taux de MO du sol et les propriétés qui y sont attachées. Il semble en outre que le fumier améliore la profondeur de l'enracinement, la résistance à la sécheresse et aux maladies, le stockage d'eau et de nutriments, la fixation d'azote par les légumineuses et la qualité nutritionnelle des céréales. Le compostage de fumier et des pailles réduit la phytotoxicité induite par les phénols libérés lors de la décomposition des pailles (allélopathie). La durabilité de ces qualités est dépendante du rapport C/N et du taux de fibres/contenu cellulaire : si la biomasse est riche en azote, l'effet fumier ne dure guère au-delà de deux ans.

La dose recommandée de 6 t MS/ha tous les deux ans correspond en moyenne à $30\text{ N} + 10\text{ P}_2\text{O}_5 + 35\text{ K}_2\text{O}$, au regard de la dose annuelle minimale d'engrais minéraux pour le mil de $21\text{ N} + 10\text{ P}_2\text{O}_5 + 10\text{ K}_2\text{O}$ et de l'exportation d'une tonne de mil = $30\text{ N} + 10\text{ P}_2\text{O}_5 + 56\text{ K}_2\text{O}$. Pour un objectif de rendement de 1 t/ha/an de mil, l'apport minéral du fumier serait donc suffisant, compte tenu des apports en potassium par le sol, mais au-delà de ce rendement, un apport d'engrais supplémentaire est nécessaire.

Sabir et Roose ont observé dans les zones de parcours semi-arides du Maroc, l'importance de l'élevage d'ovins et caprins pour la survie des petits fermiers des montagnes. Sans nier l'intérêt de la production de fumier pour maintenir la capacité de production des sols cultivés, ils ont observé que le surpâturage

(à partir de 2 ovins/ha) entraîne aussi la dégradation de la végétation (diversité et couvert végétal), le tassement, l'encroûtement et la dénudation des sols, l'augmentation du ruissellement, l'érosion en rigole et le ravinement et finalement la baisse de production fourragère et de fumier. Si l'élevage intensif peut entretenir la fertilité des sols cultivés, dès qu'il dépasse la charge potentielle, il dégrade les sols des parcours, d'autant plus que le climat est aride.

Rishirumuhirwa *et al.* ont montré sur maïs, l'effet dégradant de trois années d'érosion cumulant 0,1 à 58 t/ha/3 ans sous bananeraie en fonction de la densité décroissante des bananiers et de la surface paillée et 154 t/ha/3 ans sur sol nu. Suite à ces essais, ils ont comparé trois modes de restauration des sols : i/ apport de 9 t/ha de MS de fumier de ferme, ii/ le même plus NPK et iii/ le même plus 500 kg de chaux broyée. Plus le sol est dégradé par l'érosion et plus il est difficile de le restaurer pour des productions intensives de maïs. Par ailleurs, l'apport de 9 t de fumier MS/ha permet de produire 30 quintaux de maïs-grains (soit assez pour nourrir 1 200 personnes/km²) et un complément raisonné de NPK peut fournir jusqu'à 40 quintaux/ha, ce qui est remarquable pour ces sols ferrallitiques très pauvres. Le rôle de l'apport de fumier est donc essentiel et le plus rentable, mais pour restaurer une production intensive, il faut compléter par un apport raisonnable d'engrais minéraux (carence importante en phosphore). Contrairement à d'autres essais au Burundi, le chaulage n'a pas été rentable et a même réduit le rendement en maïs.

Apport de biomasse urbaine, industrielle ou de paillage et d'engrais minéral

On vient de constater le manque de biomasse disponible pour produire assez de fumier, de compost ou de paillage pour entretenir la fertilité de toutes les terres cultivées des terroirs villageois dans diverses régions tropicales. Or les villes reçoivent des campagnes une grande quantité de nourriture, de bois et de fourrages qui laissent toutes sortes de « déchets organiques urbains » que les services de voirie ont bien du mal à maîtriser et évacuer. Et ces déchets familiaux ou industriels (élevage industriel de poulets, production de sucre, de bière, de coton, les abattoirs, etc.) contiennent du carbone et des nutriments en proportions variables. D'où l'idée de ne plus les détruire par incinération, mais de les valoriser en les compostant et les distribuant en périphérie des villes où la production agricole est particulièrement intense.

Masse *et al.* ont étudié la richesse en nutriments des déchets urbains accumulés depuis plusieurs années dans les décharges municipales en tant que réservoirs d'amendement des villes de Dakar (Sénégal), de Ouagadougou (Burkina) et Antananarivo (Madagascar). Ces déchets domestiques ou industriels

(agroalimentaire), relativement riches en éléments fertilisants pour les sols sont une opportunité pour améliorer durablement la production agricole et les qualités des sols cultivés, aux abords des villes. Les essais avec le sorgho ou la tomate comme indicateurs ont montré que les effets de divers criblés organiques issus des décharges de ces grandes villes ont eu des effets très variables (de - 10 à + 500 %) sur le rendement des cultures en fonction de leur composition et des situations. Il faut donc évaluer les qualités des criblés de chaque décharge et les comparer aux besoins des sols et des productions locales. Cependant, ces MO peuvent servir d'amendement carboné et doivent être complétés par des apports raisonnés de nutriments minéraux (en particulier P et N).

Seh *et al.* ont testé sur la culture de salade dans un bas-fond de la périphérie de Yaoundé (Cameroun) l'intérêt environnemental, agronomique, économique et sanitaire de l'usage de compost urbain, de fumier d'élevage de poulet, des engrais minéraux et leurs combinaisons avec les amendements organiques. L'effet sur le rendement en salade est manifeste et le meilleur est l'apport de fumier combiné à NPK complémentaire (+ 200 %). L'impact sur le sol du fumier est significatif pour la MO, l'azote, les bases et la CEC, mais les phosphates continuent à baisser sans apports complémentaires minéraux. La rentabilité économique des engrais NPK est meilleure que celle des amendements organiques (chers localement), mais le compostage des déchets rend de grands services aux administrations urbaines chargées de la propreté de la ville. Le compost de déchets urbains s'est avéré plus riche en minéraux que le fumier ordinaire. Enfin, on n'a pas trouvé de trace de microbes inquiétants dans les produits compostés : en éliminant les déchets des villes, on a donc amélioré l'état de santé des populations.

Roose, Vernumière et Khamsouk ont utilisé 10 à 70 t/ha de bagasse de canne à sucre d'une sucrerie à moins de 10 km d'un versant raide de la baie du Trésor du parc naturel de la Caravelle (Martinique) pour stabiliser et restaurer un versant totalement décapé jusqu'à la roche (lave volcanique acide). Dès que la bagasse a été répandue en paillage à la surface de ces fortes pentes (40 %), le ruissellement a été réduit de 50 % et l'érosion de 98 %. Après trois années, la majorité des bagasses étant décomposées et la végétation n'ayant réussi à couvrir que 20 % de la surface, l'érosion a repris progressivement. Seules les plantations d'arbustes dans les cuvettes enrichies en compost et complément minéral ont réussi à s'implanter et à survivre dans les fissures de la lave pourrie.

Manipulations biologiques

Blanchart et Jouquet ont étudié les effets des vers de terre et des termites qui jouent un rôle clé dans la dynamique des sols. En décomposant la litière et en l'incorporant au sol, ils construisent la structure du sol, modifient son agrégation,

creusent des galeries stables, (en particulier dans les croûtes superficielles) qui favorisent l'infiltration des pluies : ils contrôlent en partie les activités microbiennes et protègent les plantes des maladies. Ils participent au recyclage des nutriments, au stockage du carbone et de l'eau dans les sols : ils sont à la base des services écosystémiques. Pourtant, leurs effets sur la restauration de la productivité des sols dégradés sont encore mal connus des gestionnaires des sols : il est d'ailleurs probable qu'il faille préférer certaines espèces plutôt que d'autres dont les effets ne sont pas toujours positifs. Il devrait être possible d'attirer certaines espèces en appliquant des molécules chimiques ou en cultivant certaines plantes. L'épandage sur la surface du sol des ramilles (cf. le BRF) ou de la paille, attire les termites et vers de terre lesquels perforent la croûte superficielle du sol et réduisent le ruissellement.

Franche et Duponnois ont constaté que l'une des composantes de la dégradation des sols par l'érosion est une diminution de la diversité des micro-organismes symbiotiques (*Rhizobia*, *Frankia* et mycorhizes) qui sont des composantes clés dans le fonctionnement des principaux cycles biogéochimiques du sol : C, N, P. De nombreux travaux ont montré l'importance de la gestion de ces micro-organismes dans les pratiques culturales visant l'amélioration de la productivité des agrosystèmes. Il s'agit soit de valoriser la biodiversité végétale locale, soit d'infecter les racines des plants avec des mycorhizes contrôlés, soit d'introduire des arbres à croissance rapide dont le système racinaire s'associe avec des champignons ectomycorhyziens, des champignons mycorhyziens à arbuscules ou avec des micro-organismes fixateurs d'azote du genre *Frankia* (sur *Casuarina*). Il est recommandé de valoriser les ressources naturelles mycorhiziennes résilientes dans un environnement donné plutôt que d'y introduire d'autres variétés qui risquent de faire disparaître les variétés adaptées localement.

Valet a montré expérimentalement et par enquête comment des cultures associées peuvent assurer une production soutenue supérieure de 10 à 200 % aux monocultures intensifiées, tout en réduisant l'utilisation des engrais minéraux dans les montagnes du sud-ouest du Cameroun. L'agriculture agroforestière prend la forêt comme modèle : les arbres recyclent les nutriments prélevés en profondeur et protègent la surface du sol de l'agressivité des pluies. Elle renforce les systèmes de cultures associées traditionnelles qui combinent 3 à 47 espèces cultivées qui exploitent les ressources en eau, nutriments et lumière à diverses altitudes dans et sur le sol et produisent plus de biomasse, laquelle protège mieux la surface du sol contre les pluies et la canopée contre les attaques des insectes, des maladies et des adventices.

Khamsouk et Roose ont montré en parcelles d'érosion (200 m²) sur des sols volcaniques que la gestion en courbe de niveau des résidus de plantes industrielles telles que bananiers, cannes à sucre et ananas en Martinique suffit pour ralentir le ruissellement et réduire à des niveaux négligeables l'érosion en nappe et les pertes afférentes en nutriments et polluants sur des versants de 10 à 40 % de pente. Les haies d'arbustes légumineuses installées en coupe-vent produisent un paillage riche en nutriments qui complète l'aménagement.

Hinsinger *et al.* ont analysé les enjeux liés au cycle du phosphore, leur biodisponibilité pour les cultures dans les sols tropicaux à fort pouvoir fixateur du P., suite à la présence d'oxydes d'alumine, de fer ou de calcaire libres. Les ressources en phosphates naturels (apatites et phosphates de chaux) utilisées pour fabriquer des engrais étant finies (70 % des réserves au Maroc et Mauritanie) et leur consommation excessive dans les zones à agriculture intensive, et trop faible dans la plupart des pays en développement, leur prix de revient risque d'augmenter encore. Il est fort dépendant du prix de l'énergie et du transport. Pour les petits paysans des pays du Sud disposant de peu de trésorerie, il est donc nécessaire de réduire les pertes en P par érosion ou exportation (consommation locale), de valoriser au mieux l'ensemble des ressources locales (roches broyées, déchets de cultures, déchets urbains et industriels, déjections animales, agroforesterie), de sélectionner des variétés végétales capables de valoriser divers pools de P.(enracinement fin et profond, inoculant microbien), et de mélanger les cultures puisant le P à diverses époques et lieux du sol (rotations, cultures associées, agroforesterie), par une gestion locale durable de l'eau, de la biomasse et des nutriments des sols.

Aucune des présentations de la biomasse disponible ne peut résoudre à elle seule les problèmes posés par la dégradation des sols et la nécessité d'augmenter la production pour répondre à la croissance démographique. Par contre, chacune est adaptée à certaines conditions écologiques ou socio-économiques particulières. Il paraît évident que l'apport de biomasse au sol, sous les diverses formes présentées dans ce chapitre, améliore la stabilité du milieu agroécologique, mais leur transport ou leur achat peut être trop coûteux, leur disponibilité insuffisante, leur richesse en nutriments trop faible, de telle sorte que les améliorations au sol et à la production végétale sont nettement inférieures au potentiel désiré. Leur efficacité pourrait être augmentée en densifiant le couvert arboré (haies et parcs), en intensifiant la culture fourragère de légumineuses et en apportant un complément minéral raisonné en fonction du milieu et des objectifs économiques. Les meilleures productions sont obtenues par la combinaison raisonnée de fumure organique (fumier bien décomposé) et minérale (surtout phosphore assimilable, azote et bases échangeables), localisées sur la ligne de plantation et fractionnées en fonction des besoins des plantes cultivées et des risques de lixiviation.

Encore faut-il combiner les apports de fumure avec les techniques de préparation du sol : c'est ce que nous aborderons dans la troisième partie.

Partie 3

Restauration des sols par les techniques culturales dans les agrosystèmes tropicaux



Influences des techniques culturelles

Introduction

Dans la deuxième partie, une vingtaine d'auteurs ont passé en revue les avantages et inconvénients des divers modes de gestion de la biomasse disponible pour entretenir ou restaurer le niveau de MO des sols au-dessus des seuils nécessaires pour assurer les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Si personne ne discute de l'intérêt de restituer au sol des MO sous forme de fumier, compost, paillis, litière, jachère, légumineuses ou même de cendres, il reste à montrer l'intérêt du labour, du paillage ou du semis direct sous litière pour assurer la durabilité des systèmes intensifs agro écologiques.

Dans cette troisième partie sont comparés les modes de travail du sol et de gestion des MO qui y sont rattachés : les enfouir (labours et sarclages) ou les maintenir en surface sans dénuder le sol. Lors de la Révolution verte il y a trente ans, on a conseillé d'utiliser au maximum les intrants (travail du sol, fertilisants minéraux, graines sélectionnées, pesticides) en vue d'augmenter rapidement la production vivrière. Après des résultats globalement spectaculaires, on s'est aperçu que les paysans pauvres ne pouvaient résister à une année de sécheresse ou une invasion de prédateurs ou de maladies : ils perdaient leur lopin de terre et allaient rejoindre les faubourgs des villes surpeuplées à la recherche d'un travail leur permettant de survivre. Dans l'approche agroécologique par contre, il est prévu de réduire le travail du sol, de gérer à la surface du sol les résidus de culture et de développer des rotations ou des cultures associées de légumineuses pour abaisser les frais de production (mécanisation, pétrole, fertilisation minérale, sélection locale des semences, stockage des eaux de pluie dans le sol par réduction du ruissellement) et diminuer la dépendance des producteurs vis-à-vis des intrants importés : c'est la révolution doublement verte.

En général, le labour permet de gérer les adventices, d'enfouir le fumier et les résidus de culture, d'améliorer temporairement la porosité de l'horizon superficiel et la profondeur d'enracinement (CHARREAU et POULAIN, 1970). Malheureusement, en aérant le sol on accélère la minéralisation des MO du sol et on expose une surface nue à l'agressivité des pluies et du ruissellement, on accélère la dégradation de la structure de la surface, on favorise le développement d'une croûte superficielle et la dégradation des sols cultivés (LAL, 1986 ; ROOSE, 1994).

C'est pourquoi depuis les années 1960, on a tenté de réduire les travaux culturaux : chisel, diverses dents aérant le sol en profondeur, tout en maintenant en surface une partie des résidus de culture, semis direct sous litière vivante ou morte (SCV). De ces expériences menées à l'échelle de grands champs en Amérique du Nord et du Sud (Brésil, Argentine, etc.) s'est développée « l'Agriculture de conservation » qui ne recouvre que l'amélioration des techniques agricoles permettant le semis direct sous litière, sans labour, tandis que la GCES (gestion durable de l'eau et de la fertilité des sols) ou en anglais *Better Land Husbandry* (SHAXSON *et al.*, 1978 ; ROOSE, 1987) restructure tout le paysage agricole.

Cependant en Afrique, il a fallu attendre les résultats de Lal au Nigeria (1970) pour remettre en cause le bilan des avantages et inconvénients du labour et réaliser des études sérieuses des effets du semis direct à long terme.

Mrabet montre sur les Vertisols du Maroc que malgré la concurrence entre l'élevage et le semis direct sous litière de résidus de céréales, il est techniquement possible de développer le semis direct sous litière, même en région céréalière à sols argileux et climat semi-aride.

Boli, Diallo et Roose ont démontré que le SCV est possible en région soudanienne sur des sols ferrugineux sableux et des sols bruns tropicaux argileux du Mali et du Cameroun, qu'il réduit considérablement le ruissellement et l'érosion, mais en année humide provoque du lessivage de l'azote et qu'en définitive, le maïs donne - 10 à - 40 % de grains de moins et le coton de - 10 à + 10 % de coton graine que sous labour.

Noroso et une équipe du Cirad ont comparé sur les hautes terres de Madagascar, ferralsol argileux acides, trois cultures soumises au labour ou au semis direct sous litière morte (résidus de culture) ou vivante (*Brachiaria ruziziensis*). Le SCV protège mieux le sol contre le ruissellement et l'érosion ; il améliore le taux de MO de l'horizon superficiel du sol, mais son influence sur les rendements varient en fonction des cultures. Les cultures de haricots sous SCV améliorent nettement la production de grains. La production de riz est inférieure sous SCV que sous labour, mais augmente avec le temps. Par contre la production de maïs grain est inférieure sous SCV que sous labour et l'écart se maintient au cours de 4 années d'expérimentation.

Enfin une autre approche a montré en Afrique de bons résultats : l'introduction d'une jachère courte de légumineuses sous une culture intensive (Barthes *et al.* au Bénin), une fertilisation raisonnée et l'enrichissement du parcours ou des champs avec des légumineuses fourragères en Algérie (équipe INRF et IRD).

Le semis direct sous couverture végétale, une voie de restauration durable de la productivité des sols semi-arides du Maroc

Rachid MRABET

Introduction

Au Maroc, les défis de la sécurité alimentaire et de la pauvreté sont exacerbés par un accroissement permanent de la population. Les pratiques traditionnelles agricoles affectent les ressources naturelles, l'environnement et la durabilité des agroécosystèmes. Les terres agricoles marocaines présentent des formes de dégradation structurale qui ont miné la productivité des sols et menacent à long terme l'industrie agricole (GHANAME, 2003). Les travaux de recherche, initiés en 1982, confirment la nécessité de faire évoluer les pratiques actuelles des systèmes d'exploitation agricole pour permettre aux agricultures marocaines de gagner en efficacité sociale, économique et écologique (MRABET, 2008). Les systèmes de semis direct avec couverture végétale (SD/CV) sont basés sur quatre principes fondamentaux : 1) supprimer les labours ; 2) couvrir en permanence le sol par une couverture morte constituée de résidus de récolte (paillis) ou vivante sous forme de couvertures végétales ; 3) semer directement à travers cette couverture protectrice (mulch) à l'aide d'outils appropriés et 4) contrôler les mauvaises herbes sans retourner le sol. Le paillis est stratégiquement situé à l'interface du sol-atmosphère dans SD/CV et agit d'une part, comme protecteur, et d'autre part, comme amendement des sols.



Semis direct de soja dans les résidus de culture du blé, Maroc.

© IRD/É. Roose

Effets du semis direct sur couverture végétale : résultats et discussion

Atténuation des processus d'érosion

Les sols marocains sont vulnérables à l'érosion du fait des forts contrastes climatiques, des faibles couvertures végétales au moment des premières pluies, du faible taux de matières organiques dans les horizons labourés et de leur stabilité structurale réduite.

La suppression des labours et le maintien du couvert végétal permettent de dissiper l'impact des pluies, de ralentir les processus de ruissellement et de diminuer les pertes en sédiments. Par conséquent, le système SD/CV favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. Selon NOUIRA *et al.* (2007), l'emploi du ^{7}Be pour le court terme a révélé que le semis direct conduit à des taux d'érosion plus faibles que le labour conventionnel d'un vertisol dans le Maroc central. Ces résultats ont été confirmés par MOUSSADEK *et al.* (2011a) en utilisant la simulation de pluies (fig. 1). Le SD/CV agit sur l'agrégation du sol à travers son action sur les agents d'agrégation : la matière organique, les micro-organismes, l'aération, la circulation de l'eau et les réactions physico-chimiques. À ce système est souvent associé un état physique du sol qui ne pénalise pas les cultures et qui est efficace à réduire le développement des croûtes de battance et du compactage (fig. 2).

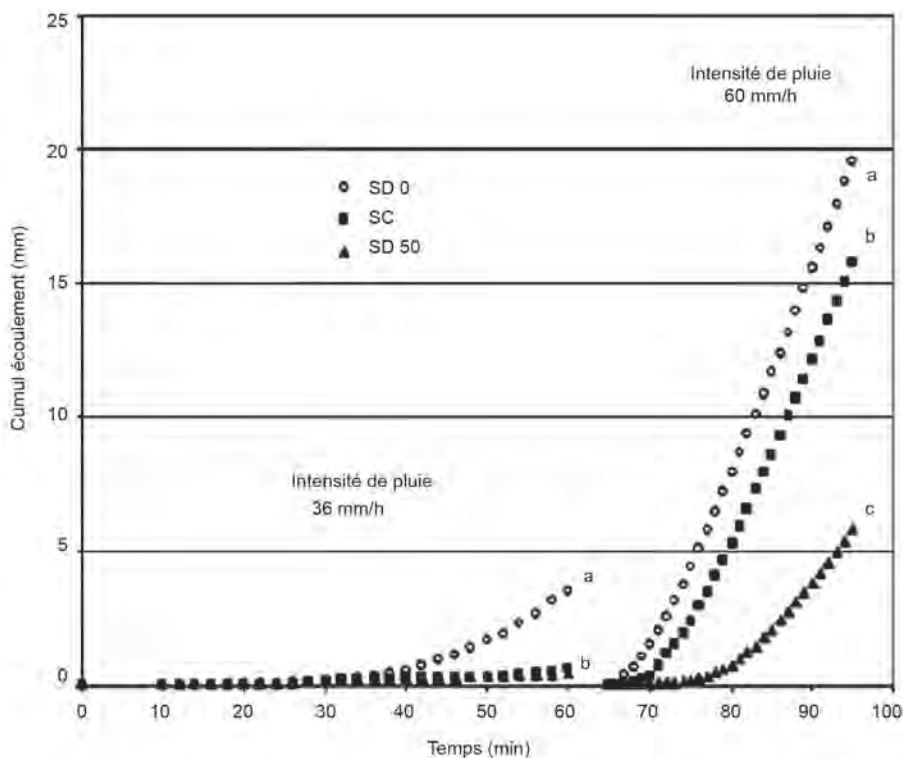


Figure 1

Effet de deux intensités de pluie sur le ruissellement cumulé sous semis avec travail conventionnel (SC), semis direct sans résidus de culture (SD0) et sous semis direct avec 50 % des résidus retournés à la surface du sol (SD50). Pour chaque intensité de pluie, les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Tukey ($P < 0,05$).

Source : MOUSSADEK et al., 2011a.

La même étude de MOUSSADEK *et al.* (2011a) a montré que le semis direct avec résidus se distingue nettement du labour conventionnel (SC) et du semis direct sans couverture végétale (SD0) avec une lame infiltrée significativement plus élevée (23,7 mm, contre 13,2 mm et 9,7 mm respectivement pour SC et SD0). Par ailleurs, la concentration des sédiments s'est avérée aussi significativement plus élevée sous SC et SD0 (2,8 g/l et 2,4 g/l, respectivement) par rapport au SD50 (1,45 g/l). Les taux d'érosion mesurés ont été minimums sous SD50 (8,8 g/m²) et nettement plus élevés sous SD et SC (49,9 g/m² et 47,9 g/m², respectivement). Ceci indique que la présence des résidus en surface du sol est indispensable pour réduire les pertes en terres sur les Vertisols en SD/CV.

La résistance à la pénétration du Vertisol soumis au semis direct est plus forte dans l'horizon 5 à 15 cm que sous le système associé au labour : on pourrait donc s'attendre à une moindre infiltration des eaux de pluie, mais celles-ci ont la possibilité de pénétrer à l'intérieur du profil par les fissures laissées par le dessèchement des argiles gonflantes, du moins au début de la saison humide.

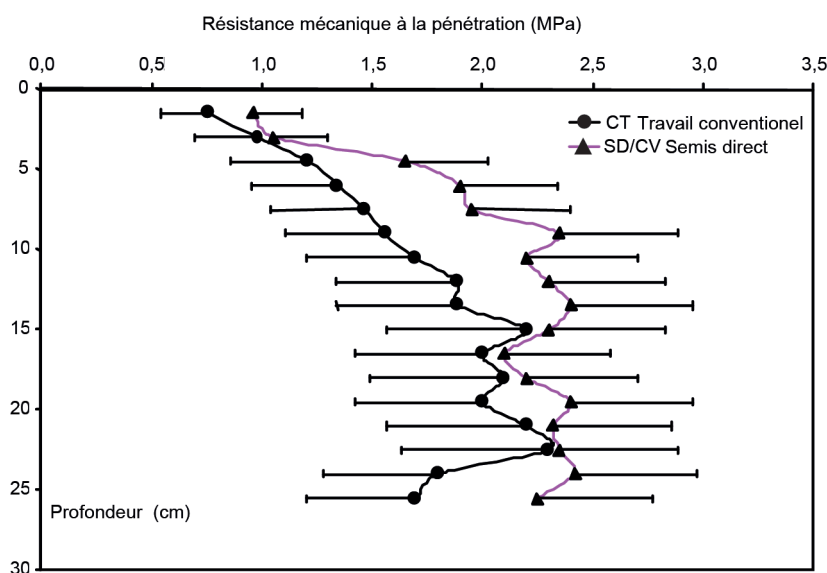


Figure 2
 Profils d'impédance d'un Vertisol soumis aux systèmes de semis direct (SD/CV)
 et de travail du sol conventionnel (CT).
 Source : MRABET, 2008.

Ces mêmes auteurs ont montré l'effet positif du SD/CV sur la qualité du sol en augmentant son taux de matière organique et en stabilisant sa structure (fig. 3). Ces résultats ont été confirmés précédemment par MRABET *et al.* (2001a) et par LAHLOU et MRABET (2001) sur un sol calcimagnésique dans la Chaouia. À long terme, le semis direct assure une stabilité structurale des sols à tout agent dégradant et la matière organique reste le facteur déterminant de cette agrégation et de la stabilité de l'agroécosystème (tabl. 1).

LAHLOU *et al.* (2005) ont montré que l'effet combiné du SD/CV et de la rotation céréalière a largement modifié la distribution de la taille des pores. En effet, l'augmentation de la teneur en matière organique améliore la porosité structurale du sol. KAY et VANDENBYGAART (2002) ont rapporté que les différentes formes de matière organique stabilisent les pores et augmentent leurs résistances aux différentes formes de stress.

Tableau 1
 Effets du système de travail du sol sur l'agrégation du sol.

Sols	Années	SD/CV	Travail du sol	Références
Calcimagnésique	4	65 ^a	48	LAHLOU et MRABET (2001)
Vertisol	4	3,40 ^b	2,90	KACEMI <i>et al.</i> (1992)
Calcimagnésique	11	3,78 ^b	3,21	MRABET <i>et al.</i> (2001a)

a = Hydrostabilité des agrégats (% agrégats de 1-2 mm).
 b = Diamètre moyen pondéré des agrégats (mm).

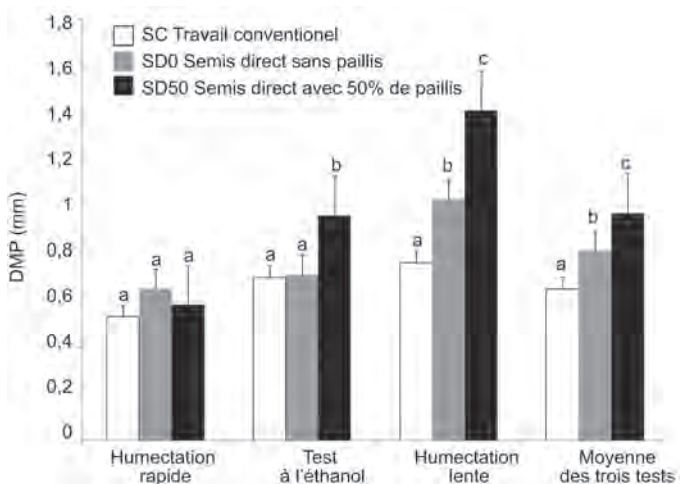


Figure 3

Effet des modes du travail du sol (travail conventionnel [SC], semis direct sans résidu de culture [SD0] et semis direct avec 50 % des résidus retournés à la surface du sol [SD50]) sur le diamètre moyen pondéral (DMP). Pour les trois types de mesure du DMP (humectation rapide, test à l'éthanol, humectation lente) et pour la moyenne de ces trois tests, les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Tukey ($P < 0,05$).

Source : MOUSSADEK et al., 2011a.

Entretien et amélioration de la fertilité des sols

En plus de l'effet protecteur du SD/CV, les recherches entreprises aussi bien en station expérimentale que chez des agriculteurs ont permis de conclure que ces systèmes améliorent les taux et la qualité des matières organiques des sols, particulièrement en surface ou zone de semis. En effet, les recherches ont montré que les propriétés physiques (i.e. agrégation, porosité), hydriques, hydrodynamiques et chimiques (i.e. teneurs en éléments nutritifs, pH, CEC) s'améliorent progressivement au cours du temps et en fonction des apports de résidus de récolte (IBNO-NAMR et MRABET, 2004 ; MRABET et IBNO-NAMR, 2008). Le semis direct affecte la dynamique de la matière organique à travers une modification de la localisation des matières organiques. Généralement, le semis direct cause une stratification de la matière organique en surface du sol, associée à un appauvrissement ou non en ces matières en profondeur (MRABET, 2002). Le maintien du tapis protecteur à la surface du sol a permis l'approvisionnement de ce dernier en éléments nutritifs par séquestration de la matière organique (tabl. 2 et 3).

Amortissement des effets de sécheresse

Le paillis sous SD/CV modifie le bilan radiatif au niveau du sol et les échanges turbulents entre le sol et l'atmosphère. Ces actions se traduisent par la réduction de l'évaporation du sol et des amplitudes thermiques en son sein en présence d'un paillis.

Tableau 2
Effets des systèmes de travail du sol sur les niveaux de matières organiques
du sol dans différentes régions agricoles du Maroc.

Région	Type de sols	Horizon (mm)	Années	SD/CV	Labour conventionnel
Zaers	Vertisol	0-70	4	2,05	1,47
Chaouia	Calcimagnésique	0-25	5	1,73	1,66
	Calcimagnésique	0-25	11	2,89	2,35

Source : MRABET, 2011b.

Tableau 3
Effets du système de travail du sol sur le niveau d'azote,
de phosphore et de potassium dans les horizons de surface
d'un sol calcimagnésique (11 ans d'expérimentation).

Horizons (mm)	SD/CV	Labour conventionnel
Azote Total (g kg ⁻¹)		
0-25	1,84	1,33
25-70	1,49	1,34
70-200	1,20	1,20
P Olsen (mg kg ⁻¹)		
0-25	29,9	18,0
25-0	19,3	16,5
70-200	8,7	10,9
K échangeable (mg kg ⁻¹)		
0-25	476	284
25-70	292	257
70-200	149	178

Source : MRABET, 2011b.

MRABET (1997) a rapporté que la couverture du sol par les résidus de récolte baisse la température du sol, diminue l'évaporation et augmente la teneur en eau dans les horizons de surface, permettant des semailles précoces qui valorisent mieux les chutes de pluie. Pour des profondeurs de 10 à 15 cm, une diminution de température de 1 à 5 °C a été observée durant le cycle du blé sous semis direct par rapport au travail du sol conventionnel. Toutes ces améliorations hydrothermiques (augmentation de l'infiltration, diminution de l'évaporation) entraînent une amélioration du stockage de l'eau dans le sol. Cette situation améliore la résilience des cultures aux effets des stress hydriques et thermiques associés à la sécheresse.

En régime humide, le semis direct (SD/CV) a permis de maintenir l'humidité du sol au-dessus du point de flétrissement 8 jours de plus par rapport au travail du sol au chisel (avec 40 % de couverture par les résidus) et 23 jours par rapport à la charrue à disques. Par contre en régime sec, cette période était de 14 jours par rapport au chisel et de 25 jours par rapport à la charrue à disques : pour les autres types de travail du sol, les périodes étaient intermédiaires.

Mitigation des émissions de carbone

L'agriculture est directement impliquée dans la production et la régulation de la concentration atmosphérique des trois principaux gaz à effet de serre uniformément mélangés à la troposphère (GIEC, 2007). La respiration (minéralisation de la matière organique et libération de CO_2) excessive des sols agricoles par les labours et les préparations de lits de semences constitue une source très importante d'émission de carbone (REICOSKY *et al.*, 1997). Selon la figure 4, SD/CV réduit significativement les émissions du dioxyde de carbone vers l'atmosphère par rapport aux pratiques de travail du sol.

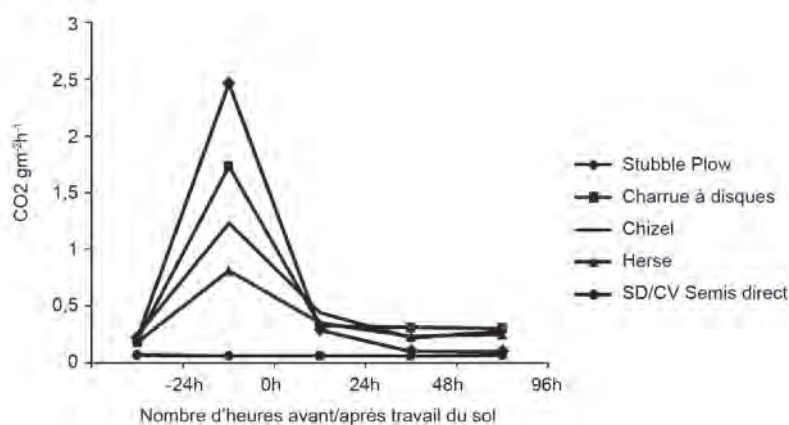


Figure 4
Effet du travail du sol et du SD/CV sur l'évolution de l'émission du CO_2 .
Source : MOUSSADEK *et al.*, 2011b.

Productivité des cultures

Dans le bassin Méditerranéen, et particulièrement au Maroc, les systèmes actuels, déjà peu productifs et non durables dans les situations climatiques que nous connaissons, le seront probablement encore moins au cours du XXI^e siècle (GIEC, 2007). La construction d'une fertilité durable sous SD/CV se traduit par l'obtention de productions supérieures à celles des situations antérieures, et surtout, avec une faible variabilité d'une année à l'autre (MRABET, 2011a).

De nombreux essais mis en place dans différentes conditions pédoclimatiques ont permis des améliorations substantielles sous SD/CV des productivités et des efficacités d'utilisation de l'eau de plusieurs cultures stratégiques pour le pays (orge, blé, maïs, tournesol, fève, lentille, pois chiche). Ainsi, selon le tableau 4, SD/CV permet en moyenne une augmentation du rendement du blé de 31 % avec une variation allant de 2,4 % à 146 %.

Tableau 4
Rendements du blé (Mg ha^{-1}) sous semis direct et travail conventionnel du sol dans plusieurs régions agricoles du Maroc (compilés par MRABET, 2011b).

Régions	Sols	Rotation	SD/CV ^a	TC ^b	Variation (%)	Années
Chaouia	Calcimagnésique	Blé-Continu	2,47	2,36	4,7	4
	Vertisol	Blé-Jachère	3,70	2,60	42,3	10
	Vertisol	Blé-Continu	1,90	1,40	35,7	10
	Calcimagnésique	Différentes rotations	2,21	1,90	16,3	9
	Vertisol	Blé-Pois chiche	1,87	0,76	146	3
	Rendzine	Blé-Pois chiche	2,53	1,47	72,1	9
Sais	Vertisol	Différentes rotations	2,55	2,49	2,4	4
	Fersiallitiques	Différentes rotations	2,72	2,74	0	4
Abda	Vertisol	Blé-Jachère	3,10	2,40	29,2	19
	Vertisol	Blé-Continu	1,60	1,60	0	19
Zaers	Vertisol	Blé-Lentille	1,97	1,41	39,7	4
	Isohumique	Blé-Lentille	2,99	2,72	9,9	4
	Fersiallitiques	Blé-Lentille	2,71	2,49	8,8	4
Gharb	Vertisol	Blé-Continu	2,80	2,26	23,9	3

SD/CV = semis direct sur couvert végétal.

TC = travail du sol conventionnel.

Conclusions

La couverture du sol par les résidus de culture sous SD/CV, l'accumulation de carbone lié dans les premiers centimètres du sol et l'augmentation de la cohésion du sol sont favorables à la lutte contre l'érosion hydrique.

En plus de la réduction des pertes de sol, d'eau et de nutriments par érosion, l'autre raison souvent associée à l'augmentation de l'adoption du SD/CV est son impact sur le stockage du carbone dans le sol. Sous SD/CV, la production de matière organique est continue et elle conduit à un sol biologiquement actif.

L'expérimentation sur les systèmes de cultures et de travail du sol a montré que le SD/CV améliore le rendement des cultures et la conservation de l'eau même en années sèches. Par conséquent, les labours et les préparations des lits de

semences ne sont plus des garanties pour obtenir des rendements durables en milieux semi-arides et subhumides marocains, comme le prétendaient les études agronomiques antérieures.

En plus de l'élimination de la perturbation du sol, une gestion appropriée des résidus de récolte en SD/CV augmente l'infiltration de l'eau et réduit les pertes d'eau par évaporation et par conséquent, améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs par la culture. Si les SD/CV présentent de nombreux avantages agronomiques et environnementaux, comme nous venons de le voir, les conditions de sa faisabilité en milieu agricole peuvent constituer un frein à son adoption. L'application du semis direct dans les zones semi-arides peut aussi se heurter à des résistances culturelles et historiques dues à une très ancienne pratique du labour et du pâturage des chaumes en été. En semis direct, la suppression du travail du sol nécessite une utilisation renforcée des herbicides. L'emploi des herbicides exige un coût initial plus élevé, et surtout, une bonne connaissance des produits et de leur utilisation. Cette maîtrise de la lutte chimique n'est pas acquise par tous les agriculteurs, et les parcelles en SD/CV peuvent être envahies par les adventices. Les activités d'élevage au Maroc constituent une autre contrainte souvent mentionnée à l'adoption de ce système. Ainsi, les systèmes de SD/CV peuvent être difficiles à utiliser lorsqu'il y a une très grande pression du bétail sur les résidus de récolte. Cela a une importance particulière dans les secteurs semi-arides où la subsistance repose sur la production de grains et sur le bétail consommateur de paille.

Bibliographie

- GHANAME M., 2003** – « La désertification au Maroc – Quelle stratégie de lutte ? » 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003. http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS4/TS4_5_ghanam.pdf
- GIEC, 2007** – « Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ». In Pachauri R. K., Reisinger A. (éd.), GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- IBNO-NAMR K., MRABET R., 2004** – Influence of agricultural management on chemical quality of a clay soil of semi-arid Morocco. *J. Afr. Earth Sci.*, 39 : 485-489.
- KACEMI M., HILALI H., MONROE G., 1992** – « Effect of different tillage methods on bulk density, penetrability and aggregate size distribution on a clay soil ». In Bourarach *et al.* (eds) : *Proceedings of the international seminar on tillage in arid and semiarid areas*, Rabat, Morocco, CIGR-Anafid : 152-162.
- KAY B. D., VANDENBYGAART A. J., 2002** – Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.*, 66 : 107-118.
- LAHLOU S., MRABET R., 2001** – « Tillage influence on aggregate stability of a Calcixeroll soil in semi-arid Morocco ». In Garcia-Torres *et al.* (eds) : *Conservation Agriculture: A Worldwide Challenge*, 2 : 249-254.
- LAHLOU S., OUADIA M., MALAM ISSA O., LE BISSONNAIS Y., MRABET R., 2005** – Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride marocaine. *Étude et Gestion des Sols*, 12 : 69-76.

- MOUSSADEK R., MRABET R., ZANTE P., LAMACHERE J.-M., PEPIN Y., LE BISSONNAIS Y., YE A., VERDOODT L., VAN RANST E., 2011a** – Influence du semis direct et des résidus de culture sur l'érosion hydrique d'un vertisol méditerranéen. *Can. J. Soil Sci.*, 91 : 627-635.
- MOUSSADEK R., MRABET R., DAHAN R., DOUAÏK A., VERDOODT A., VAN RANST E., CORBEELS M., 2011b** – Effect of tillage practices on the soil carbon dioxide flux during fall and spring seasons in a Mediterranean Vertisol. *J. Soil Sci. Environ Management*, 2 : 362-369.
- MRABET R., 1997** – *Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semi-arid area of Morocco*. Ph.D. Diss. Colorado State Univ. Fort Collins, CO, USA, 220 p.
- MRABET R., 2002** – Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil Till. Res.*, 66 : 119-128.
- MRABET R., 2008** – *No-Tillage systems for sustainable dryland agriculture in Morocco*. Inra Publication, Fanigraph Edition, 153 p.
- MRABET R., 2011a** – Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil. *American J. of Plant Sciences*, 2 : 202-216.
- MRABET R., 2011b** – « No-tillage agriculture in West Asia & North Africa ». In Tow et al. (eds) : *Rainfed farming systems*, Springer : 1015-1042.
- MRABET R., SABER N., EL-BRAHILI A., LAHLOU S., BESSAM F., 2001a** – Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil Till. Res.*, 57 : 225-235.
- MRABET R., IBNO NAMR K., BESSAM F., SABER N., 2001b** – Soil chemical quality changes organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Land Degrad. Develop.*, 12 : 505-517.
- MRABET R., IBNO-NAMR K., 2008** – Influence du système de travail du sol et de la rotation sur le statut organique d'un sol argileux dans le Maroc semi-aride. *Al Awamia*, 123-124 : 59-82.
- NOUIRA A., DUCHEMIN M., BENMANSOUR M., GALLICHAND J., BOUKSIRATE H., 2007** – « Efficacité du semis direct à contrer l'érosion hydrique en milieu agricole : mise en évidence à l'aide des techniques de radioéléments, de modélisation et de mesures aux champs (Maroc et Canada) ». Actes des JSIR de l'AUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007 : 1-6.
- REICOSKY D. C., DUGAS W. A., TORBERT H. A., 1997** – Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil Till. Res.*, 41 : 105-118.

Potentiel du semis direct et des matières organiques pour restaurer durablement la productivité des sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun et du Sud-Mali

Zachée BOLI

Drissa DIALLO

Éric ROOSE

Introduction

Dans de nombreux pays du monde, les fermiers et les chercheurs ont testé divers systèmes de labour pour améliorer la structure de la surface du sol et l'infiltration, améliorer l'enracinement et la résistance des cultures aux périodes de sécheresse, pour contrôler les adventices et assurer la croissance homogène des cultures (CHARREAU et NICOU, 1971).

Dans les savanes humides du Nord-Cameroun et du Sud-Mali, coton et maïs sont cultivés avec un système intensif comprenant un labour conventionnel, des sarclages mécanisés et un buttage, l'application raisonnée d'insecticides et d'engrais minéraux et enfin l'usage de variétés sélectionnées. Cependant, cet usage abondant d'intrants n'empêche pas les rendements de décliner dès la quatrième année. Les terrains qui ne sont plus rentables sont abandonnés et de nouveaux champs sont défrichés dans la savane arbustive. Maintenant qu'on a bâti des infrastructures villageoises en béton, il n'est plus envisageable de

déménager le village pour se rapprocher des champs cultivés : on recherche donc des systèmes de production durables.

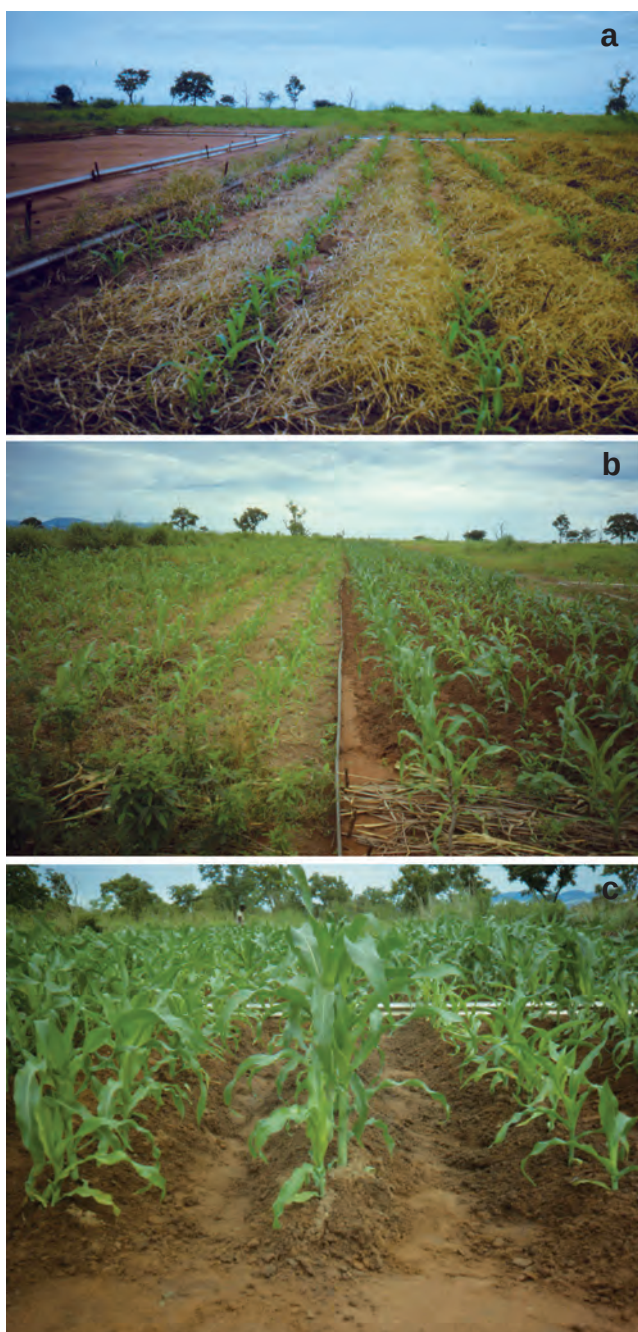
Lors d'une première enquête, BOLI *et al.* (1991) ont observé que la dégradation des rendements était liée à la minéralisation des matières organiques des sols (MOS) et à l'érosion. Pour mieux comprendre le dysfonctionnement de ces systèmes intensifs de culture sous labour et sous semis direct, deux ensembles de parcelles d'érosion furent installés : 57 parcelles d'érosion (100 à 1 000 m²) au Nord-Cameroun (1991-1994) et 17 parcelles au Sud-Mali (1997-1999) sur des champs anciens ou nouvellement défrichés. Sur ces sols ferrugineux sableux (Alfisols) fragiles, l'évolution des sols est très rapide en liaison avec le faible taux de MOS et le climat humide et chaud. Sur les sols bruns vertiques du Mali, l'évolution est plus lente.

Dans ce chapitre, nous tirerons les leçons de ces expérimentations permettant de mieux comprendre l'importance d'apporter des engrais et du fumier et de couvrir le sol avec une litière de résidus de culture, d'adventices gérées aux herbicides ou de légumineuses en profitant des longues saisons pluvieuses (plus de 6 mois).

Matériel et méthodes

L'étude comparative des systèmes intensifs de culture (semis direct ou labour, NPK et/ou divers apports organiques) a été réalisée dans la zone cotonnière africaine, près de Tchollire (village de Mbissiri : 8° 23" N, 14° 33" E) au nord-est du Cameroun et dans le bassin de Djitiko (12° 03" N et 8° 22" W) au sud du Mali, sur un affluent du fleuve Niger. Ces sites sont situés dans la zone des savanes soudaniennes humides à deux saisons contrastées : une saison pluvieuse d'avril à octobre suivie de 5 à 6 mois très secs et chauds. Les précipitations annuelles varient de 900 à 1 500 mm, autour de 1 311 mm à Mbissiri et 1 175 mm à Djitiko durant les années d'observation. L'indice annuel d'érosivité de WISCHMEIER et SMITH (1978) varie de 400 à 780 en unités USA (tonnes-foot per acre x pouces/hour).

Les sols ferrugineux tropicaux sableux (Alfisols) sont les mieux représentés dans ces régions où les cultures dépendent directement des pluies (BRABANT et GAVAUD, 1985). À Mbissiri, les sols sont issus de grès fins : aussi les 15 premiers centimètres qui forment l'horizon labouré est pauvre en MOS (0,2 à < 1,2 %), très pauvre (< 10 %) en argile (kaolinite) avec une faible capacité d'échange de cations (CEC = 1 à 3 meq/100 g). Sur le bassin de Djitiko, le substrat géologique date du Précambrien (granite et micaschiste) : il est recouvert par une nappe d'altérite de 15 à 35 m d'épaisseur. Les Alfisols rouges sont plus riches en argiles (26 %) et limons (56 %), avec une CEC de 27 meq/100 g, le pH est moins acide (~ 6) ; ces sols sont aussi pauvres en MOS (0,4 à 1,9 % de C), en azote (C/N > 14) et en phosphore assimilable. Ces deux Alfisols sont fragiles structurellement et sensibles à l'érosion.



Comparaison du système « semis direct sous couvert herbicide » au labour+ buttage dans la station IRAT de Mbissiri, Nord-Cameroun.

a : comparaison sol nu et maïs semé dans les herbes de la jachère herbicidee.

© IRD/É. Roose

b : comparaison maïs travail conventionnel du sol, à maïs semé directement dans la jachère herbicidee.

© IRD/É. Roose

c : buttage du maïs pour sarcler et enfouir l'urée.

© IRD/É. Roos

La végétation naturelle est une savane arbustive avec divers arbres (*Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Isoberlinia doka*, *Combretum* sp.) et une couverture herbacée dense (*Andropogon* sp., *Pennisetum purpureum*, etc.). La surface couverte par la litière et les végétaux augmente de 34 à 74 % dans le cas d'une savane brûlée chaque année et pâturée, 8 à 64 % pour une culture sarclée sur labour et 11 à 91 % pour le système du semis direct, depuis le début de la saison des pluies jusqu'à la fin de la période de culture. Comme les premiers orages tombent sur un sol quasi nu, la surface se couvre de croûtes de battance. La pente sur ces glacis varie autour de $2\% \pm 0,5$.

Le ruissellement, l'érosion, les rendements et la matière organique des sols sont comparés pour deux situations : (1) sur des champs récemment défrichés à Mbissiri et (2) sur des champs dégradés, cultivés ou pâturés depuis plus de 5 à 20 ans à Djitiko et Mbissiri. La parcelle expérimentale est une parcelle d'érosion de 100 m² (5 x 20 m) avec deux cuves de stockage (1 m³) reliées par un partiteur permettant de mesurer le volume du ruissellement, les particules fines en suspension et les sédiments grossiers érodés après chaque averse. Les détails du dispositif sont décrits dans BOLI *et al.* (1993). Les traitements comparés sont :

- une vieille savane arbustive brûlée et pâturée chaque année dès la fin de la saison des pluies ;
- un système de culture intensif avec le sol labouré au tracteur ou aux bœufs sur 12 à 15 cm, semis, sarclage deux fois mécaniquement et buttage six semaines après le semis avec des engrais minéraux adaptés aux cultures de coton et de maïs (N115, P20, K15, S6 + BO 1 kg/ha/an + 5 kg/ha de sulfate de zinc pour le maïs) ;
- un système de semis direct comprenant : herbicides, semis une semaine plus tard avec la « houe à double tête » (creusant un trou pour placer les engrais et un autre pour deux graines) sur le sol couvert de résidus de la précédente culture et des adventices (> 30 %) ou après deux années de légumineuse (*Calopogonium mucunoides*).

Résultats

Les pluies

Les pluies annuelles ont varié de 900 à 1 500 mm, avec quelques périodes déficitaires en début de saison et quelques périodes excessives durant la période végétative, avec des orages intenses ($I > 60$ mm/h durant 30 min) au début de la saison et des longues pluies de plus de 150-200 mm en 3 jours en juillet-août quand le sol n'est pas encore bien couvert ($CV < 50\%$) : les risques de

ruissellement ou de drainage excessif sont importants presque chaque année dans cette zone soudanienne humide. L'indice annuel d'érosivité des pluies de WISCHMEIER et SMITH (1978) varie de Rusa = 400 à 750 en relation avec la hauteur des pluies.

Le ruissellement

Le maintien d'une litière à la surface du sol durant toute la période de culture réduit considérablement les risques de ruissellement. Le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram) varie à Mbissiri de 23 % (si labour) à 4,4 % (non-labour) et au Mali de 45 % (labour) à 25 % (non-labour) sur ces Alfisols sableux (DIALLO *et al.*, 2006). Le système du semis direct sous litière améliore nettement l'infiltration des pluies, même les plus intenses. Le stockage de l'eau dans le sol et même le drainage dans la nappe peuvent augmenter durant la saison des pluies (tabl. 1).

Tableau 1

Influence du non-labour sur le ruissellement moyen (Kram %), l'érosion moyenne (E t/ha/an), la teneur en argile et limons (A + L%), la teneur en MOS dans les premiers 10 cm d'un Alfisol sableux du Sud-Mali et du Nord-Cameroun.

Site	A + L%	MOS %	Kram % lab./0-labour	Érosion (t/ha/year) lab./0-labour
Djitiko, vieux champs	26	0,69/0,87	45,2/24,8	18,4/7,4
Mbissiri, sur vieux champs	8	0,20/0,30	23,5/4,4	11,4/4,2
Mbissiri, sur champs nouveaux	10	0,25/0,35	23,1/4,4	9,2/3

À Mbissiri, durant le cœur de la saison des pluies, la réduction du ruissellement a entraîné un fort drainage, lequel a augmenté le lessivage de l'azote et réduit la vigueur des jeunes plantules : on a été obligé d'ajouter 20 kg/ha d'azote sur les plants de maïs jaune pâle après une grosse période pluvieuse. Sur un sol brun vertique argilo-limoneux du bassin de Djitiko, plus résistant à l'énergie des pluies que les Alfisols, la différence de ruissellement (27 et 26 %) due au labour fut négligeable (DIALLO *et al.*, 2004a). Dans la zone plus sèche de Djitiko, on n'a pas observé d'effet négatif d'une infiltration excessive sur le rendement des cultures.

Les pertes en terre et en carbone par érosion

Sur chaque site (tabl. 1), les pertes en terre par érosion furent 2,5 à 3 fois plus importantes sous labour conventionnel que dans le système sans labour : les différences sont semblables pour le carbone érodé (60 à 390 kg C/ha/an) (DIALLO *et al.*, 2004a). Ces différences d'érosion sont liées à la surface du sol couverte par les litières durant la période de croissance végétale (CV = 64 % pour le labour et 91 % sous semis direct) (DIALLO *et al.*, 2004b). L'augmentation du

ruissellement et de l'érosion sous labour est une conséquence de la dégradation de la structure de l'horizon de surface soumis à de nombreuses techniques culturales et aux attaques des gouttes de pluie et de l'énergie du ruissellement sur les surfaces nues.

Le rendement en maïs et coton

Le rendement des cultures testées (tabl. 2) fut généralement plus élevé sous labour que sous semis direct ou non-labour, en accord avec les résultats de AINA (1993). Néanmoins, à Mbissiri, le rendement dépend du type de culture et des périodes de pluies surabondantes durant les deux premiers mois (BOLI et ROOSE, 1998). Sur les sols sableux très fragiles de Mbissiri, le rendement en coton dans les années relativement sèches fut égal ou même supérieur (+ 10 à 20 %) sur les parcelles en semis direct ou en labour réduit à ceux observés sur parcelles labourées. L'amélioration de l'infiltration sur les sols non labourés protégés par une litière compense le déficit en eau dans les sols sableux. Dans les champs des paysans, il est visible que la différence de rendement en faveur du labour diminue avec les années et avec l'introduction d'une jachère de légumineuses. Il faut 2 à 3 ans pour qu'on puisse observer une amélioration des activités biologiques entre la litière d'adventices, les résidus de culture et l'horizon superficiel du sol (LAL, 1979).

Tableau 2
La production des cultures soumises au système du non-labour
sur un sol sableux dégradé de Mbissiri.

Traitements	Rendement en coton (t/ha)	Rendement en maïs-grain (t/ha)
Labour conventionnel	2,0	4,8
Non-labour (témoin)	1,4	2,8
Mini-labour à la dent	1,9	3,6
Non-labour après 2 ans de jachère	2,1	3,6

Source : BOLI et ROOSE, 1998.

Sur les parcelles d'érosion de Mbissiri, Roose *et al.* ont montré que la gestion des MO (enfouissement des résidus de culture, leur exportation, leur transformation en fumier) n'a guère changé ni le ruissellement ni l'érosion (90 t/ha/4 ans), sauf lorsque les résidus sont maintenus sous forme de litière à la surface du sol. Il ne s'agit pas seulement d'une protection physique contre l'énergie des gouttes de pluie (une toile moustiquaire suspendue à 10 cm du sol sableux a laissé se développer une dégradation de la structure du sol), mais aussi d'une alimentation continue en MO structurantes et en nutriments (N + P + cations et oligoéléments) de la litière en voie de minéralisation.

Au tableau 3, on observe que dans les trois blocs de sensibilité différente (pente, texture, état de dégradation), l'érosion dépend de l'agressivité des pluies, de la

sensibilité des blocs. Cependant l'enfouissement de 3 t/ha de fumier de chèvre (dosé N = 3 %) n'a pas modifié sensiblement le degré de sensibilité du sol à l'érosion. Par contre, les rendements sont toujours les meilleurs dans les parcelles fumées, ce qui traduit l'apport de nutriments. À l'intérieur de chaque bloc, le rendement est d'autant meilleur que les pertes en terre sont faibles. La gestion de la MO disponible est donc à la base d'une gestion durable de l'eau et des sols.

Tableau 3

Érosion (t/ha/an) et rendement (t/ha) de maïs-grain et de coton graines pour le traitement fumier (3 t/ha/an de poudrette de chèvre) sur les blocs A, B, D à Mbissiri en fonction de la hauteur des précipitations durant le cycle cultural.

Année	1992			1994			1993	
Culture maïs	maïs			coton				
Pluie (mm)	1 184			1 074			772	
Blocs	E	Rdt	I	E	Rdt	I	E	Rdt
	(t/ha/an)		I	(t/ha/an)		I	(t/ha/an)	
A	6,3	9,6 (5,1)	I	4,2	6,5 (4,3)	I	3,2	3,0 (2,3)
B	21,1	5,8 (4,9)	I	6,0	5,9 (3,8)	I	6,2	2,7 (1,7)
D	31,4	5,3 (4,2)	I	21,6	6,0 (5,4)	I	15,6	2,1 (1,8)

(X) = rendement du témoin sans fumier dans le même bloc. L'érosion par contre n'a pas varié malgré l'apport annuel de 3 t/ha de poudrette de chèvre mélangé par labour aux 15 premiers centimètres du sol.

Stabilité des agrégats et teneur en carbone organique dans l'horizon humifère (10 cm)

À Mbissiri, quatre ans après le défrichement de la savane arbustive initiale, le taux de MOS de l'horizon superficiel (10 cm) a diminué de 0,7 % sous la savane à 0,35 % sous non-labour, 0,25 % sous labour et 0,20 % sur la jachère nue labourée chaque année sur les nouveaux champs : le taux de MOS a très peu changé ($0,30 \pm 0,05$ %) sur les parcelles cultivées depuis longtemps. La litière dans les parcelles de semis direct s'est avérée insuffisante pour améliorer le taux de MOS, sauf après deux années de jachère de légumineuse ou sous les haies vives de *Cassia siamea*. La structure du sol a été différenciée par l'encroûtement de la surface. Après une averse de 35 mm après le semis, la surface encroûtée atteint 86 % sur labour et seulement 2 % sous semis direct dans la litière. Avant le buttage (après 215 mm de pluie), la surface encroûtée fut de 93 % sur les nouveaux champs labourés et seulement 18 % sur le semis direct sous litière. L'amélioration de la structure semble liée à l'activité des vers de terre qui fut 5 fois plus rapide sous la litière d'un champ en semis direct que sur le champ voisin labouré (BOLI *et al.*, 1993 ; BOLI et ROOSE, 1998) : les opérations liées au système labour (labour, deux sarclages et un buttage) furent plus délétères pour les vers de terre que la pulvérisation de 3 litres/ha d'un herbicide systémique (BOLI *et al.*, 1993).

À Djitiko par contre, après 3 années de semis direct dans la litière de résidus de culture avec les adventices, le taux de MOS a augmenté de 0,69 % après labour à 0,87 % sur non-labour et le taux de macroagrégats, stable après tamisage sous l'eau, a augmenté de 150 à 300 g/kg, si le travail du sol a été réduit (DIALLO *et al.*, 2004b).

Donc si la litière est suffisante sur semis direct ou après une jachère de légumineuse, le taux de MOS, la stabilité structurale et la surface ouverte à l'infiltration augmentent et le ruissellement diminue. Lorsque le sol est couvert par la litière, les résidus de culture et les adventices, l'énergie des pluies et du ruissellement est dissipée et l'érosion diminue (BARTHÈS *et al.*, 2000).

Discussion

Les litières de résidus de culture, d'adventices ou de légumineuses augmentent l'activité de la faune, la macroporosité ouverte à la surface du sol, la résistance des macroagrégats et l'interception de l'énergie des pluies et du ruissellement : même si la litière ne couvre pas totalement la surface du sol, elle réduit efficacement le ruissellement et l'érosion (LAL, 1974 ; ROOSE, 1996).

Puisque le risque de ruissellement est suffisamment réduit, il n'est plus indispensable d'organiser des structures en terre à l'aide de lourdes machines pour évacuer en sécurité les pluies excédentaires à la surface des collines : une haie vive chaque 25 à 50 m tout au long des courbes de niveau est suffisante pour réduire les pertes en terre. C'est pourquoi dans les champs autour de Mbissiri, il n'a pas été nécessaire de creuser des terrasses de drainage ni des chemins d'eau en vue de gérer les excès de ruissellement.

L'amélioration de la production est essentielle pour que les paysans l'adoptent. Elle semble possible à condition d'ouvrir l'horizon compact par le passage d'une dent sur la ligne de plantation pour le maïs (dont les racines sont très sensibles à la compaction du fond de labour) et en introduisant une courte jachère de légumineuses (comme *Calopogonium mucunoides*, *Stylosanthes*, etc.) semées sous le maïs 30 à 60 jours après le semis. L'apport d'engrais minéraux peut être réduit, si on répand du fumier bien mûr sur la ligne de plantation perpendiculaire à la pente.

L'adoption de ces nouveaux systèmes par les paysans a été rapide, parce qu'ils font gagner du temps en période de labours et de sarclages, périodes très chargées. Les systèmes de non-labour et mini-labour, limités aux lignes de plantation après traitements aux herbicides, demandent moins de travail et d'équipement et permettent l'extension de la période et de la surface semée. Les problèmes arrivent plus tard quand les fermiers ne peuvent assurer le dernier sarclage : ils choisissent parfois d'abandonner les champs envahis par les adventices.

En Afrique occidentale, le problème tient aux traditions de la vaine pâture qui permet de relâcher le bétail dans tout le terroir juste après les récoltes : finalement, il ne reste plus assez de résidus organiques pour couvrir le sol au début

de la saison des pluies. Une solution pourrait consister à semer des légumineuses non appétantes sous le maïs : s'il lui reste assez de temps pour produire ses graines, même si la légumineuse se dessèche durant la longue période sèche (5 à 6 mois), les semences vont germer après les premières pluies et fournir un beau tapis végétal où il sera possible de semer directement le coton. Une autre solution consiste à attendre en début de saison que les adventices atteignent 20 cm avant de les herbicider : généralement, ce tapis végétal est moins homogène qu'avec le semis de légumineuses.

On n'a pu observer ni de différence d'érosion ni de rendements entre les parcelles de 100 et 1 000 m², qui sont du même ordre de grandeur que les champs cultivés d'un quart d'hectare par les petits paysans : il n'y a pas eu d'effet de surface des champs. Cependant, le système du semis direct nécessite 3 à 5 ans pour devenir complètement compétitif avec le système intensif du labour. Les différences de rendement et du taux de MOS diminuent avec le temps : cette étude intensive sur parcelles d'érosion devrait donc continuer par des enquêtes sur les champs des paysans. Malheureusement, les essais furent abandonnés après 3 et 5 années sur les parcelles d'érosion.

Conclusions

Dans les deux sites, les pluies ont été très agressives et représentatives de la zone soudanaise tropicale humide. Sur les parcelles en semis direct sous litière, la succession de semaines très pluvieuses au début de la période de culture (juin à août) a entraîné des effets négatifs sur le développement du maïs plus fort que sous les cotonniers (qui ont un système racinaire plus vigoureux) sur les parcelles de semis direct.

Les divers systèmes de semis direct (non-labour ou travail réduit) ont réduit significativement les risques de ruissellement (moins 20 %) et d'érosion (moins 75 %), mais ont augmenté le drainage et le lessivage du phosphore et des autres engrais.

Les meilleurs rendements ont été observés sur les parcelles labourées sur maïs (+ 30 à 50 %) et parfois sur coton (+ 10 à - 10 %). Néanmoins, les différences ont diminué après une jachère de légumineuses et durant « les années sèches ». Les études furent trop brèves pour préciser l'évolution positive du rendement, de la stabilité structurale et des MOS avec une litière suffisamment couvrante. L'effet du semis direct sur la séquestration du carbone n'a pas été évident : il dépend du taux d'argile dans l'horizon de surface et du poids de la litière.

De toute façon, en Afrique soudanaise, le système du semis direct sera difficilement généralisable, étant donné la coutume d'allumer des feux de brousse pour diverses raisons et de lâcher le bétail sur tout le terroir, dès que la récolte

principale a été réalisée. Pour obtenir une litière suffisante, la solution consiste à semer une légumineuse entre les rangs de maïs un mois après le semis du maïs ou à attendre que les adventices aient atteint 20 cm de haut avant de les herbicider (Roundup).

Bibliographie

AINA P., 1993 – Soil tillage in Africa: needs and challenges. *FAO Soils Bull.*, 69 : 1-10.

BARTHÈS B., AZONTONDE A., BOLI Z., PRAT C., ROOSE É., 2000 – Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*, 51 : 485-495.

BOLI Z., BEP B., ROOSE É., 1991 – Enquête sur l'érosion pluviale dans la région de Tchollire, Nord-Cameroun. *Bull. Réseau Érosion*, IRD Montpellier, 11 : 127-138.

BOLI Z., ROOSE É., BEP B., SANON K., WAECHTER F., 1993 – Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux du Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 309-325.

BOLI Z., ROOSE É., 1998 – Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. *Advances in GeoEcology*, Reiskirchen, 31 : 395-401.

BRABANT P., GAVAUD M., 1985 – *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. Cartes au 1/500 000*. Paris, Éditions Orstom, 285 p.

CHARREAU C., NICOU R., 1971 – L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agronomie Tropicale*, Paris, 26 : 209-255.

DIALLO D., BARTHÈS B., ORANGE D., ROOSE É., 2004a – Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse*, 15 (1) : 57-64.

DIALLO D., ORANGE D., ROOSE É., 2004b – Influences des pratiques culturales et du type de

sols sur les stocks et les pertes de carbone par érosion hydrique en zone soudanienne du Mali Sud. *Bull. Réseau Érosion*, IRD Montpellier, 22 : 193-207.

DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 2006 – « Labour ou semis direct dans les écosystèmes soudano-sahéliens : cas du Cameroun et du Mali ». Actes des Journées scientifiques du Réseau Érosion et GCES de l'AUF, Antananarivo, Madagascar, du 25 au 27 octobre, Édition GB : 181-188.

DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 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., Zoenbisch M., Gan Y., Ellis W., Watson A., Sombapanit S. (eds) : *No-till farming systems*, special publication n° 3 by the World Association of Soil & Water Conservation (Waswac) : 383-393.

LAL R., 1974 – *Role of mulching techniques in tropical soils and water management*. IITA Ibadan, Nigeria, Technical Bulletin, 1.

LAL R., 1979 – « Importance of tillage in soil and water management in the tropics ». In Lal R. (ed.) : *Soil tillage and crop production*, IITA, Ibadan, Nigeria : 2-23.

ROOSE É., 1996 – *Land husbandry: component and strategy*. FAO Soils Bulletin, Rome, 70 : 380 p.

ROOSE É., BARTHÈS B., 2006 – « Carbon erosion and its selectivity at the plot scale in Tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics*, CRC, publisher, Boca Raton, *Advances in Soil Science* : 55-72.

WISCHMEIER W., SMITH D., 1978 – *Predicting rainfall erosion losses. A guide to soil conservation planning*. USDA, Washington, handbook, 537, 58 p.

Influences de diverses techniques culturales (SCV-labour) sur l'érosion et sur le rendement en maïs, riz, haricots sur ferralsols des Hautes-Terres malgaches

Norosoa RAZAFINDRAMANANA RAKOTONIAINA

Jean-Marie DOUZET

Bernard BARTHÈS

Lilia RABEHARISOA

Alain ALBRECHT

Introduction

Les Hautes-Terres malgaches sont connues pour les risques d'érosion hydrique (PCS, 1997). Les versants de collines à vocation agricole, appelés localement *tanety*, sont les plus touchés. Ils portent généralement des ferralsols désaturés avec une teneur en matières organiques peu élevée (RABEHARISOA, 2004). La pluviosité importante durant plus de six mois, la pratique du labour conventionnel, les sarclages répétés sur une pente plus ou moins forte et la faible utilisation des intrants agricoles contribuent à favoriser l'érosion hydrique. Pour protéger les sols de versants de collines, des techniques mécaniques antiérosives et des dispositifs biologiques de conservation de sols ont été proposés : les bandes enherbées, les terrasses en gradins, les paillages, les haies vives, les jachères de légumineuses, etc. Or, la dégradation de la production et l'érosion

se poursuivent. La question générale qui se pose est de gérer autrement les sols de *tanety*. Les pratiques d'intensification écologique peuvent apporter une réponse, en particulier les systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale permanente ou systèmes SCV. Les systèmes SCV ont été introduits à Madagascar au début des années 1990, afin de donner la possibilité d'une gestion intégrée des bassins versants et de sols de *tanety*, souvent frappés par l'érosion hydrique, d'améliorer la fertilité des sols de *tanety*, et d'augmenter l'efficacité en eau du sol dans la région semi-aride du sud-ouest de Madagascar (HUSSON et RAKOTONDRAMANANA, 2006).

La présente recherche a été entreprise pour tester l'effet des systèmes en semis direct sur la conservation durable des sols en versant de collines dans la région du Vakinankaratra, sur les Hautes-Terres centrales de Madagascar.

Matériel et méthodes

L'expérimentation a été conduite à Andranomanelatra, près d'Antsirabe, Hautes-Terres centrales malgaches, à une altitude de 1 640 m, sous pluies naturelles. Le climat y est de type tropical d'altitude à deux saisons : (1) un été chaud et humide, d'octobre à avril, durant lequel les précipitations sont abondantes, avec parfois des passages de cyclones ; et (2) un hiver austral, sec et frais, de mai à septembre, avec des précipitations occultes sous forme de rosées, de brouillards, avec parfois des risques de gel. La température et la pluviosité moyennes annuelles sont respectivement de l'ordre de 17 °C et 1 400 mm.

Le sol est de type ferralsols (FAO, 1998), avec un taux d'argile souvent supérieur à 60 %, des pH inférieurs à 5, une teneur moyenne en matière organique de 3,5 % de sol (à 0-20 cm), un rapport C/N de 12 à 14, une capacité d'échange cationique de 7 à 14 cmol.kg⁻¹ de sol, une teneur en macroagréats (> 0,2 mm) stables à l'éclatement dans l'eau (0-5 cm) élevée, de l'ordre de 670g.kg⁻¹ de sol (RABEHARISOA, 2004 ; RAZAFIMBELO *et al.*, 2006).

Dispositif expérimental et systèmes comparés

Le dispositif a été installé en 2004, sur une ancienne jachère de dix ans, par le Cirad et le Fofifa ; il a été occupé par des végétations graminéennes, dont *Aristida* sp. et *Cynodon dactylon*. Il est situé sur un versant exposé au nord, sur une pente variant de 10 à 13 %. Le dispositif comprend 20 parcelles élémentaires de 48 m² groupées en quatre blocs de cinq traitements ; deux parcelles d'érosion, considérées comme témoins, l'une maintenue nue et l'autre en jachère herbacée naturelle. Pour mesurer le taux d'érosion, quinze parcelles d'érosion (21 m²) ont été intégrées sur les parcelles élémentaires. Chaque parcelle d'érosion est

ceinturée par des tôles légèrement enfoncées dans le sol. Le dispositif expérimental comporte plusieurs systèmes en semis direct et en labour manuel, réalisé à l'aide de l'*angady* (sorte de bêche) jusqu'à 30 cm de profondeur. Pour évaluer l'effet du mode de gestion, dans l'ensemble des parcelles cultivées, les doses des intrants apportés sont les mêmes : fumier ($5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) ; dolomie ($0,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) ; engrais minéral $\text{N}_{11}\text{P}_{22}\text{K}_{16}$ ($0,3 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) ; urée ($0,1 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Les systèmes cultivés testés sont inspirés de ceux des paysans de la région du Vakinankaratra, et sont basés sur une rotation biennale comportant en première année le maïs (*Zea mays*.L) associé au haricot (*Phaseolus vulgaris*.L), et en deuxième année le riz pluvial (*Oriza sp.*L) en culture pure.

Cinq traitements culturaux ont été comparés : LABexp : parcelles labourées à l'*angady* tous les ans, à partir de l'année 2006, les résidus de récoltes sont exportés des parcelles ; LABenf : parcelles labourées à l'*angady* tous les ans, les résidus de récoltes sont enfouis dans les parcelles ; LABSCV : parcelles labourées à l'*angady* en 2004, puis dès la campagne 2005-2006, le SCV à couverture morte est appliqué sur ces parcelles ; SCVm : parcelles en semis direct avec couverture végétale permanente morte (paillage), issue de résidus de récoltes de l'année précédente ; SCVv : parcelles en semis direct avec couverture végétale permanente vivante à base de *Brachiaria ruziziensis* (Graminées) ; Nue : parcelle témoin maintenue nue par un labour annuel et des sarclages réguliers ; et **Jc** : parcelle témoin entièrement couverte de végétation herbacée spontanée.

Mesures et prélèvements d'échantillons

Caractéristiques des pluies

La hauteur (mm) et l'intensité maximale (mm.h^{-1}) de la pluie sont enregistrées sur la station météorologique automatique Cimel, installée à côté du dispositif expérimental. L'intensité de la pluie correspond au pic maximal de pluies enregistré sur six minutes consécutives et ramené en mm.h^{-1} .

Ruissellement (%) et pertes en terre (t.ha^{-1})

Le ruissellement est calculé en mesurant la hauteur d'eau collectée dans les fûts. Quant aux pertes en terre, elles sont déterminées à partir des particules solides dans les fûts. Après avoir bien homogénéisé le contenu du fût, une aliquote de 1,5 l a été prélevée, filtrée sur un papier filtre d'une porosité de $0,45 \mu\text{m}$. Le filtre a été séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures afin de déterminer la quantité de charge solide transportée par le ruissellement à chaque événement pluvial érosif.

Rendements des cultures (t.ha^{-1})

Ils sont déterminés à partir du poids de la matière sèche (MS) de la biomasse végétale recueillie sur une surface connue. Pour le maïs et le haricot, une récolte intégrale sur toutes les parcelles (48 m^2) a été effectuée, et le poids de la matière

fraîche a été mesuré sur le terrain. Une aliquote a été recueillie, et mise à l'étuve durant 72 heures à une température de 60 °C. Le rapport du poids de la matière sèche et de la surface du prélèvement donne les rendements agricoles. La même méthode a été appliquée pour la détermination de rendements en riz, mais les deux lignes de bordure autour de chaque parcelle n'ont pas été prises en compte. Dans ce cas, la surface du prélèvement s'est trouvée réduite à 36 m².

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel XLSTAT. Elles ont été comparées entre elles par le test de Tukey au niveau 5 %.

Résultats

Caractéristiques des pluies

La période la plus arrosée se situe généralement entre décembre et janvier. Pendant ces deux mois, le cumul de pluies peut dépasser 500 mm (515 mm en 2007-2008), voire 1,000 mm (1,005 mm en 2006-2007). La pluviosité annuelle a varié de 1 530 mm en année humide à 1 065 mm en année plus sèche (2005-2008). L'intensité maximale de pluies d'un événement le plus érosif durant cette saison de pluies peut atteindre 105 à 170 mm.h⁻¹.

Le ruissellement et l'érosion

Le ruissellement varie selon le mode de gestion (fig. 1), avec une différence hautement significative entre les systèmes conventionnels de labour et semis direct. Durant la période d'expérimentation, le ruissellement annuel moyen (fig. 1a) sur les parcelles labourées et sur la parcelle nue est respectivement huit fois (8 %) et quatorze fois (14 %) supérieur à celui des parcelles en semis direct (1 %). Le ruissellement annuel moyen est également faible sur les parcelles en jachère naturelle (2 %). Les pertes en terre annuelles moyennes (fig. 1b) sur les parcelles labourées (7,6 t.ha⁻¹.an⁻¹) et la parcelle nue (22,1 t.ha⁻¹.an⁻¹) sont plus élevées que sur parcelles en semis direct (0,13 t.ha⁻¹.an⁻¹) ou en jachère herbacée (0,04 t.ha⁻¹.an⁻¹). Remarquons aussi, que les pertes en terre sur les parcelles labourées varient fortement suivant l'année, de 1,06 t.ha⁻¹.an⁻¹ (en 2006-2007) à 15,28 t.ha⁻¹.an⁻¹ (en 2008-2009), alors que sur les parcelles en semis direct, les pertes en terre sont négligeables (< 0,20 t.ha⁻¹.an⁻¹), quelle que soit l'année considérée.

Rendements des cultures

L'effet de semis direct sur les rendements de diverses cultures est synthétisé dans le tableau 1 et la figure 2. Pour le haricot, les rendements en grain sur les parcelles en SCVm sont meilleurs que ceux des autres traitements. Les rendements en grain de riz sont significativement plus élevés sur les parcelles labourées

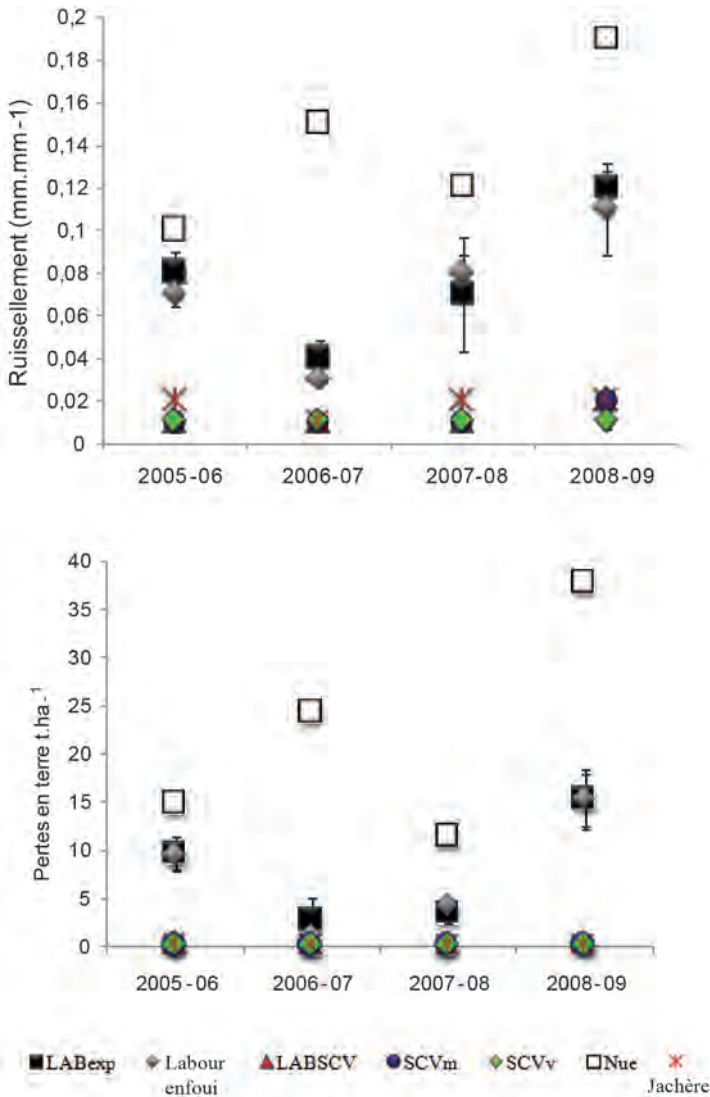


Figure 1
Évolution annuelle du taux de ruissellement (a) et des pertes en terre (b)
selon les modes de gestion durant quatre années d'expérimentation.

et SCVm que sur les parcelles SCVv. Pour les rendements en grain de maïs, aucune différence significative n'a été constatée entre les traitements étudiés durant l'expérimentation, sauf en 2006-2007, où les parcelles LABenf sont plus productives (tabl.1). En termes d'évolution des rendements sur tous les traitements étudiés, il y a une nette diminution des rendements en grain de haricot au fil du temps. En revanche, pour le riz et le maïs, il y a une amélioration des rendements en grain, avec une augmentation beaucoup plus marquée sur les

parcelles en semis direct. Pour le maïs, les différences sont de 0,20, 0,00, 0,75, 1,22 et 0,94 t.ha⁻¹ respectivement pour les traitements LABenf, LABexp, LABSCV, SCVm, et SCVv. Pour le riz, les différences sont de 0,31, 0,00, 0,63, 1,04 et 0,77 t.ha⁻¹ respectivement pour LABenf, LABexp, LABSCV, SCVm, et SCVv (fig. 2).

Tableau 1
Rendements en grain (en t/ha de MS) pour tous les systèmes étudiés
durant quatre campagnes culturales.

Année	Culture	LABenf	LABexp	LABSCV	SCVm	SCVv
2005-2006	Riz	1,26 ± 0,47 a	1,47 ± 0,49 a	1,06 ± 0,46 a	0,76 ± 0,31 ab	0,29 ± 0,16 b
2006-2007	Maïs	2,15 ± 0,10 a	1,84 ± 0,54 ab	1,51 ± 0,23 b	1,70 ± 0,21 b	1,32 ± 0,31 b
2006-2007	Haricot	0,47 ± 0,17 b	0,49 ± 0,20 b	0,83 ± 0,09 a	0,86 ± 0,06 a	<i>Brachiaria r.</i>
2007-2008	Riz	1,57 ± 0,18 a	1,47 ± 0,10 a	1,69 ± 0,43 a	1,80 ± 0,28 a	1,06 ± 0,32 b
2008-2009	Maïs	2,35 ± 0,71 a	1,84 ± 0,29 a	2,26 ± 0,50 a	2,92 ± 1,07 a	2,26 ± 0,72 a
2008-2009	Haricot	0,42 ± 0,10 cb	0,32 ± 0,05 c	0,48 ± 0,05 b	0,69 ± 0,10a	<i>Brachiaria r.</i>

Moyennes ± écarts-types (n = 4). Une même lettre indique une absence de différence significative entre systèmes pour une année au seuil de 5 % (p < 0,05) d'après le test de Tukey. MS : matières sèches.

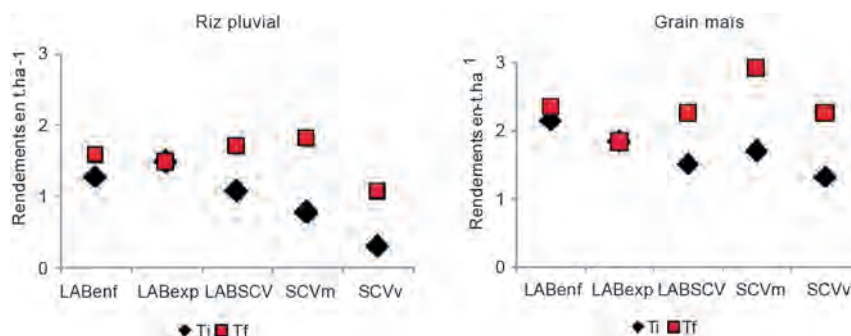


Figure 2
Différences des rendements en grain de riz pluvial (a) et en grain de maïs
(b) observées au temps initial (Ti) et final (Tf) pour tous les traitements étudiés.

Discussion

Effets de la couverture végétale permanente sur l'érosion hydrique

Les systèmes en semis direct ont un effet positif pour contrôler l'érosion hydrique sur les Hautes-Terres centrales malgaches. Ces résultats sont en accord avec ceux publiés ailleurs par BASIC *et al.* (2004) sur luvisols, cultivés en maïs en

Croatie centrale ; par COGO *et al.* (2008), sur oxisols argileux, cultivés en maïs associé au soja au Brésil ; par JIN *et al.* (2009), sur limons fins, cultivés en blé associé à l'arachide à l'est de la Chine et par GÓMEZ *et al.* (2009) sur sol haploxerert typique, cultivé en olivier à l'est de Cordoba en Espagne, par DIALLO *et al.* sur les Alfisols sableux du Mali et du Cameroun (2008). Dans le contexte étudié, l'effet positif des systèmes en semis direct pour contrôler l'érosion hydrique est bien visible dès la mise en place du dispositif.

Le non-retournement du sol participe activement à la réduction du taux d'érosion sous systèmes en semis direct. La présence de la couverture végétale permanente intercepte l'énergie des gouttes de pluies et du ruissellement. Il en résulte que le taux du ruissellement annuel moyen et les pertes en terre annuelles moyennes y restent faibles, quelles que soient les caractéristiques des pluies durant la période d'expérimentation.

À l'inverse, le sol fraîchement travaillé en octobre est exposé directement à l'agressivité des premières pluies érosives d'octobre, novembre et décembre, ce qui occasionne des pertes en terre et du ruissellement importants, lorsque les plantes cultivées ne sont pas encore suffisamment développées pour intercepter les gouttes des pluies.

Effets de divers modes de gestion sur les rendements

Effets des systèmes en semis direct sur les rendements des cultures

À l'issue de cette étude, il a été déduit qu'au bout de quatre années d'expérimentation, les systèmes en semis direct n'améliorent pas systématiquement les rendements des cultures. En fait, par rapport aux systèmes conventionnels de labour, les systèmes en semis direct sous couverture végétale morte sont favorables aux rendements en grain de haricot. Cette différence a été observée dès la mise en place du dispositif expérimental fin 2004 (REMAMY, 2005). La présence du paillage végétal permet d'expliquer en partie cette différence. D'après ROVÉRA *et al.* (1999), le paillage réduit les amplitudes thermiques du sol ; en outre, l'absence de labour favorise le réchauffement progressif du sol (BALESDENT *et al.* 2000). Ces conditions créent un environnement favorable à la croissance des haricots. Mais dans certains cas, le paillage est responsable de faim d'azote ; en effet, les bactéries responsables d'une partie de la décomposition du paillage subtilisent une grande quantité de l'azote du sol, ce qui entraîne une faim d'azote pour certaines plantes cultivées au début du cycle, jusqu'à ce que l'azote soit restitué au sol, mais entre-temps les plantes peuvent en souffrir. Ce n'était pas le cas du haricot, il appartient à la famille des légumineuses, qui a la capacité de fixer l'azote atmosphérique.

D'une manière générale, les rendements en grain du riz sont plus élevés sur les parcelles labourées et SCVm que celles de SCVv à base de *Brachiaria ruziziensis*, et pour le grain de maïs, aucune différence significative n'a été constatée entre les traitements labourés et semis direct, sauf pour l'année 2006-2007, où les rendements sur les parcelles LABenf sont plus élevés. Ce résultat est en accord

avec ceux rapportés par NAUDIN *et al.* (2005), qui ont observé que les rendements en maïs sont plus faibles en semis direct à base de *Brachiaria ruziziensis* qu'en labour conventionnel. Cette réduction du rendement sous parcelles SCVv est expliquée en grande partie par la capacité de *Brachiaria ruziziensis* à se développer très rapidement et à utiliser les éléments nutritifs contenus dans le sol (HUSSON *et al.*, 2008). Cette situation a créé un effet dépressif sur les autres plantes cultivées dès le début du cycle, et a un impact négatif sur le rendement ultérieur. Toutefois, lors de la dernière campagne (2008-2009), il y a une nette amélioration des rendements en grain de maïs sur les parcelles SCVv. On peut supposer que l'enrichissement du sol en matière organique grâce à la couverture de *Brachiaria ruziziensis* permet finalement de compenser la compétition exercée par cette plante de couverture vive sur le maïs.

On peut supposer que cette observation est valable pour les rendements en grain de riz, mais à la différence que l'effet du *Brachiaria ruziziensis* sur la réduction des rendements en grain de riz sur parcelles SCVv persiste jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Effets du temps sur les rendements des cultures selon le mode de gestion

L'approche diachronique (comparaison des rendements de cultures prélevées d'une même parcelle au temps initial T_i , puis au temps final T_f) montre une diminution des rendements en grain de haricot au fil du temps. Pour le moment, nous n'avons pas encore trouvé une explication bien fondée pour l'expliquer. À l'inverse pour le riz pluvial et le maïs, une nette amélioration des rendements des cultures dans l'ensemble des systèmes étudiés a été constatée, avec une augmentation plus prononcée pour les systèmes en semis direct (fig. 2) que labourés. Si la tendance continue, il est fort possible qu'au bout de quelques années, les rendements des cultures sur les parcelles en semis direct seront meilleurs par rapport à ceux des parcelles labourées. C'est pour cette raison que certains auteurs ont pu observer une nette amélioration des rendements sous parcelles en semis direct plusieurs années après leurs mise en place. À titre indicatif, l'étude qui a été entreprise au Brésil, dans la région centre-nord du Mato Grosso, a montré que les rendements en soja passent de 1 700-2 000 à 4 500 kg.ha⁻¹ au bout de 15 ans de pratique des systèmes en semis direct (SÉGUY et BOUZINAC, 1996).

En ce qui concerne la relation entre les caractéristiques de pluies et les rendements de cultures durant l'expérimentation, il n'y en a pas, étant donné que durant la période d'expérimentation la répartition des pluies est à peu près la même. La période la plus arrosée se situe généralement entre décembre et janvier. Bref, l'augmentation des rendements en grain de riz et de maïs est probablement attribuée à l'enrichissement du sol du dispositif expérimental.

Conclusions

L'expérimentation menée à Andranomanelatra confirme durant quatre années l'effet positif des systèmes en semis direct pour contrôler le ruissellement et l'érosion par rapport aux systèmes conventionnels de labour. En fait, quelles que soient les caractéristiques des pluies durant l'expérimentation, le taux d'érosion sur les parcelles en semis direct reste négligeable. Les systèmes en semis direct n'induisent pas automatiquement une augmentation significative des rendements en grain. Dès le début de l'expérimentation, les systèmes en semis direct agissent positivement sur la production en grain de haricot, alors que les rendements en grain du riz ne s'améliorent qu'au bout de quelques années. Pour les rendements en maïs, il n'existe pas de différence significative entre les deux systèmes comparés sauf pour les systèmes en semis direct à couverture vive, où la production semble rester inférieure. Mais pour le riz et le maïs, il y a une augmentation des rendements en grain au fil du temps, avec une augmentation plus accentuée au niveau des parcelles en semis direct que labourées. Ces informations nous permettent de conclure que les systèmes en semis direct pourraient constituer une voie prometteuse de la conservation durable de sols sur les versants des collines, surtout pour les pays tropicaux à vocation agricole comme la Grande-Île, où les principaux risques climatiques (en moyenne 3 à 4 cyclones par an) et les changements climatiques (fortes précipitations, inondations, etc.) pourraient porter atteinte à la productivité des sols sur les versants des collines.

Bibliographie

- BALESDENT J., CHENU C., BALABANE M., 2000** – Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53 : 215-220.
- BASIC F., KISIC I., MESIC M., NESTROY O., BUTORAC A., 2004** – Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. *Soil & Tillage Research*, 78 : 197-206.
- COGO N. P., DENARDIN J. E., BERTOL I., FLAVIO L. F., VOLK L., 2008** – Contrôle d'érosion du sol au Brésil par la technique de semis direct : points importants à considérer. Terre malgache, Macarthur, the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, université d'Antananarivo, École supérieure des sciences agronomiques, 26 : 91-94.
- DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 2008** – « Influence of no-tillage on soil conservation, carbon sequestration and yield of intensive rotation maize-cotton: research on sandy Alfisols of Mali and Cameroon ». In Goddard T., Zoebis M., Gan Y., Ellis W., Watson A., Sombatpanit S. (eds) : No till farming systems, WASWC, special publ. 3 : 383-392.
- DOUZET J. M., SCOPEL B., MULLER B., RAKOTOARISOA J., ALBRECHT A., RAZAFINDRAMANANA N. C., 2010** – Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes-Terres de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, 17 : 131-142.
- FAO, 1998** – Isric, ISSS World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Report N °84*, Rome, FAO.
- GÓMEZ J. A., SOBRINHO T. O., GIRÁLDEZ J. V., FERERES E., 2009** – Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove

of Southern Spain. *Soil & Tillage Research*, 102 : 5-13.

HUSSON O., RAKOTONDRAMANANA, 2006 – « Voly rakotra, Mise au point, évaluation et diffusion des techniques agroécologiques à Madagascar ». Articles et posters présentés au troisième congrès mondial d'agriculture de conservation, Nairobi, Kenya, octobre 2005. Groupement Semis Direct de Madagascar, 67 p.

HUSSON O., CHARPENTIER H., RAZANAMPARANY C., MOUSSA N., MICHELLON R., NAUDIN K., RAZAFINTSALAMA H., RAKOTOARINIVO C., RAKOTONDRAMANANA, SÉGUY L., 2008 – « Fiches techniques plantes de couverture : Graminées pérennes : *Brachiaria* spp. » 20 p. Document obtenu sur le site Cirad du réseau <http://agroecologie.cirad.fr>.

JIN K., CORNELIS W. M., GABRIELS D., BAERT M., WU H. J., SCHIETTECATTE W., CAI D. X., DE NEVE S., JIN J. Y., HARTMANN R., HOFMAN G., 2009 – Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena*, 78 : 81-86.

NAUDIN K., BALARABE O., ABOUBAKARY, 2005 – Système de culture sous couverture végétale : projet ESA Nord-Cameroun, résultats campagne 2004, I. Synthèse. 65 p.

PCS, 1997 – Projet de conservation des sols « bilan et évaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols à Madagascar : conservation des sols et érosion/atlas de carte et de photographie » mars 1997, 501 p.

RABEHARISOA L., 2004 – Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes-Terres de Madagascar. Thèse de doct. d'État ès-sciences naturelles, univ. d'Antananarivo-faculté des sciences-Département de biologie et écologie végétales, 196 p.

RAZAFIMBELO T., ALBRECHT A., BASILE I., BORSCHNECK D., BOURGEON G., FELLER C., FERRER H., MICHELLON R., MOUSSA N., MULLER B., OLIVER R., RAZANAMPARANY C., SÉGUY L., SWARC M., 2006 – Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes-Terres de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, 13 : 113-127.

REMAMY R., 2005 – Quantification du ruissellement et de l'érosion sur défriche des Hautes-Terres de Madagascar : labour et semis direct sur couverture végétale permanente. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur agronome de l'École supérieure des sciences agronomiques, Département agriculture, 56 p.

ROVÉRA G., ROBERT Y., COUBAT M., NEDJAI R., 1999 – Érosion et stades biorhexistatiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence) ; essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. *Étud. Géogr. Phys.*, 28 : 109-115.

SÉGUY L., BOUZINAC S., 1996 – Le soja au Brésil : production et système de culture. Cirad-CA-Document N °2, 42 p.

Usages agropastoraux des biomasses végétales et conséquences sur l'adoption du semis direct sous couvert végétal au nord du Cameroun

Patrick DUGUÉ

Paul BELCHI

Lise PARESIS

Marine RÉTIF

Jean-Pierre OLINA

Introduction

Les performances de l'agriculture en Afrique soudanienne sont limitées par les aléas climatiques (sécheresses et inondations), mais surtout par la faible fertilité des sols. Dans les zones cotonnières du fait d'une utilisation d'engrais minéraux, la fertilité chimique des terres cultivées se dégrade moins rapidement que leur statut organique (KINTCHÉ *et al.*, 2010). La baisse de leur taux de carbone s'explique par la faiblesse des apports de fumures organiques (en quantité et qualité) et un moindre recours à la jachère que par le passé. Cette évolution de la fertilité des terres affecte la nutrition des plantes cultivées et renforce l'érodibilité des sols. Malgré les faibles pentes (1 à 3 %), l'érosion hydrique et le ruissellement deviennent dans cette région des contraintes importantes pour l'agriculture entraînant des pertes de nutriments, de matières organiques (MOS) et d'eau (BOLI et ROOSE, 1998). Pour limiter ces processus, les agronomes ont privilégié dans un premier temps des techniques d'aménagement des

glacis : cordons pierreux, bandes enherbées, lignes d'arbres et cultures en courbe de niveau (ROOSE, 1994). Plus récemment, les systèmes de culture sur couverture végétale (permanente ou semi-permanente) – SCV – ont été proposés comme une solution efficace pour limiter le ruissellement et l'érosion hydrique sur de grandes superficies et aussi, améliorer la fertilité du sol et les rendements. Ces systèmes de culture sont en cours de vulgarisation en zone cotonnière au nord du Cameroun. Dans cette étude nous verrons que la biomasse disponible est d'avantage distribuée comme fourrage au bétail que conservée sur place pour améliorer les sols.

Problématique et méthodologie

Contexte

La région cotonnière du Cameroun est comprise entre les isohyètes 700 et 1 200 mm. Les sols dominants de type ferrugineux sur grès vers Garoua et Touboro (région du Nord-Cameroun) ou jaune-grisâtre, profonds et sableux dans la région Extrême-Nord, sont fragiles et pauvres en matière organique, azote et phosphore. Les systèmes de culture comprennent des céréales (sorgho, maïs), des légumineuses (arachide, niébé) et le cotonnier. La baisse de fertilité des sols cultivés et la raréfaction des terres défrichables, même au sud de Garoua, ont entraîné une baisse tendancielle du rendement en coton de l'ordre de 30 % durant les vingt dernières années (OLINA *et al.*, 2008 ; ABOU ABBA *et al.*, 2006). Face à cette dégradation, la Sodecoton et le projet ESA (Eau, Sol, Arbre) ont initié en 2007 la vulgarisation des SCV après une phase d'expérimentation entre 1991 et 2006 (BOLI et ROOSE, 1998 ; VALLÉE *et al.*, 1996). Par ce choix technique, la Sodecoton voulait redresser la fertilité des sols cultivés en combinant l'effet des SCV sur l'érosion hydrique et sur le taux de MO du sol.

Les producteurs de coton qui constituent le public cible de cette action cultivent de petites surfaces en pluvial, en moyenne 3 ha par an, et seulement 30 % possèdent un attelage, mais ils ont tous accès au crédit de campagne pour les intrants du cotonnier (engrais et pesticides) et pour une partie de la surface en céréales. Ces exploitations ont progressivement intégré l'élevage (petits ruminants, bovins, ânes de trait). Mais les plaines du nord du Cameroun sont aussi les zones d'élevage des peuls foubé et m'bororo qui détiennent la majorité du bétail bovin dans cette région. Cet élevage est conduit de façon extensive à partir des parcours naturels et de la vaine pâture sur l'ensemble des zones cultivées (DONGMO *et al.*, 2012). La culture fourragère ne s'est pas diffusée malgré les interventions des structures de vulgarisation depuis des décennies. De ce fait, les éleveurs et les agro-éleveurs producteurs de coton sont en concurrence pour valoriser la biomasse des parcours et les résidus de culture. Par ailleurs, la mise

en œuvre des SCV sur de grandes surfaces implique qu'une partie des résidus de culture soit réservée à la couverture du sol et soustraite de l'alimentation des ruminants d'élevage. Les concurrences entre l'usage fourrager de cette biomasse et l'entretien de la fertilité du sol (enrichissement de l'horizon superficiel en C et nutriments N, P, K, Ca, Mg) sont donc importantes surtout dans les zones à forte densité humaine et d'élevage.

Les principes de l'agriculture de conservation au nord du Cameroun

La Sodecoton a promu la culture attelée pour le cotonnier et les autres cultures dès le début du programme d'intensification agricole en 1974 (avec l'engrais minéral et les insecticides). Toutefois, le semis direct traditionnel s'est toujours maintenu surtout pour le sorgho et l'arachide : aujourd'hui, il concerne en plus le cotonnier et le maïs. Les agriculteurs sont à l'origine d'une innovation qui couvre plus de 100 000 ha dans le bassin cotonnier : le semis direct combiné à l'usage des herbicides totaux et sélectifs (OLINA, 2010). Avec la baisse du prix d'achat du coton entre 2000 et 2007, le maintien de la filière coton dépend entre autres de la capacité des agriculteurs à maintenir un niveau de rendement (1 à 1,2 t/ha) permettant de couvrir les charges de production et de rémunérer suffisamment le travail familial.

L'agriculture de conservation repose sur trois principes : le non-travail du sol, la couverture du sol et la rotation et/ou l'association des cultures. Vu les objectifs de la Sodecoton, la culture pivot du SCV est le cotonnier qui est semé directement dans un mulch de résidus de la culture ou de l'association des cultures précédentes. Diverses associations de cultures ont été préconisées à base de maïs ou sorgho : céréale + crotalaire, céréale + mucuna, mais celle qui a été le plus souvent retenue par les paysans est composée du *Brachiaria ruziziensis* semé dans l'interligne de la céréale. Les avantages de cette association sont d'une part l'économie de travail, car on sème une ligne de *brachiaria* entre les lignes de céréale contre deux lignes pour la crotalaire et d'autre part, le fait que la paille de *brachiaria* est peu consommée par les termites et couvre bien le sol (paille fine) et elle peut servir à l'alimentation du bétail. Mais cette association de deux graminées demande plus d'azote qu'une association comportant une légumineuse. Le système correspond dans la plupart des cas à une rotation biennale (céréale + plante de couverture/coton paillé) et plus rarement, le soja ou une céréale paillée à la place du coton paillé.

Le paillage du sol est efficace pour le contrôle des adventices, l'amélioration du bilan hydrique et du rendement et, à moyen terme, sur la fertilité du sol s'il est suffisamment dense et répété dans la rotation. WEY *et al.* (2006) et NAUDIN *et al.* (2010) considèrent qu'il faut maintenir pour cela entre 5 et 7 t/ha minimum de biomasse sèche sur le sol au semis. En deçà de cette quantité, le paillage est peu ou partiellement couvrant, réduit l'érosion, mais entraîne un enherbement excessif de la culture qu'il sera difficile de maîtriser durant tout le cycle cultural.



a : vaine pâture dans un champ de sorgho, éliminant une grosse partie des chaumes protégeant le sol de l'érosion, Nord-Cameroun.

© P. Dugué

b : semis de coton dans les résidus de culture de maïs + Brachiaria couvrant bien le sol, Nord Cameroun.

© P. Dugué

Méthode d'étude

L'évaluation de l'adoption des SCV par les exploitations cotonnières a été réalisée de 2009 à 2011 dans trois situations différentes : le pays Tupuri (village de Sirlawé) dans l'Extrême-Nord, la zone centrale proche de Garoua (village de Laindé Massa), la zone sud proche de Touboro (village de Tapi) dans le Nord (tabl. 1).

Tableau 1

Principales caractéristiques des sites d'étude et des problèmes de dégradation des sols.

Localisation des villages d'étude	Densité et type de population	Pluviosité mm/an	Systèmes de production dominant	Problèmes de dégradation des sols
Sirlawé Plaine du Diamaré, pays Tupuri	160 hab./km ² Agropasteurs autochtones	700 à 800	Sorgho + coton + arachide/niébé et élevage bovin d'agro-éleveurs	Sol alluvial. Très faible pente, peu d'érosion, mais engorgement possible. Faible fertilité, du fait du surpâturage et des faibles apports de fumure hors des champs de case
Laindé Massa , nord-ouest de la plaine de la Bénoué, ancien front pionnier agricole	60 hab./km ² Agriculteurs migrants et éleveurs M'Bororo	900 à 1 000	Mais + sorgho + coton + arachide et élevage bovin chez les éleveurs	Sol ferrugineux sableux. Érosion importante sur glacis entre 1 et 3 % de pente, faible fertilité du fait du substrat gréseux et de la culture continue avec très peu d'apports organiques
Tapi , nord-est de Touboro, pays Mboum	15 hab./km ² Agriculteurs autochtones et éleveurs M'Bororo	1 100 à 1 200 mm/an	Mais + coton + arachide + soja et élevage bovin chez les éleveurs	Sol ferrugineux sablo-argileux. Érosion si conjonction de pente + fortes pluies + réduction du couvert végétal. Fertilité du sol moyenne à bonne.

Ces trois villages font partie du réseau de « Terroirs pilotes » du projet ESA où sont aussi testés en plus des SCV, les comités de gestion villageois de la biomasse et l'introduction de la culture fourragère pour le bétail des éleveurs et des agriculteurs. L'étude a mobilisé les statistiques produites par le projet ESA et des enquêtes auprès d'agriculteurs ayant adopté ou non les SCV (23 à Tapi et 20 à Laindé Massa en 2009 [RÉTIF *et al.*, 2009], 21 à Sirlawé en 2010 [PARESYS, 2010]). En 2011, les enquêtes ont porté sur 86 parcelles cultivées en SCV à Sirlawé en 2010 (BELCHI, 2012).

Résultats

Les difficultés à maintenir une litière sur les sols cultivés

À Sirlawé, les enquêtes ont concerné 25 parcelles de coton conduites en SCV en 2010. Après la saison sèche (début juin), on constate que la couverture du sol (Sc) est faible à très faible ($Sc < 40 \%$) dans 84 % des parcelles, ce qui

explique que dans 21 parcelles sur 25 les agriculteurs ont apporté de la biomasse additionnelle. Pour les 2/3 de ces 21 parcelles, des tiges de sorgho conservées et stockées ou glanées dans d'autres champs ont été mobilisées et pour le 1/3 restant, les agriculteurs ont utilisé des pailles d'*andropogon*, des vieux toits, des restes de paille de riz ou encore des émondes d'arbres et arbustes. Ces apports coûteux en travail permettent de faire passer le ratio de champs assez bien couverts ($Sc > 40\%$) de 16 % à 68 %. Au moment du semis du coton paillé, il reste un 1/3 des parcelles en semis direct (sans labour) présentant encore une trop faible couverture du sol. Selon RAUNET *et al.* (2006), il faudrait 5 t/ha de biomasse MS d'un mélange de 75 % de tige de paille de sorgho + 25 % de paille de *brachiaria* pour obtenir un taux de couverture du sol de 80 %. Si les 5 t/ha sont constitués uniquement de tiges de sorgho, ce taux de couverture n'est plus que de 40 %. S'il ne reste que 2 t/ha de tige de sorgho au sol, seulement 15 % du sol sont couverts.

La faible couverture du sol dans des parcelles SCV s'explique par l'importance des prélèvements par le bétail et les hommes pour différents usages. Pourtant à Sirlawé, près de la moitié des parcelles de « coton paillé » de 2010 sont entourées de haies vives, mais elles sont souvent peu efficaces, car trop jeunes ou pas assez entretenues par manque de matériels adéquats. La faible couverture du sol dans ces enclosures peut s'expliquer aussi par un besoin impérieux de fourrage du propriétaire du champ en SCV pour alimenter ses bœufs et éviter de les vendre à bas prix en fin de saison sèche. Les parcelles de sorgho associé au *brachiaria* (ou à une autre plante de couverture) venant après le coton paillé ne bénéficient jamais d'un apport de biomasse additionnelle. Cela aboutit en troisième année de rotation à réaliser le semis direct dans les restes de tiges de cotonnier de l'année 2 et de pailles de sorgho + *brachiaria* de l'année 1. Ces semis de sorgho sont réalisés précocement avant que la parcelle ne soit trop enherbée. Lorsque les agriculteurs considèrent que l'enherbement sera difficilement maîtrisable, ils peuvent revenir au labour à la charrue sinon ils utilisent des herbicides sélectifs de pré-levée et même de post-levée.

Un début d'adoption du SCV, mais des performances limitées par la faible couverture du sol

Les statistiques du projet et les observations faites dans ces trois sites mettent en évidence les difficultés pour les agriculteurs de maintenir le paillage des parcelles. La surface en cultures associées, principalement céréales + *brachiaria*, a progressé jusqu'à 6 000 ha environ sur l'ensemble de la zone cotonnière en 2009, puis s'est maintenue à 3 300 ha en 2010 et 2011. Mais la surface en cultures paillées, principalement le cotonnier, n'a jamais atteint les 400 ha par an (soit moins de 10 % de la surface en cultures associées) (RÉTIF *et al.*, 2009). Lorsque les densités de population et de bovin diminuent (région de Touboro), la conservation des litières est plus facile si les agriculteurs arrivent à soustraire les parcelles paillées aux feux de brousse. Les difficultés de conservation des mulch affectent les résultats obtenus par les SCV dans au moins deux domaines. Premièrement,

le temps de travail peut augmenter, alors que l'on considère généralement que le SCV par la suppression du labour et l'obstacle à la levée des adventices qu'il crée, entraîne une réduction de ce temps. Un hectare de coton paillé pour lequel il faut transporter de la biomasse additionnelle demande entre 25 et 29 HJ (Homme-Jour) de travail supplémentaire par rapport à la même surface de coton labourée à la charrue. Le bilan en travail est différent pour le sorgho + Br (sorgho associé au *brachiaria*) comparé au sorgho pur. Le semis du *brachiaria* dans la céréale demande entre 3 et 5 HJ/ha, ce qui est peu et s'il se développe bien, le temps du 2^o sarclage de la céréale peut être diminué. De plus, l'association de cultures n'est jamais buttée, car le *brachiaria* occupe l'interligne. Le temps de travail nécessaire (hors récolte) aux deux types de culture de sorgho est équivalent et correspond en moyenne à 50 HJ/ha (BELCHI, 2012).

Deuxièmement, la consommation en intrants de la rotation [céréales associées/coton paillé] a tendance à augmenter, du fait du risque de faim d'azote causé par le paillis à rapport C/N élevé, de la concurrence pour les nutriments entre les deux graminées associées (céréale et *brachiaria*) et enfin par un usage accru d'herbicides lorsque le paillage est peu couvrant et laisse pousser les adventices (BOLI et ROOSE, 1998). Concernant la trentaine de parcelles de sorgho + *brachiaria* enquêtées pour 2010, l'apport moyen d'engrais correspond à 43 N + 9 P + 13 K par ha, alors que le sorgho conventionnel en culture pure a reçu une fertilisation minérale moyenne de 34 N-3 P-4 K. De même pour le coton en semis direct sur mulch, le projet ESA2 et la Sodecoton conseillent pour prévenir la faim d'azote, un apport supplémentaire de 50 kg/ha d'urée (ou 23 unités d'azote) par rapport à la fertilisation recommandée pour le coton conventionnel généralement semé après labour. Du point de vue de l'entretien de la fertilité du sol, cette augmentation de doses d'engrais améliore la décomposition des résidus en surface. Mais pour le producteur, elle doit s'accompagner d'un gain de rendement l'année de l'application de cette dose d'engrais afin de couvrir le supplément de charges financières.

Un rendement en biomasse végétale accru

L'accroissement du rendement en résidus de récolte (intégrant la paille de *brachiaria*) est toujours observé lorsque l'on compare le système SCV [céréale + *brachiaria*/coton paillé] au système conventionnel [céréale pure/coton]. Le gain provient en grande partie de la production additionnelle de paille de *brachiaria* qui est comprise en moyenne entre 2 et 3,5 t MS/ha, même dans la partie la moins pluvieuse du bassin cotonnier comme à Sirlawé (BELCHI, 2012 ; PARESYS, 2010). Si le SCV est conduit dans des conditions moyennes à optimales, des augmentations de rendements en grain et paille de sorgho et en graine et tiges de coton sont aussi observées (tabl. 2).

Quel que soit le devenir de la production supplémentaire de biomasse végétale (tiges et pailles) obtenue avec le système SCV, mais aussi dans d'autres cas avec d'autres techniques (fertilisation organo-minérale raisonnée, cultures associées, valorisation du ruissellement, Roose *et al.*, chap. 37), celle-ci va contribuer à

Tableau 2
Comparaison des rendements en grain et paille entre les systèmes SCV et conventionnel selon le type de champs en 2009 et 2010.

Rendement	En grain ou coton-graine en t/ha		En résidus de culture et paille en MS/ha			
	Champs de case		Champs de village	Champs de case		Champs de village
	2009	2010	2010	2009	2010	2009 2010
Sorgho + <i>brachiaria</i> SCV	2,9	2,7	1,5	9,7	10	Fe 8,4
Sorgho conventionnel	2,6	1,8	1,4	7,1	4,8	3,5
Coton paillé SCV	fe	1,6	1,3	nm		
Coton conventionnel		1,1	0,8			

fe : faible effectif de parcelles ; nm : non mesuré, non estimé.

améliorer le statut organique des sols, car les résidus de culture ne sont quasiment plus brûlés en fin de saison sèche au nord du Cameroun (RÉTIF *et al.*, 2009) et sont peu utilisés comme matériau de construction. Soit la biomasse est consommée par le bétail et une partie du carbone (40 à 60 %) revient au sol après passage dans le rumen (mais les pertes sont importantes par émission de CH₄, ainsi que la consommation par l'animal), soit elle reste sur le sol en surface et migrera en partie et progressivement dans le premier horizon du sol sous forme d'acides humiques. (10 à 25 % : voir Guerin et Roose, chap. 12).

Les différents usages des biomasses végétales

Utilisation des résidus de culture stockés

L'étude de la faisabilité du paillage dans ce contexte implique d'évaluer les différents usages des biomasses et de trouver des voies d'accroissement de leur production. Dans les villages de Laindé, Massa et Tapi, 17 producteurs pratiquant les SCV sur les 25 enquêtés avaient stocké pour la saison sèche 2008-2009 des résidus de culture pour compléter entre autres la ration pâturée par leurs bovins et petits ruminants. 11 sur 17 avaient récolté du foin de *brachiaria* en quantité variable, de 50 kg à 2 000 kg par exploitation. Les tiges de sorgho constituent en quantité (100 à 3 000 kg) le principal fourrage stocké, alors que cette biomasse peut se maintenir plus facilement sur le sol que la paille de maïs (0 à 2 000 kg) qui est à la fois très consommée par le bétail par vaine pâture et par les termites. Il faut souligner que pour ces 17 exploitations, la surface en SCV (qui devrait donc échapper aux prélèvements de biomasse) représente toujours moins de 20 % de la surface cultivée.

À Sirlawé, les différents usages des résidus stockés (toutes cultures confondues) ont été évalués dans 9 exploitations en agriculture conventionnelle et 12 pratiquant le SCV sur au moins une parcelle (PARESIS, 2010). L'alimentation des ruminants

(bovins essentiellement) mobilise plus de 90 % des stocks de résidus à deux exceptions près : dans une première exploitation sans bovin, le stock est brûlé en grande partie pour produire du sel traditionnel pour la cuisine à partir des cendres ; dans une seconde, 40 % du stock sont destinés à être épandus sur une parcelle de coton paillée. Il existe par ailleurs deux autres types de prélèvement : ceux réalisés par des personnes étrangères aux familles enquêtées qui peuvent récolter des tiges de sorgho et de cotonniers pour des besoins domestiques sans avertir le propriétaire de la culture, et la vaine pâture qui reste pratiquée dans la grande majorité des situations au nord du Cameroun et d'Afrique soudanienne.

Maintien de la pâture des résidus au champ

Dans les trois territoires villageois étudiés, la vaine pâture reste la principale cause de disparition des résidus de culture durant la saison sèche dans les parcelles de céréales en agriculture conventionnelle, puisque leur brûlis a fortement régressé (RÉTIF *et al.*, 2009). Dans les parcelles SCV, il en est souvent de même malgré les efforts des producteurs pour conserver les pailles sur le sol : les petits ruminants ne sont pas gardés en saison sèche et broutent ces résidus, en particulier dans les parcelles proches des habitations. Par ailleurs, les éleveurs et les agro-éleveurs ont vu que leurs bovins appréciaient le *brachiaria* mélangé ou non à la paille des céréales, ce qui a conduit à l'apparition de nouveaux modes de gestion de cette biomasse fourragère. À Tapi, quelques agriculteurs produisant le *brachiaria* en culture pure pour la vente des semences ont autorisé contre paiement des éleveurs à faire pâturer leurs bovins dans cette culture fourragère en saison sèche. La récolte en début de saison sèche de foin de *brachiaria* et le stockage en botte à la concession sont observés dans quelques exploitations à Laindé Massa et Tapi.

Plus remarquable, à Sirlawé, les agro-éleveurs tupuri du village de Sirlawé ont développé dans leurs champs de case une quasi-monoculture de sorgho associé à du *brachiaria* afin de produire du grain (sécurité alimentaire) et du fourrage pour maintenir dans le terroir villageois leurs bovins producteurs de fumure organique et engraisser des bovins de trait quelques semaines avant leur réforme. Cette fumure revient presque exclusivement dans l'auréole de champs qui ceinturent les concessions dispersées dans le terroir villageois. L'innovation n'est pas seulement technique, mais aussi organisationnelle, car sur ces espaces la vaine pâture n'est plus admise et les producteurs ont su s'organiser entre eux afin que chacun respecte ce droit de pâturage exclusif ou individualisé. De ce fait, sur l'ensemble des 32 parcelles de sorgho + Br de 2010 dans ce terroir, il n'y en avait qu'un 1/3 qui faisait l'objet d'une pratique de conservation de la biomasse au sol en saison sèche en vue d'une culture paillée suivante (coton, soja). Il s'agissait principalement des parcelles protégées par une haie vive. 53 % des parcelles sorgho + Br étaient réservés au pâturage par les bovins des producteurs de cette association de cultures et 16 % à une combinaison-stockage de biomasse et pâturage de la quantité restante. Ces chiffres montrent bien que l'association sorgho + Br initialement prévue pour couvrir le sol en saison sèche est cultivée à d'autres fins (BELCHI, 2012).

Discussion et perspectives

Des changements techniques et organisationnels en émergence

En zone tropicale, la couverture du sol limite le ruissellement et l'érosion et améliore les termes des bilans hydrique et minéral des cultures pluviales (BOLI et ROOSE, 1998 ; FINDELING *et al.*, 2003 ; DIALLO *et al.*, 2008 ; SOUTOU *et al.*, 2008). Au Cameroun, l'accroissement de rendement en coton-graine dû au paillage a surtout été observé dans l'Extrême-Nord (Maroua) où la pluviosité est moins abondante et plus aléatoire que dans la région Nord (Garoua-Toubo) (NAUDIN *et al.*, 2010). Mais les résultats d'enquêtes réalisées dans ces deux régions entre 2009 et 2011 montrent les fortes concurrences entre les usages des différentes biomasses utilisables en agriculture, en élevage et par les ménages ruraux. Pour la majorité des producteurs, la priorité en termes d'usage demeure l'alimentation du bétail pendant la saison sèche. Les agriculteurs qui ne possèdent pas de bovin seraient plus susceptibles de préserver la biomasse résiduelle (dont celle de la plante de couverture) dans leurs champs pour couvrir le sol, mais le droit de vaine pâture reste une règle de base. Des feux accidentels ou malveillants peuvent aussi détruire les couvertures végétales en fin de saison sèche.

Malgré les contraintes de gestion de la biomasse au champ en saison sèche, les pratiques individuelles ou collectives associées sont en train d'évoluer et certaines sont à encourager :

- l'arrêt de la destruction des résidus de culture (surtout des céréales) par les feux de nettoyage des champs en fin de saison sèche ;
- l'intérêt pour les cultures fourragères (légumineuses et graminées), surtout le *brachiaria* en culture associée avec les céréales ou en culture pure ;
- le développement (mais toujours sur de petites surfaces) du paillage par les émondes des arbres et des haies vives, sans que l'on en connaisse les effets sur la pérennité de la strate arborée ;
- La modification des modes de gestion des résidus de culture en pays Tupuri, mais aussi dans d'autres situations par la délimitation de zones sans vaine pâture et dédiées au SCV ou aux cultures fourragères (BALARABÉ *et al.*, 2012 ; DUGUÉ *et al.*, 2015 ; DUGUÉ et OLINA, 2015).

Le contrôle de l'érosion et du ruissellement par le paillage est perfectible

Pour que la couverture du sol par de la biomasse riche en C devienne un moyen de contrôle efficace du ruissellement et de l'érosion hydrique (et éolienne), il convient de travailler dans trois directions complémentaires.

- Produire plus de biomasse végétale à partir des espèces herbacées – production primaire – pour mieux couvrir les différents besoins (fourrage, paillage,

matériaux de construction), cela milite pour que les États subsahariens poursuivent la politique de subvention des engrais minéraux, levier très efficace pour accroître cette production.

– Développer l'utilisation des émondes des arbres et arbustes afin d'accroître la production de bois énergie et de branches feuillues pour la couverture du sol. LOUPPE (1991) et DIACK *et al.* (2000) ont montré au Sénégal sous 500 mm de pluie que l'on pouvait obtenir entre 0,3 et 2,4 t MS/ha/an avec la coupe du *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum*, arbustes des champs qui repoussent durant la saison sèche. Sur cette base, LAHMAR *et al.* (2012) proposent d'accroître la densité du *Piliostigma* par semis ou plantation le long des cordons pierreux afin de produire plus de branches de cet arbuste pour couvrir le sol. Enfin, SMEKTALA *et al.* (2005) ont montré en pays Tupuri qu'il est possible d'émonder totalement tous les 8 ans des vieux arbres comme *Faidherbia albida* pour produire du bois énergie (environ 2,7 t/ha par an) et du fourrage. Il conviendrait de trouver une autre espèce d'arbre à émonder pour produire spécifiquement du paillis utile aux sols et par conséquent, aux cultures.

– Préciser les termes des bilans hydriques et de nutriments par une étude plus précise de flux d'éléments organiques et minéraux (en particulier N, P, K, Ca, Mg). La dynamique de ces éléments contenus dans le paillage et laissés en surface durant la saison sèche est mal connue, car les processus d'évolution des biomasses sont complexes (termite, passage du bétail et des hommes, effets du rayonnement solaire, effets des pluies et des micro-organismes). Les émondes des arbustes sont tout aussi pauvres en phosphore (de 0,06 à 0,11 %) que les pailles de céréales et de *brachiaria* (0,15 à 0,2 %) : elles semblent plus riches en azote (1,2 à 1,5 % contre 0,2% à 0,4 % pour le sorgho et *brachiaria* sec) (DIEDHIOU *et al.*, 2009 ; ROOSE, 1981). Sur des sols ferrallitiques très acides du Rwanda, König et Ndayizigiye (dans cet ouvrage) ont montré que 4 coupes de haies d'arbustes légumineuses plantées tous les dix mètres ont remonté chaque année 105 kg d'azote, 4 kg de phosphore et 20 à 30 kg de calcium, de magnésium et de potassium.

Les limites d'une agriculture basée sur les SCV

Les contraintes à l'adoption d'un modèle d'agriculture basé sur la couverture du sol par des biomasses et le semis direct des cultures (les SCV) sont très importantes en Afrique soudano-sahélienne (GILLER *et al.*, 2009 ; DUGUÉ *et al.*, 2015) et sont rappelées dans cette étude. Dans la grande majorité des cas, les producteurs souhaitent développer leurs systèmes d'élevage pour la culture attelée et le transport, le fumier, un revenu complémentaire et la gestion des aléas. Leur priorité est alors de réserver la biomasse pour l'alimentation du bétail. De plus, les agronomes n'ont pas fait la preuve dans ces régions de savane, surtout dans la partie semi-aride (700-1 000 mm/an), qu'un prélèvement modéré de biomasse de la couverture du sol pour l'alimentation du bétail était possible sans compromettre les performances technico-économiques des SCV, par exemple de 20 % à 40 % de la biomasse produite comme cela a été montré au lac Alaotra à Madagascar

(ANDRIARIMALALA *et al.*, 2013). Dans les zones de savane semi-aride, il est donc illusoire de considérer que les SCV vont couvrir toute la surface cultivée des régions cotonnières qui sont aussi d'importantes zones d'élevage. Mais il n'est pas exclu de combiner à l'échelle des exploitations agricoles et des terroirs des systèmes de culture relevant des deux logiques : la biomasse protégeant le sol sur une partie des champs en développant le SCV (si possible avec des légumineuses comme plantes de couverture à la place du *Brachiaria*, pourtant préféré par les paysans) d'une part, et la biomasse nourrissant le bétail avec retour du fumier, d'autre part. L'apport du fumier ainsi disponible doit continuer à être orienté vers les parcelles qui sont labourées pour faciliter son enfouissement. L'apport de fumier dans les parcelles cultivées en SCV et surtout son enfouissement ne sont pas choses faciles et nécessitent un investissement en travail supplémentaire (apport manuel à chaque poquet et sous le paillis).

Mais cette combinaison de systèmes de culture et de techniques est difficile à organiser. Dans ce cas, il serait possible de mettre l'accent sur une légumineuse non appétée par le bétail – la crotalaire – comme plante de couverture semée entre les lignes de céréales. Dans les conditions paysannes du Nord-Cameroun, la biomasse de crotalaire laissée au sol varie de 2 à 4 t MS/ha et contient environ 1 % de N (WORTMANN *et al.*, 1994), ce qui fournit entre 20 et 40 kg de N au sol sans compter les apports par le système racinaire de cette légumineuse. Mais les paysans expérimentateurs du SCV l'ont peu appréciée malgré ses qualités agronomiques (allélopathie et contrôle des adventices, apport de N) pour deux raisons principales : le temps de semis est élevé, car on insère deux lignes de crotalaire dans l'interligne de céréale, la biomasse et les graines ne sont d'aucune utilité pour l'alimentation humaine et animale. Avec les autres légumineuses testées (*mucuna*, *dolique*, *niébé*) par le projet ESA, les producteurs produisent une biomasse qui se dégrade rapidement en saison sèche et n'assure pas bien la couverture du sol malgré leur association avec la céréale. Elles sont plutôt à considérer comme des plantes fourragères.

Dans tous les cas, la recherche d'une combinaison optimale de systèmes de culture (et d'élevage) doit se raisonner en respectant les choix techniques des différentes catégories de producteurs (éleveurs, agro-éleveurs, agriculteurs adhérents ou non à l'agriculture de conservation). La diffusion des SCV impliquent dans les régions où l'élevage est bien présent d'aborder avec la même importance la question du développement durable des productions végétales et celle des productions animales, et donc celle de l'insertion des éleveurs dans les actions de développement rural (DONGMO *et al.*, 2012).

Les autres voies d'amélioration

Si l'élevage se maintient, les recommandations en termes d'amélioration qualitative et quantitative des fumiers restent d'actualité. L'agroforesterie développée en pays serer au Sénégal et tupuri au Cameroun avec le *Faidherbia albida*, mais aussi dans d'autres régions avec *Prosopis juliflora*, *Ficus sycomorus* et le karité (*Vitellaria paradoxa*) reste un modèle de système de culture complexe et de

production d'avenir. Mais là encore, l'expansion des parcs nécessite des innovations techniques (l'émondage des sujets âgés, la conduite des jeunes pousses, une mécanisation adaptée), mais surtout organisationnelles comme la révision des codes forestiers (SMEKTALA *et al.*, 2005). Les techniques de lutte contre l'érosion et de gestion du ruissellement éprouvées en zone semi-aride (Roose et coll, chap. 37) sont aussi à promouvoir après quelques adaptations : les cordons et les seuils en pierres dans les zones de piémont du nord du Cameroun sont déjà très appréciés, mais les moyens de transport et de construction manquent ; par contre, les bandes enherbées sont peu durables sauf si elles sont complantées d'arbres utiles et productifs. Les cultures associées ou mieux encore les cultures dérobées peuvent être très utiles pour l'alimentation humaine et du bétail et la recharge des sols en azote et en carbone (Valet, chap. 21). Dans le sud de la zone de production cotonnière au Cameroun, au Mali et au Burkina Faso, les réserves hydriques du sol après la maturation des céréales restent importantes et mal valorisées par des adventices qui salissent les champs, alors que l'on peut pratiquer l'association maïs-*Mucuna pruriens* et mieux encore, la culture dérobée du *Mucuna* semé 40 jours après le maïs (OLINA et DUGUÉ, 2000). Enfin dans cette gamme de pistes d'amélioration, il ne faut pas négliger la fumure minérale qui a des effets à court et long terme, mais à deux conditions : les cultures ne doivent pas subir de stress hydriques importants pour que cette fertilisation soit rentabilisée, la biomasse de résidus ne doit pas être brûlée, mais recyclée pour la fertilité du sol (*in situ* ou *via* l'animal).

La combinaison des systèmes de culture innovants, des techniques d'aménagement des glacis, des méthodes de gestion de l'eau et des biomasses est incontournable, car ces techniques correspondent à différents objectifs de production et des fonctions écologiques complémentaires. On rejoint ici ROOSE (1994) et GILLER *et al.* (2009) qui considèrent que l'agriculture de conservation pour les exploitations familiales en zone tropicale n'est pas la solution universelle, mais peut avoir sa place dans certains espaces (dans les terroirs villageois) et dans des régions bien pourvues en services. Cette approche de la diversité des fonctions de l'agriculture, des pratiques, mais aussi des producteurs s'oppose à la diffusion d'un modèle technique passe-partout, tel que proposé par certains promoteurs de l'agriculture de conservation. Cette approche doit aussi intégrer le développement des innovations organisationnelles et ne pas se limiter à la technique.

Bibliographie

ABOU ABBA A., HOFES J. L., MERGEAI G., 2006 – Relever les défis environnementaux pour les filières cotonnières d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, 10 (4) : 351-359.

ANDRIARIMALALA J., RAKOTOZANDRINY J. D. N., ANDRIAMANDROSO A. L. H., PENOT E., NAUDIN K., DUGUÉ P., TILLARD E., DECRUYENAERE V., SALGADO P., 2013 – Creating synergies between conservation agriculture and cattle production in

crop-livestock farms: a study case in the lake Alaotra region of Madagascar. *Experimental agriculture*, 49 (3) : 352-365.

BALARABÉ O., DUGUÉ P., LIFRAN R., 2012 – Capital sol et innovation institutionnelle. *Économies et Sociétés*, Série « Systèmes agroalimentaires », AG, 34 (10-11) : 1927-1944.

BELCHI P., 2012 – *Évaluation des performances des systèmes de culture innovants et processus d'adoption des SCV dans les exploitations agricoles de l'extrême-nord du Cameroun. Cas du terroir de Sirilawé*. Projet Rime Pampa, Cirad, AgroParisTech, 134 p.

BOLI Z., ROOSE É., 1998 – Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. *Advances in Geocology*, 31 : 395-401.

DIACK M., SENE M., BADIANE A. N., DIATTA M., DICK R. P., 2000 – Decomposition of a native shrub, *Piliostigma reticulatum*, litter in soils of semiarid Senegal. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 4 : 3, 205-218.

DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 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., Ziebis M., Gan Y., Ellis W., Watson A., Sombatpanit S. (eds) : *No-till farming systems*, Special publication, 3, WASWC Beijing : 383-393.

DIEDHILOU S., DOSSA E. L., BADIANE A. N., DIEDHILOU I., SENE M., DICK R. P., 2009 – Decomposition and spatial microbial heterogeneity associated with native shrubs in soils of agroecosystems in semi-arid Senegal. *Pedobiologia*, 52 (4) : 273-286.

DONGMO A., VALL E., DUGUÉ P., NJOYA A., LOSSOUARN J., 2012 – Designing a process of co-management of crop residues for forage and soil conservation in Sudano-Sahel. *Journal of sustainable agriculture*, 36 (1) : 106-126.

DUGUÉ P., DJAMEN NANA P., FAURE G., LE GAL P.Y., 2015 – Dynamiques d'adoption de l'agriculture de conservation dans les exploitations familiales : de la technique aux processus d'innovation. *Cahiers Agricultures*, 24 (2) : 60-68.

DUGUÉ P., OLINA BASSALA J.-P., 2015 – Processus d'innovation et recomposition des territoires

agricoles : le cas du semis sous couvert végétal au nord du Cameroun. *Cahiers Agricultures*, 24 (2) : 93-101.

DOSSA E., BADIANE A., DIEDHILOU I., SÈNE M., DICK R., 2009 – Decomposition and spatial microbial heterogeneity associated with native shrubs in soils of agroecosystems in semi-arid Senegal. *Pedobiologia*, 52 (4) : 273-286.

FINDELING A., RUY S., SCOPEL E., 2003 – Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of hydrology*, 275 (1-2) : 49-66.

GILLER K. E., WITTER E., CORBEELS M., TITTONELL P., 2009 – Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. *Field crops research*, 114 (1) : 23-34.

KINTCHÉ K., GUIBERT H., SOGBÉDJI J., LÈVÊQUE J., TITTONELL P., 2010 – Carbon losses and primary productivity decline in savannah soils under cotton-cereal rotations in semiarid Togo. *Plant and Soil*, 336 (1-2) : 469-484.

LAHMAR R., BATIONO B. A., DAN LAMSO N., GUERO Y., TITTONELL P., 2012 – Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices for soil restoration. *Field crops research*, 132 : 158-167.

LOUPPE D., 1991 – *Guiera senegalensis*, espèce agroforestière. *Bois et Forêts des Tropiques*, 228 : 41-47.

NAUDIN K., GOZÉ E., BALARABÉ O., GILLER K. E., SCOPEL E., 2010 – Impact of no-tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: a multi-locational on-farm assessment. *Soil and tillage research*, 108 (1-2) : 68-76.

OLINA BASSALA J.-P., 2010 – *Le semis direct sans labour et avec utilisation des herbicides dans la zone cotonnière au Nord-Cameroun. Diffusion, impacts agronomiques et socio-économiques d'une innovation en pleine expansion*. Thèse doct., univ. du Mirail, Toulouse, 299 p.

OLINA BASSALA J.-P., DUGUÉ P., 2000 – « Utilisation des légumineuses pour l'amélioration des jachères de courte durée et la production de fourrage au Cameroun septentrional ». In Floret Ch., Pontanier R. (éd.) : *La jachère en Afrique tropicale : rôles, aménagement, alternatives*, Actes du séminaire international, Paris, John Libbey Eurotext : 561-568.

- OLINA BASSALA J.-P., M'BIANDOUN M., EKORONG J. A., ASFOM P., 2008** – Évolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier céréales au Nord-Cameroun : diagnostic et perspectives. *Tropicultura*, 26 (4) : 240-245.
- PARESIS L., 2010** – *Évaluation des impacts de l'adoption des systèmes de culture sur couverture végétale (SCV) sur le fonctionnement des exploitations en zone cotonnière de l'Extrême-Nord-Cameroun*. Mémoire d'ingénieur IRC, Montpellier SupAgro, 158 p.
- RAUNET M., NAUDIN K., BIED-CHARRETTON M., HUSSON O., SÉGUY L., 2006** – *Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)*. Montpellier, Agropolis international, 39 p. (Les dossiers thématiques : CSFD, 4).
- RÉTIF M., DUGUÉ P., FAURE G., 2009** – *Le semis direct sous couvert végétal dans les systèmes de production du Nord-Cameroun*. Document de travail projet Rime Pampa GT3, Istom, Cirad, Montpellier, 117 p.
- ROOSE É., 1981** – *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale : étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 130, 569 p.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la GCES. *Bull. des Sols*, FAO, Rome, 70, 420 p.
- SMEKTALA G., PELTIER R., SIBELET N., LEROY M., MANLAY R., NJITI C., NTOUPKA M., NJIEMOUN A., PALOU O., TAPSOU, 2005** – Parcs agroforestiers sahéliens : de la conservation à l'aménagement. *VertigO*, 6 (2) : 13.
- SOUTOU G., NAUDIN K., BALARABÉ O., ADOUM O., SCOPEL E., 2008** – Effet du semis sous couvert végétal sur l'infiltration, le ruissellement et simulation du bilan hydrique dans les systèmes de culture à base de coton au Nord-Cameroun. *Terre Malgache*, 26 : 177-179.
- VALLÉE G., M'BIANDOUN M., FOREST F., 1996** – Semis direct dans l'aménagement de Sanguéré-Djaling (Cameroun). *Cahiers Agricultures*, 5 (3) : 161-169.
- WEY J., DONGMO A., ABAKAR M., IBRAHIMA S., 2006** – *Simulation des effets du passage aux « Systèmes de culture sous couverture végétale » sur les transferts de biomasse à l'échelle des terroirs agropastoraux de Kilwo (Extrême-Nord) et Laindé Massa (Nord) au Cameroun*. Nord-Cameroun : Garoua Projet ESA et Irad, Montpellier, 69 p.
- WORTMANN C. S., ISABIRYE M., MUSA S., 1994** – *Crotalaria ochroleuca* as a green manure crop in Uganda. *African Crop Science Journal*, 2 (1).

Effets du *Mucuna* sur la production et la durabilité de systèmes de culture à base de maïs au Sud-Bénin

Bernard BARTHÈS

Anastase AZONTONDE

Christian FELLER

Introduction

La matière organique du sol (MOS) conditionne de nombreuses propriétés du sol et sa gestion est une composante essentielle de la durabilité des agrosystèmes. Par ailleurs, la MOS est un réservoir important de carbone (C), impliqué dans le cycle global de C et le changement climatique. Afin que les sols continuent à assurer leurs fonctions agronomiques et environnementales, les pratiques agricoles doivent donc assurer un niveau élevé de restitutions organiques au sol et contribuer à la séquestration du C. Dans les régions tropicales, la jachère naturelle a longtemps permis cette gestion patrimoniale des sols, spécialement de la MOS. Toutefois, pour avoir des effets significatifs, cette pratique doit se maintenir au moins cinq ans, ce qui devient difficile dans des contextes de densification démographique ; au Sud-Bénin, par exemple, la densité de la population dépasse 300 hab./km². Des pratiques alternatives de gestion de la MOS sont donc à rechercher ; parmi celles-ci, l'introduction de légumineuses de couverture semble prometteuse dans les régions relativement humides, d'autant plus que ce type de pratique a un intérêt marqué en matière de conservation des sols et des eaux, et également en matière de gestion des adventices (VOELKNER, 1979 ; RAUNET *et al.*, 1999 ; CARSKY *et al.*, 2001).

Un essai a été conduit pendant une dizaine d'années au Sud-Bénin pour évaluer l'effet de la légumineuse de couverture *Mucuna pruriens* var. *utilis* sur la fertilité et la conservation des sols, dans un système de cultures à base de maïs (AZONTONDE, 1993 ; AZONTONDE *et al.*, 1998). Les résultats synthétisés ici portent principalement sur le rendement en grain, C du sol, le ruissellement et l'érosion.

Matériels et méthodes

Le site

L'étude s'est déroulée à Agonkamey (06° 24' N, 02° 20' E), près de Cotonou, au sud du Bénin, dans une zone de plateaux bas dénommés Terres de Barre, portant des sols ferrallitiques sableux en surface devenant argilo-sableux vers 50 cm de profondeur (Typic Kandistult selon le Soil Survey Staff, 1994 ; Dystric Nitisol selon FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Le climat est tropical subhumide à deux saisons des pluies (mars-juillet et septembre-novembre), la pluviosité moyenne est de 1 200 mm.an⁻¹ et la température moyenne annuelle de 27 °C. La majorité des terres est cultivée en maïs (*Zea mays*), haricots (*Vigna* sp.), manioc (*Manihot esculenta*), arachide (*Arachis hyypogea*), souvent associés au palmier à huile (*Elaeis guineensis*).

Les parcelles expérimentales

L'étude a été conduite de 1988 à 1999 sur trois parcelles d'érosion de 30 m × 8 m, sur une pente de 4 %. Chaque parcelle, entourée de plaques métalliques à demi enterrées l'isolant hydrologiquement sur trois côtés, débouche à l'aval dans un collecteur drainant ruissellement et sédiments vers une première cuve de 3 m³ ; lorsque celle-ci est pleine, un partiteur achemine 10 % de l'excédent vers une seconde cuve de 3 m³ et élimine le reste.

Chaque parcelle d'érosion portait un traitement différent : culture pure traditionnelle de maïs sans apport (notée Trad) ; culture pure de maïs recevant une fertilisation minérale 76-30-30 (notée NPK) ; culture-relais de maïs et de la légumineuse de couverture *Mucuna pruriens* var. *utilis*, sans fertilisation minérale (notée Muc). Le maïs (var. DMR) était cultivé pendant la première saison des pluies. Sur la parcelle Muc, il était semé dans le mulch de *mucuna* de l'année précédente. *Mucuna* était semé un mois plus tard, se développant surtout après la récolte du maïs, notamment pendant la petite saison des pluies, durant laquelle les parcelles Trad et NPK étaient laissées en jachère naturelle. Dans tous les cas, le travail du sol était réalisé à la houe, à 5 cm de profondeur environ, et limité à l'emplacement des poquets.

Prélèvements de biomasse

Le rendement en grain du maïs a été mesuré au moment de la récolte de 1988 à 1996 sur quatre placettes de 1 m² chacune (soit six plants de maïs) réparties au hasard sur chaque parcelle. La biomasse aérienne de maïs et *mucuna* a été déterminée chaque année sur cinq répétitions par parcelle, couvrant chacune 1 m × 1 m, à la récolte du maïs en août et au moment de la croissance maximale de *mucuna* en octobre. En 1995, selon le même schéma, les racines de maïs et *mucuna* ont été prélevées à 0-10, 10-20 et 20-40 cm de profondeur, puis triées à la main. Le ratio entre biomasse racinaire et biomasse aérienne calculé en 1995 a été utilisé pour estimer chaque année la biomasse racinaire d'après la biomasse aérienne mesurée. L'échantillonnage de la biomasse adventice aérienne a été réalisé en novembre 1999 sur neuf répétitions par parcelle, couvrant chacune 0,25 m × 0,25 m. La litière a été échantillonnée en même temps. La biomasse racinaire a également été échantillonnée en novembre 1999 sur six monolithes de sol par parcelle, de même surface et sur 30 cm de profondeur, par tri manuel ; compte tenu de la végétation présente à cette saison, on a considéré que les racines collectées sur les parcelles Trad et NPK étaient celles d'adventices, et que celles collectées sur Muc provenaient de *mucuna*. Tous les échantillons végétaux ont été séchés à 70 °C, pesés puis finement broyés. La teneur en carbone (C) des végétaux a été déterminée par combustion sèche avec un analyseur élémentaire CHN.

Prélèvements et analyses de sol

Des échantillons non remaniés de sol ont été prélevés sur fosses : en mars, juin, août et octobre 1988 et 1995, à 18 emplacements par parcelle, 0-10, 10-20 et 20-40 cm de profondeur, en utilisant des cylindres de 0,2 dm³ ; en novembre 1999, à trois emplacements par parcelle, à 0-10 et 10-20 cm de profondeur avec deux répétitions par fosse et à 20-30, 30-40 et 50-60 cm en une seule répétition par fosse, à l'aide de cylindres de 0,5 dm³. Des échantillons de sol ont été prélevés simultanément sur les parois des fosses. La densité apparente du sol a été déterminée par pesée après séchage à 105 °C des échantillons prélevés au cylindre. Les autres échantillons ont été séchés à l'air, concassés avec modération, tamisés à 2 mm, puis broyés finement (< 0,2 mm).

La teneur en C organique des échantillons de sol prélevés en 1988 et 1995 a été déterminée par la méthode de Walkley et Black. La teneur en C total des échantillons prélevés en 1999 a été déterminée par combustion sèche avec un analyseur CHN ; en l'absence de carbonates, on considère que tout C est organique. L'analyse d'une soixantaine d'échantillons avec les deux types de procédure (Walkley et Black vs. CHN) a permis de calculer une relation de passage entre elles, puis d'exprimer toutes les teneurs sur une « base CHN ». Le stock de C du sol a été mesuré comme le produit de la teneur en C, de la densité apparente (masse volumique) et du volume, à profondeur équivalente et à masse équivalente (ELLERT et BETTANY, 1995).

Mesures de ruissellement et de pertes en terre

Ruissellement et érosion ont été déterminés de 1993 à 1997, après chaque pluie ou séquence de pluies. Le ruissellement était évalué en additionnant le contenu de la première cuve et le décuple de celui de la seconde. Ce volume était converti en hauteur de ruissellement en le divisant par la surface de la parcelle. Les taux de ruissellement annuel et quinquennal (en %) ont été calculés comme le rapport de la somme des hauteurs de ruissellement sur la somme des hauteurs de pluie sur une année et sur cinq années, respectivement.

Les sédiments grossiers, prélevés au fond de la première cuve, étaient pesés humides et leur poids sec déterminé en séchant des aliquotes. Le poids sec des sédiments en suspension était déterminé sur des aliquotes floculées de suspensions prélevées dans les deux cuves. L'érosion annuelle (en $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) a été calculée en sommant sédiments grossiers et en suspension sur une année ; l'érosion annuelle moyenne a été calculée sur cinq années.

Estimation de l'érosion du carbone

L'érosion du carbone pour chaque année ($\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) a été calculée comme le produit des pertes en terre annuelles et de la teneur en C des sédiments. La teneur en C des sédiments a été estimée comme le produit de la teneur en C du sol (couche 0-10 cm, pour l'année considérée) et d'un coefficient d'enrichissement en C des sédiments (STARR *et al.*, 2000). La teneur en C du sol à 0-10 cm pour chaque année a été calculée par interpolation linéaire à partir des analyses réalisées en 1988, 1995 et 1999. Le coefficient d'enrichissement en C des sédiments, défini comme le rapport entre les teneurs en C des sédiments et de la couche de sol 0-10 cm, a été estimé à partir de la synthèse bibliographique de ROOSE et BARTHÈS (2006) :

- pour deux sols à texture légère sous culture fertilisée de maïs respectivement ferrallitiques et ferrugineux, dans le sud et le nord de la Côte d'Ivoire, sous 2 100 et 1 350 mm de pluviosité annuelle, sur une pente de 7 % et 3 %, des coefficients d'enrichissement en C de 1,9 et 1,4 ont été mesurés en parcelles d'érosion ; un coefficient d'enrichissement de 1,6 a donc été estimé pour les parcelles Trad et NPK du Bénin ;

- en l'absence de références sur les systèmes à plante de couverture, on a considéré pour la parcelle Muc un coefficient d'enrichissement en C des sédiments de 3, qui est la moyenne de coefficients mesurés en parcelles d'érosion avec des couverts végétaux relativement comparables : pour deux sols ferrugineux à texture légère sous savane arbustive du nord de la Côte d'Ivoire, respectivement sous 1 200 et 1 350 mm de pluviosité annuelle, sur 4 % et 3 % de pente, des coefficients d'enrichissement de 2,6 et 3,4 ont été mesurés ; pour un sol ferrallitique sableux sous bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire, sous 1 800 mm de pluviosité annuelle et sur 14 % de pente, un coefficient d'enrichissement de 3 a été mesuré.

La teneur en C soluble dans les eaux de ruissellement n'a pas été prise en considération.

Analyses statistiques

La significativité des différences de rendements en grain du maïs, de teneurs et de stocks moyens de C entre traitements a été évaluée avec un test *t* non apparié de Student. La significativité des différences de ruissellement, de pertes en terre et d'érosion du C entre traitements a été évaluée par un test *t* apparié de Student. Dans les deux cas, aucune hypothèse n'a été faite sur la normalité des distributions et l'égalité des variances (DAGNÉLIE, 1975).

Résultats et discussion

Rendement en grain, carbone restitué au sol et carbone du sol

Le rendement en grain du maïs ne différait pas significativement entre traitements en 1988, et était de 0,5 Mg.ha⁻¹. Pour le traitement Trad, il a diminué régulièrement jusqu'à atteindre 0,2 Mg.ha⁻¹ en 1996. Pour le traitement NPK, le rendement a augmenté à peu près régulièrement, jusqu'à 2,5 Mg.ha⁻¹ en 1996. Pour le traitement Muc, le rendement en grain a également augmenté régulièrement, jusqu'à 3,5 Mg.ha⁻¹ en 1996. Sauf la première année, les rendements en grain diffèrent significativement entre traitements. L'effet de la légumineuse de couverture sur le rendement en grain du maïs est donc spectaculaire, et plus marqué que celui de la fertilisation minérale.

Pour les traitements Trad, NPK et Muc, les restitutions totales au sol ont atteint 3,5, 6,4 et 10,0 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ en moyenne, dont 61, 26 et 16 % sous forme racinaire, respectivement ; le maïs représentait 28, 75 et 51 % de C restitué, respectivement, le reste étant constitué par *mucuna* sur Muc et par les adventices sur Trad et NPK (fig. 1). Le système à légumineuse de couverture comporte donc de fortes restitutions aux sols, par la légumineuse elle-même, mais également par le maïs, dont la biomasse augmente fortement du fait notamment de l'azote apporté par la légumineuse (AZONTONDE *et al.*, 1998). Dans les systèmes Trad et NPK, les adventices connaissent un fort développement durant la petite saison des pluies, après la récolte du maïs.

La concentration en C du sol différait peu entre parcelles en 1988, mais est devenue contrastée en 1999, du fait de faibles variations temporelles sur Trad (- 8 % à 0-20 cm) et NPK (+ 3 %), mais d'une forte augmentation sur Muc (+ 90 %). En 1999, le stock de C dans la couche de sol ayant la même masse que la couche 0-40 cm initiale (donc à masse équivalente) était d'environ 24, 29 et 43 tC.ha⁻¹ sur Trad, NPK et Muc, soit des variations entre 1988 et 1999 d'environ - 2, + 2 et + 15 MgC.ha⁻¹, et des

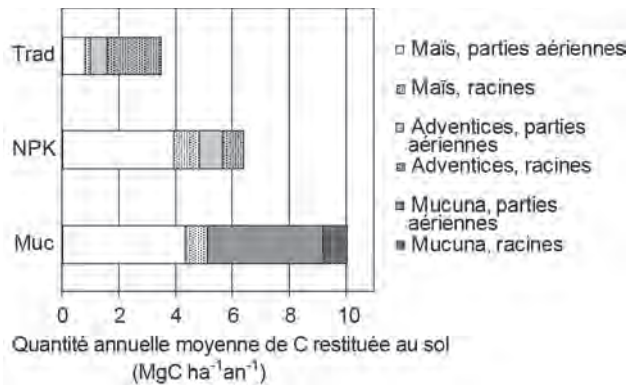


Figure 1
Restitutions moyennes de carbone au sol pour les trois traitements.

Tableau 1
Teneurs en argile et en carbone, et stock de carbone du sol en 1988 et 1999
(moyenne $\pm$ écart type quand il est disponible).

	Profondeur (cm)	Trad		NPK		Muc	
		1988	1999	1988	1999	1988	1999
Argile (g.100 g ⁻¹)	0-10	14,7 $\pm$ 0,1	21,6	11,1 $\pm$ 0,6	12,8	12,7 $\pm$ 0,6	13,6
	10-20	nd	33,9	nd	19,8	nd	17,9
C (g.kg ⁻¹)	0-10	5,5 $\pm$ 0,2	5,3 $\pm$ 0,1	5,4 $\pm$ 0,1	6,7 $\pm$ 1,8	5,2 $\pm$ 0,1	11,5 $\pm$ 2,0
	10-20	4,6 $\pm$ 0,3	4,0 $\pm$ 0,7	4,8 $\pm$ 0,4	3,8 $\pm$ 1,2	4,8 $\pm$ 0,4	7,3 $\pm$ 0,9
	20-30 ^a	4,1 $\pm$ 0,2	3,5 $\pm$ 0,5	4,0 $\pm$ 0,4	3,6 $\pm$ 1,1	4,6 $\pm$ 0,3	4,4 $\pm$ 0,1
	30-40 ^a		3,2 $\pm$ 0,1		4,1 $\pm$ 0,7		4,2 $\pm$ 0,2
	50-60	nd	2,4 $\pm$ 0,1	nd	3,5 $\pm$ 1,8	nd	3,3 $\pm$ 0,5
Stock de C à profondeur Equivalente (MgC.ha ⁻¹)	0-10	7,7 $\pm$ 0,7	8,4 $\pm$ 0,3	7,3 $\pm$ 0,5	10,6 $\pm$ 3,4	6,8 $\pm$ 0,3	17,4 $\pm$ 3,3
	0-20	13,6 $\pm$ 0,9	14,5 $\pm$ 0,4	14,6 $\pm$ 1,0	17,0 $\pm$ 3,9	13,8 $\pm$ 0,8	28,7 $\pm$ 3,9
	0-40	25,9 $\pm$ 1,5	24,2 $\pm$ 0,5	27,0 $\pm$ 1,8	28,8 $\pm$ 5,7	27,7 $\pm$ 1,7	41,4 $\pm$ 4,9
	0-60	nd	32,0 $\pm$ 0,3	nd	39,7 $\pm$ 3,6	nd	51,7 $\pm$ 4,1
Stock de C à masse Equivalente (MgC.ha ⁻¹)	0-10 ^b	7,7 $\pm$ 0,7	8,1 $\pm$ 0,3	7,3 $\pm$ 0,5	9,7 $\pm$ 3,1	6,8 $\pm$ 0,3	15,6 $\pm$ 2,9
	0-20 ^b	13,6 $\pm$ 0,9	13,4 $\pm$ 0,2	14,6 $\pm$ 1,0	16,4 $\pm$ 4,0	13,8 $\pm$ 0,8	27,7 $\pm$ 3,9
	0-40 ^b	25,9 $\pm$ 1,5	23,9 $\pm$ 0,5	27,0 $\pm$ 1,8	29,0 $\pm$ 6,0	27,7 $\pm$ 1,7	42,5 $\pm$ 5,0

nd : non déterminé ; a 20-40 cm en 1988 ; b niveaux de profondeur en 1988, à masse équivalente ils correspondaient en 1999 aux niveaux de profondeur 0-9, 0-17 et 0-36 cm sur Trad, 0-9, 0-18 et 0-37 cm sur NPK, et 0-9, 0-18 et 0-39 cm sur Muc.

variations annuelles moyennes de - 0,2, + 0,2 et + 1,3 MgC.ha⁻¹.an⁻¹, respectivement (tabl. 1). L'association avec la légumineuse de couverture s'accompagne donc d'un important enrichissement du sol en C, du fait notamment des importantes restitutions organiques au sol.

Des évolutions comparables ont été relevées pour la teneur en azote total du sol, la capacité d'échange cationique et la somme des bases échangeables ; le pH eau diminue avec tous les traitements, faiblement pour Muc (- 0,1), sensiblement pour NPK (- 0,5), nettement pour Trad (- 1 environ ; AZONTONDE *et al.*, 1998).

Les données sur les stocks de C du sol sont comparables à celles rapportées pour d'autres sites sur Terres de Barre au Sud-Bénin, pour la couche de sol 0-35 cm (DJEGUI *et al.*, 1992) : 27 MgC.ha⁻¹ sous plantation de palmier à huile, 30 MgC.ha⁻¹ sous cultures vivrières (avec jachère), et 48 MgC.ha⁻¹ sous forêt. Les données d'évolution temporelles du stock de C du sol sont également comparables à ce qui a été rapporté dans des sols à texture légère : + 0,2 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-10 cm pour un Alfisol du sud-ouest du Nigeria sous maïs fertilisé (LAL, 2000) contre + 0,3 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ pour NPK ici ; environ 1 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-20 cm pour des Oxisols et des Ultisols du Brésil sous semis direct (BAYER *et al.*, 2001 ; SÁ *et al.*, 2001) contre 1,4 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ pour Muc ici ; plus de 2 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-20 cm après deux années de couverture de *Pueraria* sp. sur un Alfisol du Nigeria (LAL, 1998).

Les résultats rapportés ici et ceux de la littérature établissent donc clairement que le mulch des résidus de culture ou des légumineuses de couverture permet un fort enrichissement du sol en C.

Ruissellement et érosion

De 1993 à 1997, la pluviosité a varié entre 1 000 et 1 558 mm.an⁻¹ (moyenne 1 200 mm/an). Sur les parcelles Trad, NPK et Muc, respectivement, le taux de ruissellement annuel moyen est de 28, 12 et 8 % ; l'érosion annuelle moyenne est de 34,0, 9,3 et 2,9 t/ha/an, et C érodé de 292, 93 et 82 t/ha/an (tabl. 2). Le ruissellement et l'érosion annuels moyens sont significativement plus élevés sur Trad que sur NPK, et sur NPK que sur Muc ; C érodé est significativement plus élevé sur Trad que sur NPK et Muc ($p < 0,01$).

Les pertes de C par érosion sont du même ordre de grandeur que la variation du stock de C du sol à 0-40 cm pour Trad (0,2 vs - 0,2 t C/ha/an) et pour NPK (0,1 vs + 0,2 t/ha/an) ; en revanche, C érodé est négligeable devant la variation de stock de C du sol (0-40 cm) sur Muc (0,1 vs + 1,3 t C/ha/an).

Mucuna constitue un mulch épais ; ce type de couvert protège mécaniquement la surface du sol contre la désagrégation par les gouttes de pluie, ce qui favorise l'infiltration donc défavorise le ruissellement (WISCHMEIER et SMITH, 1978) ; de plus, ce mulch ralentit le ruissellement, donc diminue sa capacité à détacher et transporter des particules ; il peut également piéger les particules transportées par le ruissellement, donc diminuer sa charge solide. La couverture du sol

Tableau 2
Ruissellement, pertes en terre et carbone érodé chaque année.

Année	Pluie (mm)	Ruissellement (%)			Pertes en terre (t/ha/an)			Carbone érodé (t C/ha/an)		
		Trad	NPK	Muc	Trad	NPK	Muc	Trad	NPK	Muc
1993	1 288	30	13	9	41,5	9,8	3,1	359	94	75
1994	1 027	20	10	6	31,2	8,2	2,2	269	80	57
1995	1 000	16	8	4	10,6	3,8	1,3	91	38	36
1996	1 126	25	12	8	40,4	8,9	2,5	346	90	73
1997	1 558	40	15	11	46,3	15,6	5,5	395	161	171
Moyenne	1 200	28	12	8	34,0	9,3	2,9	292	93	82
Écart type	230	9	3	3	14,2	4,2	1,6	121	44	52

par *mucuna* semble donc la principale raison de ruissellements et pertes en terre plus faibles pour Muc que pour NPK et Trad. De la même manière mais dans une moindre mesure, les ruissellements et pertes en terre plus faibles pour NPK que pour Trad s'expliquent probablement par la plus grande couverture du sol pour NPK, du fait d'une production végétale et de restitutions organiques plus importantes en cas d'apport de fertilisants minéraux. Par ailleurs, les restitutions organiques enrichissent le sol en matière organique, dont le rôle agrégeant est bien connu (FELLER *et al.*, 1996) ; le mulch de *mucuna* contribue donc à limiter le détachement de particules facilement transportables, et par suite, à limiter la fermeture de la porosité de surface, donc le ruissellement et l'érosion (LE BISSONNAIS, 1996). De ce fait, l'importance des restitutions organiques et la richesse du sol en matière organique expliquent également les ruissellements et pertes en terre plus faibles pour Muc que pour NPK et pour NPK que pour Trad.

La comparaison avec des résultats de la littérature concernant des parcelles d'érosion sous culture de maïs (ou sorgho) en milieu tropical montre les points suivants (tabl. 3) :

- le taux de ruissellement annuel moyen est important (> 25 %) sur Trad et dans les zones les plus humides (2 100 mm/an) ; il est faible (< 10 %) sur sol argileux en pente forte (Kenya) et sur Muc ;
- les pertes en terre annuelles moyennes sont importantes (> 20 t/ha/an) dans les milieux humides ou semi-arides (500 mm/an) et dans les systèmes non fertilisés ; elles sont faibles (< 5 t/ha/an) sur Muc. Ainsi, ruissellement et pertes en terre tendent à augmenter avec la pluviosité et la dénudation du sol (en particulier en l'absence de fertilisation ou en conditions arides), ce qui est conforme aux observations usuellement rapportées (WISCHMEIER et SMITH, 1978 ; ROOSE, 1994).

Tableau 3

Comparaison des moyennes annuelles du taux de ruissellement, des pertes en terre et de l'érosion du carbone sur des parcelles d'érosion cultivées en maïs (ou sorgho) en milieu tropical.

Pays	Pluviosité annuelle (mm/an)	Pente (%)	Type de sol	Stock de C à 0-30 cm (t C/ha)	Taux de ruissellement (%)	Pertes en terre (t/ha/an)	Carbone érodé (t/ha/an)	Références
Maïs non fertilisé								
Kenya	1 000	30	Alfisol argileux	80	2	29,0	2,4	GACHENE <i>et al.</i> (1997)
Bénin	1 200	4	Ultisol sablo-argileux	20	28	34,0	0,3	Ce chapitre
Maïs (ou sorgho) fertilisé								
Côte d'Ivoire	2 100	7	Ultisol sablo-argileux	34	27	89,4	1,8	ROOSE et BARTHÈS (2006)
Kenya	1 000	30	Alfisol argileux	80	1	8,4	0,7	GACHENE <i>et al.</i> (1997)
Burkina Faso	800	1	Alfisol sableux	13	25	7,3	0,2	ROOSE et BARTHÈS (2006)
Zimbabwe	500	5	Alfisol sableux	15 ?	17	20,6	0,2	MOYO (1998)
Côte d'Ivoire	1 350	3	Oxisol sablo-graveleux	21	20	5,5	0,1	ROOSE et BARTHÈS (2006)
Bénin	1 200	4	Ultisol sablo-argileux	22	12	9,3	0,1	Ce chapitre
Maïs-mucuna								
Bénin	1 200	4	Ultisol sablo-argileux	35	8	2,9	0,1	Ce chapitre

Ruissellement et érosion varient souvent de manière conjointe (les fortes érosions résultent de forts ruissellements). Toutefois, au Kenya, sur culture de maïs non fertilisée, des pertes en terre élevées ($29 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) sont observées en même temps qu'un faible ruissellement (2 % ; GACHENE *et al.*, 1997) ; le sol considéré, argileux et riche en matière organique, est certainement bien agrégé, et sur forte pente (30 %) peu couverte, l'érosion y concerne probablement des agrégats stables, et est donc non sélective (par opposition au schéma plus fréquent de particules fines issues de la désagrégation, colmatant la porosité donc générant du ruissellement, puis étant transportées par ce ruissellement donc produisant l'érosion).

Trois fois plus de C est érodé sur Trad que sur NPK et Muc. De plus, malgré des pertes en terre trois fois plus importantes sur NPK que sur Muc, C érodé y est équivalent, parce que le sol superficiel, pourvoyeur de sédiments, est beaucoup

plus riche en matière organique sur Muc, et que les sédiments y sont relativement enrichis en C. En effet, l'enrichissement relatif des sédiments en C augmente quand les pertes en terre diminuent (ROOSE et BARTHÈS, 2006). Ainsi, le mulch de *mucuna* est moins efficace pour réduire l'érosion de C que pour réduire le ruissellement et l'érosion, néanmoins il est très efficace pour réduire la proportion de C du sol érodé, beaucoup plus faible sur Muc que sur Trad et NPK.

Conclusions

Les résultats présentés montrent que *mucuna* constitue un mulch épais dont la décomposition enrichit fortement le sol en matière organique et en azote, ce qui permet une forte production agricole, mais contribue également à la stabilité structurale du sol ; cette stabilité favorise l'infiltration au détriment du ruissellement, et ce moindre ruissellement détermine une moindre érosion. Le mulch a aussi des effets mécaniques : il protège le sol contre l'impact désagrégeant des gouttes de pluie, ce qui favorise l'infiltration ; il ralentit le ruissellement, donc diminue sa capacité à détacher et transporter des particules ; il peut également piéger les particules transportées par le ruissellement, donc diminuer sa charge solide. L'association avec *mucuna* permet donc de conjuguer des objectifs de production ambitieux (rendement en maïs élevé) et d'améliorer les services écosystémiques rendus par les sols agricoles (conservation des eaux et des sols, séquestration de carbone).

Bibliographie

AZONTONDE A., 1993 – Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 : 217-226.

AZONTONDE A., FELLER C., GANRY F., RÉMY J. C., 1998 – Le *mucuna* et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. *Agriculture et Développement*, 18 : 55-62.

BAYER C., MARTIN-NETO L., MIELNICZUK J., PILLON C. N., SANGOI L., 2001 – Changes in organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 65 : 1473-1478.

CARSKY R. J., BECKER M., HAUSER S., 2001 – « *Mucuna* cover crop fallow systems: potential and limitations ». In Tian G., Ishida F., Keatinge D. (eds) : *Sustaining Soil Fertility in West Africa*, Soil Science Society of America Special Publication, 58, Madison, WI, USA : 111-135.

DAGNÉLIE P., 1975 – *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques*, 2^e édition. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique.

DJEGUI N., DE BOISSEZON P., GAVINELLI E., 1992 – Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de culture. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 27 : 5-22.

- ELLERT B. H., BETTANY J. R., 1995** – Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian J. of Soil Sci.*, 75 : 529-538.
- FAO-ISRIC-ISSS, 1998** – *World Reference Base for Soil Resources*. Rome, FAO.
- FELLER C., ALBRECHT A., TESSIER D., 1996** – « Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils ». In Carter M. R., Stewart B. A (eds) : *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA : 309-359.
- GACHENE C. K. K., JARVIS N. J., LINNEN H., MBUVI J. P., 1997** – Soil erosion effects on soil properties in a highland area of Central Kenya. *Soil Science Soc. of America J.*, 61 : 559-564.
- LAL R., 1998** – « Land use and soil management effects on soil organic matter dynamics on Alfisols in western Nigeria ». In Lal R., Kimble J. M., Follett R. F., Stewart B. A. (eds) : *Soil Processes and the Carbon Cycle*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA : 109-126.
- LAL R., 2000** – « Land use and cropping systems effects on restoring soil carbon pools of degraded Alfisols in Western Nigeria ». In Lal R., Kimble J. M., Stewart B. A. (eds) : *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA : 157-165.
- LE BISSONNAIS Y., 1996** – Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. 1. Theory and methodology. *European J. of Soil Sci.*, 47 : 425-437.
- MOYO A., 1998** – The effect of soil erosion on soil productivity as influenced by tillage with special reference to clay and organic matter losses. *Advances in GeoEcology*, 31 : 363-368.
- RAUNET M., SÉGUY L., FOVET-RABOT C., 1999** – « Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept ». In Rasolo F., Raunet M. (éd.) : *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*, Montpellier, Cirad : 41-52.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO*, 70, Rome, 420 p.
- ROOSE É., BARTHÈS B., 2006** – « Soil carbon and its selectivity at the plot scale in tropical and mediterranean regions ». In Roose É. J., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil Erosion and Carbon Dynamics, Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Floride : 55-72.
- SÁ J. C. M., CERRI C. C., DICK W. A., LAL R., VENSKE FILHO S. P., PICCOLO M. C., FEIGL B. E., 2001** – Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 65 : 1486-1499.
- SOIL SURVEY STAFF, 1994** – *Keys to Soil Taxonomy*, 6th edition. USDA – Soil Conservation Service, Washington, DC, USA.
- STARR G. C., LAL R., MALONE R., HOTHEM D., OWENS L., KIMBLE J., 2000** – Modelling soil carbon transported by water erosion processes. *Land Degradation and Development*, 11 : 83-91.
- VOELKNER H., 1979** – Urgent needed: an ideal green mulch crop for the tropics. *World Crops*, 31 : 76-77.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1978** – *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Erosion Planning*. USDA, Washington, DC, USA.

Restauration des terres de parcours dans les monts de Beni Chougrane (NO Algérie) par la mise en défens et l'enrichissement en légumineuses

Boutkhil MORSLI

Abdelkrim HAMOUDI

Problématique

Les terres de parcours (versants pentus, terres issues de forêts dégradées, terrains jadis cultivés mais appauvris, jachères qui constituent 40 % de la SAU) occupent des surfaces importantes dans les zones de montagne de l'Atlas tellien, lequel couvre plus de 7,5 millions d'hectares. La densité de population (100 à 300 hab./km²) y est relativement élevée à certains endroits, tandis que le niveau de développement rural est resté faible (MORSLI *et al.*, 1988). L'agriculture et l'élevage, principales activités de ces zones, exercent une pression très forte sur les ressources naturelles. Les conséquences de cette pression sont la dégradation du couvert végétal, l'épuisement de l'humus, puis le tassement du sol et l'accélération du ruissellement et de l'érosion du sol (BNEDER, 1982).

Ces parcours dégradés sont caractérisés par une végétation très clairsemée et un envahissement de plantes épineuses, peu appréciées ou non consommées par les animaux. L'élevage extensif, composante essentielle des activités agricoles, s'appuie sur les ressources fourragères de ces parcours, souvent dégradés et incapables de satisfaire les besoins des animaux, en particulier pendant les

périodes de sécheresse (ARBOUCHE, 1995). La dégradation des sols et la disparition progressive du couvert végétal sur ces parcours sont attribuées aux conditions climatiques (réurrence de sécheresses) et surtout au défrichement, au surpâturage et au piétinement des bêtes. De nombreux travaux ont été réalisés sur les parcours des steppes algériennes, mais très peu sur les parcours de l'Atlas tellien (NEDJRAOUI, 2003).

La restauration des terrains de parcours pose un problème d'actualité préoccupant aussi bien pour l'État que pour les aménagistes et les chercheurs. Le contrôle de cette dégradation requiert des aménagements qui favorisent la restauration des couvertures pédologiques et végétales. Les principaux aménagements des parcours utilisés dans les pays du Maghreb sont la mise en défens, le réensemencement, la plantation d'espèces enrichissantes, l'amendement des sols, les travaux mécaniques, les prairies permanentes et le contrôle de l'état des parcours. Ce travail a pour objectif de tester l'effet de la mise en défens, du réensemencement et des plantations fourragères sur la restauration des couvertures végétales et pédologiques de parcours de l'Atlas tellien.

Méthodologie

Les monts de Beni-Chougrane se situent dans le Nord-Ouest algérien. Ils sont l'un des principaux chaînons du tell occidental, avec une superficie de 2 860 km² (BNEDER, 1982). Ces montagnes à vocation agropastorale disposent de ressources en parcours importantes. L'élevage extensif, composante essentielle de l'activité agricole, constitue une soupape de sécurité pour équilibrer le budget familial. Il s'appuie sur différentes ressources fourragères : les parcours des espaces de collines, les jachères et la forêt. Cette activité très ancienne, qui occupe une bonne place dans la vie économique de la population, semble un élément déterminant de la dégradation de la couverture végétale. Situés dans un milieu fragile (relief accidenté, climat méditerranéen, lithologie tendre et modes d'utilisation des terres inadéquats) profondément perturbé par des utilisations multiples, les parcours se trouvent confrontés à de mauvaises conditions pédoclimatiques (sécheresses prolongées entraînant la dégradation des couvertures végétales et pédologiques) et surtout à la forte pression anthropique (MORSILI, 1996).

Le surpâturage entraîne la réduction du couvert végétal, le tassement de la surface du sol et par conséquent, le ruissellement et l'érosion. La diminution du taux de couverture végétale et des espèces fourragères laisse la place à des espèces non appréciées telles que les espèces épineuses ou toxiques. L'appauvrissement des sols et l'amplification de l'érosion constituent des indices caractéristiques de la dégradation de ces zones de parcours. Dans les parcours dégradés, l'horizon organique supérieur du sol est appauvri ou décapé ; on assiste à un assèchement du milieu et à une grande vulnérabilité des sols à

l'érosion. Ces situations nécessitent une intervention pour la restauration simultanée des couvertures végétales et pédologiques.

Dans la zone de montagne de Beni-Chougrane nous avons mené trois types d'expérimentation dans des parcours dégradés.

La mise en défens

Deux parcelles de parcours ont été mises en défens, protégées et clôturées, sans autre intervention. À côté de chaque parcelle mise en défens, nous avons installé une parcelle sans clôture ; libre au pâturage (parcelle pâturée). Le dispositif expérimental est constitué de parcelles d'érosion de 100 m² (20 x 5 m). Ces parcelles de 100 m² ont été suivies pendant 3 à 6 ans. Les paramètres qui ont été notés sont le taux de couverture, la biomasse, la biodiversité, la litière, le carbone organique du sol, les éléments nutritifs, l'infiltration, le ruissellement et l'érosion.

Le ruissellement et les pertes en terre ont été mesurés après chaque pluie, à l'aide de cuves installées en aval de chaque parcelle. Les pertes en terre englobent les matières en suspension (MES) et les sédiments lourds. La précision des mesures est de l'ordre de 10 % pour la détermination de l'érosion. Pour étudier la dynamique de la fertilité des sols, les stocks de carbone organique ont été calculés sur la base de densités apparentes (prélèvement au cylindre avec trois répétitions) et des analyses d'échantillons de sol prélevés (huit échantillons ont été prélevés pour chaque parcelle pour les 10, 30 et 45 premiers centimètres du sol). Les prélèvements ont été effectués en fin d'été (septembre). Pour connaître les pertes de carbone organique par érosion, des prélèvements sur les terres fines érodées et sur les matières en suspension (MES) ont été effectués. Le carbone organique des terres érodées analysé regroupe celui des éléments fins de la fosse à sédiments et des suspensions (MES) dans les cuves. La détermination du carbone organique est faite par la méthode de Anne.

Pour comparer les résultats obtenus sur ces parcelles et pour analyser les facteurs conditionnels du ruissellement et de l'érosion, plusieurs campagnes de simulation de pluies ont été effectuées sur différents états de surface et à différentes époques. Toutes les mesures ont été effectuées sur des micro-parcelles de 1 m² dont le gradient de pente est identique et sous une même intensité (30 mm/h) de pluies.

Les méthodes utilisées pour la détermination de l'azote total (N) et du phosphore assimilable (P) sont respectivement la méthode de Kjeldal et la méthode Olsen.

L'ensemencement

Des essais sur treize espèces fourragères ont été menés dans les zones de parcours. Le dispositif expérimental est composé de planches et de parcelles de 100 m². Deux zones ont été choisies pour l'expérimentation : la zone de Bou Hanifia et d'Ain Farès qui se situent dans les monts de Beni-Chougrane.

Le système de planches est un bloc aléatoire complet à 3 répétitions. Au niveau de chaque bloc, deux à trois planches sont réservées à chaque espèce

expérimentée (planche de 8 mètres de long et de 4 m de large). Dans certaines planches, des mélanges de graminées et de légumineuses (*Medicago borung/Lolium victoria*) ont été expérimentés (un mélange de graminées et de légumineuses est indispensable pour assurer une alimentation équilibrée du bétail). Le semis a été effectué à la volée et à des densités différentes dans le but d'adopter pour chaque espèce, une densité qui lui permettra d'obtenir une biomasse importante. Les paramètres notés sont la date de levée, la hauteur de végétation, la date de floraison, le taux de couverture et la biomasse.

Des ensemencements de *Medicago snail* (plante annuelle) et *Hedysarum pallidum* (légumineuse pluriannuelle) ont été réalisés aussi sur des parcelles de 100 m² pour évaluer l'effet de ces aménagements sur le risque d'érosion.

La plantation de légumineuses fourragères

L'espèce pérenne testée est la luzerne arborescente (*Medicago arborea*). Cette espèce semble intéressante sur l'amélioration de la productivité et la restauration du sol. Les paramètres notés sont la hauteur de végétation, la date de floraison, le taux de couverture et la biomasse produite. Les dispositifs expérimentaux pour ces plantations sont constitués de parcelles d'érosion de 100 m².

Toutes les expérimentations ont été effectuées sur deux types de sol les plus représentatifs des monts de l'Ouest algérien, un sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire vertique sur marne et un sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire à encroûtement calcaire de texture limoneuse.

Résultats et discussion

Effets de la mise en défens des parcours (végétation naturelle)

Restauration des sols et réduction de l'érosion

Les terrains de pâture en végétation naturelle présentent un coefficient de ruissellement annuel moyen faible (Kram de 2 à 7 % des pluies). Cependant, le ruissellement maximal lors des grosses averses (Kr max) a dépassé 25 % et peut atteindre 60 % sur les sols fermés et/ou tassés. Ces terrains de parcours dégradés peuvent être la source de beaucoup de ruissellement et à l'origine de ravines dans les terres cultivées situées en aval. Le suivi des parcelles expérimentales et les essais de simulations de pluies effectuées au cours de différentes campagnes (automne, hiver et printemps) ont montré une différenciation de comportement à l'échelle de l'année (fig. 1). Cette différenciation dépend de la dynamique de la couverture du sol et des états de surfaces (MORSLI *et al.*, 2012).

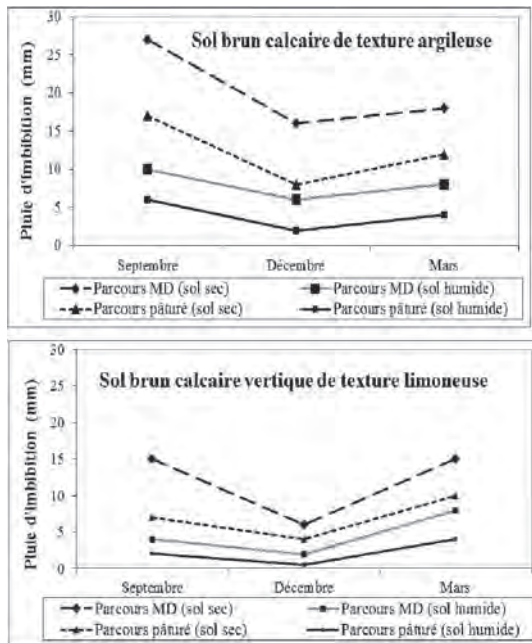


Figure 1

Seuils de déclenchement du ruissellement (P_i = pluie d'imbibition en mm) sur les parcours pâturés ou mis en défens à l'échelle de l'année.

En été et au début de l'automne, les terrains de parcours pâturés, peu pourvus de couvert végétal, durcissent et se compactent. Sur les terrains marneux, les fentes de dessiccation favorisent l'infiltration en début de pluie, mais suite à l'imbibition et à la dégradation de la surface du sol par les pluies d'automne souvent agressives, le sol se colmate facilitant ainsi le déclenchement du ruissellement. Sur les parcours pâturés (sols limoneux), les pluies d'imbibition (P_i), déjà très basses, sont passées de 7 (sur sol sec) à 2 mm seulement sur sol humide. Par contre, les parcours mis en défens présentent une infiltration relativement élevée de telle sorte que les pluies d'imbibition sont toujours plus élevées sur les parcelles améliorées. Les pluies d'automne, souvent agressives, permettent d'engendrer des coefficients de ruissellement très élevés et des ravinements sur les terrains marneux (ROOSE *et al.*, 1993). Ces ravines évoluent avec le temps et peuvent engendrer des taux de perte en terre (90 à 300 t/ha/an) plus élevés que l'érosion en nappe mesurée sur les parcelles (0,1 à 20 t/ha/an) (ROOSE *et al.*, 2000 ; MORSLI *et al.*, 2006).

En hiver où le sol est plus ou moins couvert, mais très humide et totalement fermé, les pluies d'imbibition (P_i) ont atteint les valeurs les plus basses rendant le sol encore plus vulnérable au ruissellement et à l'érosion. Par contre au printemps, les P_i ont relativement augmenté suite à l'augmentation de la couverture du sol par le développement du couvert végétal.

Le risque de ruissellement et d'érosion reste toujours élevé sur les parcours pâturés, quel que soit la période ou le type de sol. Sur les parcours mis en défens et/ou améliorés, la porosité de la surface du sol reste relativement ouverte grâce à la présence d'une couverture végétale et d'une litière plus ou moins permanente et couvrante : l'infiltration est relativement élevée. Les résultats obtenus pendant 5 ans sur les parcelles de 100 m² montrent une réduction de 3 à 9 fois de l'érosion sur les parcelles améliorées par la mise en défens (tabl. 1 et fig. 2).

Tableau 1
Érosion (t/ha/an) sur parcours (parcelle pâturée et parcelle en défens).

Traitements	Sol	Médiane	Moyenne	CV
Parcelles pâturées	Sol brun calcaire (limoneux)	0,75	0,9	0,5
	Sol brun calcaire (argileux)	0,57	1,2	0,8
Parcelles en défens	Sol brun calcaire (limoneux)	0,16	0,1	0,6
	Sol brun calcaire (argileux)	0,30	0,4	0,4

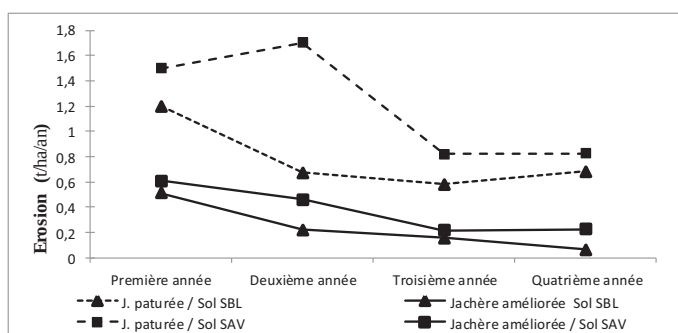


Figure 2
Évolution de l'érosion sur les parcours « améliorés en défens » par rapport aux parcours pâturés.

L'analyse des facteurs explicatifs de la différenciation de comportement des parcours vis-à-vis du déclenchement du ruissellement et de l'érosion a mis en relief l'aspect prépondérant des états de surface : surfaces fermées (Sf = encroûtée, tassée ou cailloux) et surfaces couvrantes (Sc = litière + canopée + cailloux). La relation est forte entre la pluie d'imbibition (Pi) et les surfaces fermées et couvrantes. L'infiltration finale (Fn) est aussi liée à ces deux états de surface, mais moins étroitement. Les expressions expliquant cette relation sont données ci-dessous.

– Sol brun calcaire limoneux

$$Pi = 14,8 - 0,190 Sf + 0,091 Sc \quad R^2 = 77,1 \%$$

$$Fn = 8,31 - 0,101 Sf + 0,099 Sc \quad R^2 = 50,8 \%$$

– Sol brun calcaire argileux sur marne

$$Pi = 23,5 - 0,268 Sf + 0,075 Sc \quad R^2 = 95,3 \%$$

$$Fn = 9,79 - 0,106 Sf + 0,104 Sc \quad R^2 = 75,7 \%$$

La bonne relation entre ces états de surface (Sf et Sc) et la pluie d'imbibition montre l'importance du rôle des états de surface dans la régulation des flux d'eau et dans la détermination du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. L'amélioration des parcours (mise en défens et introduction d'espèces fourragères) a contribué à l'augmentation des surfaces couvertes (Sc) et à la diminution des surfaces fermées (Sf) et par conséquent, à l'amélioration de l'infiltration et à la réduction de l'érosion.

Pour les sols argileux vertiques, en période sèche, le comportement hydrodynamique est plus influencé par les surfaces ouvertes (fissuration) que par la couverture végétale. La relation entre Pi et les surfaces ouvertes est très forte ($R > 90 \%$), alors que la relation entre Pi et la surface couverte est relativement faible ($R < 40 \%$). Le comportement des terrains de parcours vis-à-vis de l'érosion reste aussi contrôlé par la pente et les aspects géomorphologiques des versants.

Érosion des sols et amélioration des stocks du carbone sur les parcours

Les teneurs en carbone organique des dix premiers centimètres des sols des parcours sont globalement faibles et ne dépassent pas 1,3 % (MORSLI, 1996). Ces faibles taux s'expliquent en partie par l'exploitation continue des sols et par l'érosion.

Le suivi de l'évolution du carbone organique du sol au niveau de zones de parcours, pendant 5 à 6 ans, montre que le stock du carbone du sol dans la couche 0-10 cm change en fonction du système de gestion. Les stocks ont diminué de 8 à 10 % sur le système traditionnel (parcours pâturés). Par contre, sur les systèmes améliorés ou mis en défens, les stocks de C ont augmenté, de 15 à 20 % (fig. 3). L'influence de la mise en défens s'est fait sentir dès la 3^e année, elle a permis une amélioration significative du stock du carbone du sol.

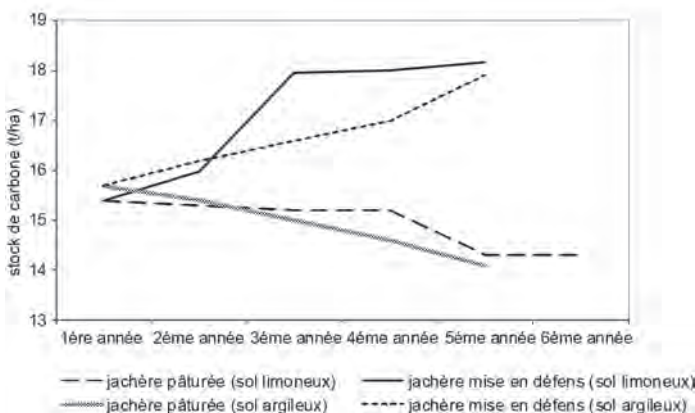


Figure 3

Effet de la mise en défens sur la restauration des stocks du CO du sol (0-10 cm).

Parfois il est possible de restaurer les sols au moindre coût en laissant faire la nature, tout en la contrôlant (un contrôle continu de la charge pastorale et des rotations sans quoi aucune restauration ni amélioration ne peut être obtenue). Une technique, comme la mise en défens, a donné des résultats positifs sur la régénération de la couverture végétale qui a favorisé la restauration et l'accroissement de la fertilité du sol. La mise en défens et/ou la jachère plus ou moins longue sont très efficaces pour restaurer les propriétés chimiques, physiques et biologiques de la couche humifère du sol (FLORET et SERPANTIÉ, 1991 ; NAGGAR, 2000 ; MORSLI *et al.*, 2008 ; SABIR et ROOSE, 2010 ; BENARADJ *et al.*, 2011).

L'effet de l'érosion sur les pertes en carbone organique n'est pas négligeable (19 à 41 kg/ha/an). Ces pertes en carbone sont liées à la quantité des terres érodées (fig. 4), aux averses exceptionnelles et à la richesse de la surface du sol. Plus la surface du sol est couverte (jachère améliorée et mise en défens), plus les sédiments sont riches en carbone et l'indice de sélectivité est élevé (2,3 à 3,9). La matière organique est l'élément le plus léger et par conséquent, la première à être transportée en grande quantité par le ruissellement (ROOSE et BARTHÈS, 2006).

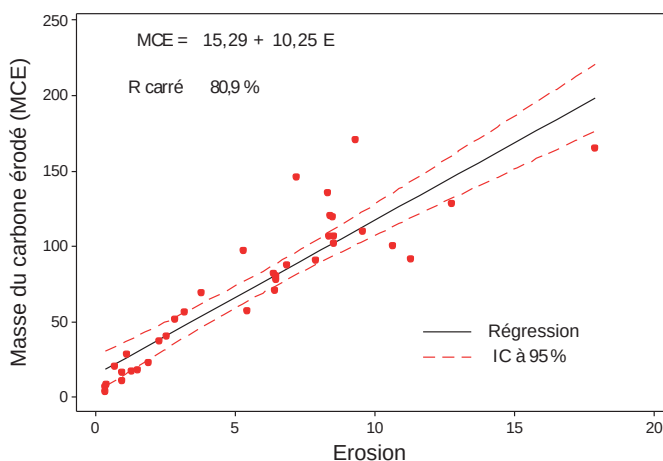


Figure 4
Relation entre l'érosion et la masse du carbone des terres érodées.

Amélioration des caractéristiques du sol Les caractéristiques du sol ont été améliorées par ces techniques biologiques qui font partie de la panoplie des moyens de restauration des sols. Pour ce qui concerne les propriétés biochimiques, les résultats montrent que les teneurs en MO, N et P sont significativement plus élevées (de 2 à 4 fois) dans les parcelles améliorées (tabl. 2). Ces variations de teneurs correspondent à une amélioration de la fertilité du sol. L'accroissement de la fertilité du sol est dû à l'accroissement de la biomasse et de sa décomposition ($C/N < 12$), ainsi qu'au turnover des racines. Sur les zones pâturées, le pacage a aussi un rôle dans l'entretien de la fertilité du sol par les fèces et les urines des animaux, mais l'apport en nutriments par les animaux sur le parcours est moins important que les pertes de nutriment par le broutage : les animaux

passent plus de 12 heures en stabulation, ainsi une grande proportion des nutriments broutés sur les parcours a été transférée sur le fumier qui est utilisé dans certaines zones cultivées (arboriculture et maraîchage). Le fumier n'est pas bien géré (exposé en plein soleil et aux pluies) et nécessite l'amélioration de sa qualité (apport de litière pour mieux fixer l'azote excrété) : le mode de préparation et d'apport actuel du fumier entraîne la diminution de sa valeur fertilisante. Sur les parcours mis en défens (MD), les propriétés physiques du sol (la stabilité structurale et l'infiltration du sol) ont été améliorées (tabl. 3).

Tableau 2

Amélioration des caractéristiques biochimiques du sol par la mise en défens des parcours.

	MO %		N %		P ₂ O ₅ ppm	
Sol calcimagnésique brun calcaire sur marne de texture argileuse (SAV)						
	JP	MD	JP	MD	JP	MD
Moyenne	1,67	2,41	0,07	0,15	9,28	21,85
Médiane	1,65	2,40	0,07	0,15	9,0	21
SD	0,088	0,099	0,006	0,017	0,76	3,39
Sol calcimagnésique brun calcaire sur encroûtement calcaire de texture limoneuse (SBL)						
Moyenne	1,63	2,30	0,05	0,18	8,00	36,25
Médiane	1,60	2,30	0,05	0,18	7,50	37,50
SD	0,086	0,088	0,010	0,015	1,20	2,92

MO : matière organique de la couche 0-10 cm du sol ; P₂O₅ : phosphore assimilable du sol en ppm ; N : azote total dans le sol en % ; SD : écart-type.

Tableau 3

Amélioration des caractéristiques physiques du sol par la mise en défens des parcours.

Traitements	Da	Is	Pi	IF	État de surface
Traitement sur sol calcimagnésique brun calcaire sur marne de texture argileuse (SAV)					
Jachère pâturée (JP)	1,39 à 1,45	0,6 à 0,8	17	9	Fissures plus accentuées à l'état sec ; sol nu ; couverture clairsemée du sol
Jachère mise en défens (MD)	1,30 à 1,36	0,4 à 0,6	27	14	Fissures relativement moins accentuées ; couverture dense du sol ; mince litière ; brun très foncé
Traitement sur sol calcimagnésique brun calcaire sur encroûtement calcaire de texture limoneuse (SBL)					
Jachère pâturée (JP)	1,60 à 1,80	5 à 15	07	10	Fermé et compact ; croûte superficielle ; couverture clairsemée du sol ; fort décapage ; traces d'érosion
Jachère mise en défens (MD)	1,30 à 1,40	2 à 4	15	18	Présence de litière ; meuble ; poreux ; brun très foncé ; couverture dense du sol

Da : densité apparente de la couche 0-10 cm du sol ; Is : indice de stabilité ; Pi : pluie d'imbibition en mm sur sol sec ; IF : infiltration finale en mm/h pour une pluie simulée de 30 mm/h.

Les matières organiques arrachées des versants sont entraînées et redistribuées en aval. L'étude de la distribution des sols (MORSLI, 1996) a montré qu'une partie des matériaux érodés reste piégée sur le versant : des dépôts importants de carbone ($MOS \geq 3\%$) ont été observés dans les zones de ralentissement (replat, concavité, vallée). En 2001, lors d'une série de pluies saturantes de plus de 100 mm, des sédiments de 30 cm d'épaisseur, de 10 à 30 % de matières organiques ont couvert de grandes superficies en aval d'un micro-bassin versant dans les monts de Beni-Chougrane. Plus les zones de parcours d'amont sont couvertes et riches en carbone, plus les zones d'aval sont enrichies par les apports de colluvions. Une amélioration d'une parcelle de parcours a aussi un effet sur la restauration des parcelles colluviales en aval. La redistribution crée une hétérogénéité de la fertilité des sols.

Amélioration de la productivité, de la biomasse et de la biodiversité

Amélioration de la végétation naturelle par la mise en défens

Les parcours de cette zone de montagne sont caractérisés par une dégradation biologique (diminution du couvert végétal, de la phytomasse et de la richesse floristique), une dégradation de la qualité (réduction de la densité des espèces appétantes qui sont remplacées par des épineuses, des légumineuses à odeur répulsive, etc.) et une dégradation physique et hydrique (augmentation des états de surface fermés, réduction de l'infiltration, érosion). Ces indices caractéristiques de la dégradation de ces zones de parcours montrent une régression du couvert végétal et une diminution sérieuse de production et de fertilité du sol. La production fourragère des parcours des monts de Beni-Chougrane est de 50 à 100 UF/ha et peut atteindre 250 UF/ha sur les jachères protégées (FAO/FIDA, 1993).

La mise en défens, technique peu coûteuse (ne nécessitant qu'un gardiennage ou des barrières), reste un instrument efficace pour la régénération et la réhabilitation des parcours. Après 3 à 6 ans de mise en défens en zones de montagnes semi-arides, nous avons remarqué un accroissement du taux de recouvrement et du poids de la biomasse, ainsi qu'une amélioration des propriétés biophysiques du sol : la formation d'une litière a favorisé l'infiltration et le développement des activités biologiques.

Les mesures effectuées sur les parcelles en défens montrent que la production de biomasse qui était de 400 à 600 kg/ha de matière sèche sur les parcours pâturés est passée à plus de 2 000 kg/ha de matière sèche après trois ans de mise en défens et à 2 500 kg/ha après 4 ans. Depuis, la production n'a plus beaucoup changé. Plusieurs auteurs ont montré l'efficacité de la mise en défens dans la restauration des parcours (FLORET, 1981 ; LE FLOC'H *et al.*, 1999 ; BOURBOUZE, 1997).

Amélioration des parcours par ensemencement

L'enrichissement des parcours par l'ensemencement de plusieurs espèces (*Médicago truncatulla*, *M. polymorpha*, *M. littoralis*, *M. snail*, *M. parapento*, *M. parageseo*, *M. borung*, *M. jermalon*, *Trifolium subterraneum*, *Lolium victoria*

et Fétuque) ont donné des résultats encourageants. Parmi ces espèces que nous avons mises en essai, le *Médicago snail* a donné les résultats les plus performants que ce soit en hauteur de végétation, largeur de végétation, rendement ou en production de gousses.

L'amélioration du parcours par l'introduction des plantations pluriannuelles et pérennes ont donné les meilleurs résultats. La luzerne arborescente (*Médicago arborea*) a donné des rendements de l'ordre de 6 000 kg de matière sèche/ha et un taux de recouvrement de plus de 80 %. Les mêmes résultats ont été obtenus par l'*Hedysarum pallidum* (sulla), des rendements de 5 000 à 6 000 kg/ha de matière sèche avec un taux de recouvrement de 100 %. L'exploitation peut se faire par le pâturage direct ou par le fauchage.

Ces techniques biologiques d'amélioration des terrains de parcours n'ont pas seulement pour objectif de produire du fourrage. Elles ont permis aussi la restauration de la productivité du sol et l'amélioration des revenus : restauration et accroissement de la fertilité, lutte contre l'érosion par l'augmentation de la couverture du sol, initiation d'une remontée biologique (fixation d'azote) et revégétalisation progressive de zones dénudées.

La restauration et l'amélioration de la biomasse et de la fertilité du sol se sont accompagnées aussi d'un accroissement de la diversité de la flore et de la faune. Après quatre ans de mise en défens, le nombre d'espèces est multiplié par 2,5 avec une dominance des Poacées, des Fabacées, des Astéracées et des Liliacées. Les parcours pâturés étaient auparavant dominés par les Astéracées.

La biomasse produite sur les parcelles améliorées, surtout celles qui ont été mises en défens, a permis d'améliorer la qualité de l'environnement et l'habitat de la méso-faune (vers de terre) et le petit gibier (abris et sites de reproduction de la perdrix). Les parcours améliorés, en plus de la restauration des couvertures végétales et pédologiques, offrent une vaste gamme de produits qui contribuent à renforcer les moyens de subsistance et génèrent des revenus supplémentaires (fourrages, plantes mellifères, plantes médicinales, gibier, etc.). Dans les zones steppiques algériennes, les parcours améliorés par la mise en défens sont devenus plus attractifs pour les éleveurs, car ils génèrent des revenus importants (avec un prix de vente de 1 200 DA (10 euros) le kilo de viande, l'activité est économiquement intéressante) et pour les structures locales, car ils génèrent des revenus additionnels qui permettent de rentabiliser les investissements (gardienage ou clôture). Ce type de restauration a plus de chance de succès, car il génère des revenus complémentaires.

Conclusions

La dégradation des zones de parcours de montagne entraîne une réduction des surfaces productives et un appauvrissement des couvertures pédologiques. La

dégradation du couvert végétal favorise l'entraînement des matières organiques et des fertilisants des sols par les eaux de ruissellement. Le stock de carbone du sol a diminué. La productivité des sols est ainsi très affectée par la détérioration de la fertilité et l'amplification de l'érosion des sols. La couverture végétale restaurée par les techniques utilisées a permis d'améliorer la couverture pédologique, les MO ont augmenté de 20 %.

Les résultats ont montré les grandes possibilités de restauration des couvertures végétales et pédologiques. Une technique, comme la mise en défens, a donné des résultats positifs sur la régénération et la production de biomasse qui a permis d'une manière significative d'entretenir la fertilité du sol, d'améliorer les caractéristiques physiques et biochimiques du sol et de renforcer la résistance à l'érosion. La diminution du ruissellement et de l'érosion va de pair avec l'augmentation de l'infiltration et des réserves hydriques du sol à disposition des racines.

L'enrichissement et les plantations fourragères ont permis aussi une augmentation du taux de couverture et de la biomasse qui ont un effet positif sur l'amélioration de la productivité des sols.

La restauration des sols et leur productivité peuvent être encore stimulées par un apport d'engrais azotés et phosphatés (les sols sont carencés en N et P) et par l'utilisation des mélanges d'espèces plus productives. Malgré leurs effets positifs sur la restauration et l'amélioration des couvertures végétales et pédologiques des parcours, ces techniques n'auront des résultats concrets que si elles sont réalisées dans un cadre global de développement agropastoral et avec l'adoption d'une approche participative.

Bibliographie

ARBOUCHE F., 1995 – *Contribution à l'étude d'un facteur limitant le fonctionnement de la phytocénose : cas du pâturage dans la cédraie du Belzma (Aurès)*. Thèse Magister, INA, 132 p.

BENARADJ A., MEDERBAL K., BENABDELI K., 2011 – « Amélioration pastorale par la technique de mise en défens de la steppe à *Stipa tenacissima* dans les parcours steppiques sud-oranais de Naâma (Algérie) ». Séminaire international d'étude Agriculture biologique et Développement durable 13-14/02, Oran-Algérie, ONU/U, Oran.

BNEDER, 1982 – *Étude de développement intégré des monts de Beni-Chougrane, Algérie*. Rapport. T I, 64 p.

BOURBOUZE A., 1997 – Protection des ressources et développement rural dans le parc naturel du Haut Atlas oriental (Maroc). *Courrier de l'environnement*, 30 (doc électronique).

FAO-FIDA, 1993 – *Projet de développement des monts de Beni-Chougrane : étude de diagnostic des systèmes de production*. FAO, 96 p.

FLORET C., 1981 – The effects of protection on steppic vegetation in the Mediterranean arid zone of southern Tunisia. *Vegetatio*, 46 : 117-129.

FLORET C., SERPANTIÉ G., 1991 – *La jachère en Afrique de l'Ouest. Actes de l'Atelier des 3-5 décembre 1991*, Montpellier, Éditions Orstom, coll. Colloques et Séminaires, 494 p.

- LE FLOC'H E., NEFFATI M., CHAIEB M., FLORET C., PONTANIER R., 1999** – Rehabilitation Experiment at Menzel Habib, southern Tunisia. *Arid Soil Rehabilitation*, 13 : 357-68.
- MORSLI B., 1996** – *Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne – Cas des monts de Beni-Chougrane*. Thèse de Magister INA, Alger, 160 p.
- MORSLI B., BENELOUATI A., ROOSE É., 1988** – *Érosion et aménagement conservatoire dans les monts de Beni-Chougrane*. Rapport, INRF-Orstom, 85 p.
- MORSLI B., MAZOUR M., MEDEJEL N., ARABI M., ROOSE É., 2006** – « Influences of land uses, soils and cultural practices on carbon eroded and carbon stocks in soils of Mediterranean mountains of northern Algeria. Chapter 8 ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Sciences*, CRC publisher, Boca Raton, Floride, USA : 103-124.
- MORSLI B., HALITIM A., MAZOUR M., 2008** – « Érosion et effet des techniques culturales sur les versants semi-arides de l'Algérie (Beni-Chougrane) ». In : *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, Paris, Édit. AUF-IRD-Enfi : 199-203.
- MORSLI B., HABI M., MAZOUR M., HAMOUDI A., HALITIM A., 2012** – Érosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du Nord : analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Rev. Maroc. Sci. Agron. Vét.*, 1 : 33-40.
- NAGGAR M., 2000** – Éléments de base d'une stratégie de sylvo-pastoralisme en Afrique du Nord. *CIHEAM - Options Méditerranéennes*, sér. A/39 : 191-202.
- NEDJRAOUI D., 2003** – *Profil fourrager, Algérie*. FAO, 30 p.
- ROOSE É., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993** – Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 289-309.
- ROOSE É., CHEBBANI R., BOURUGAA L., 2000** – Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, 11 (4) : 317-326.
- ROOSE É., BARTHÈS B., 2006** – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Floride, USA : 55-72.
- SABIR M., ROOSE É., 2010** – « Agroforesterie : l'arbre et la GCES ». In Roose É., Sabir M., Laouina A. (eds) : *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, Marseille, Éditions IRD : 277-290.

La lutte antiérosive, la GCES et la restauration de la productivité de sols dans les montagnes du nord de l'Algérie

Éric ROOSE

Mourad ARABI

Akhdar BOURUGAA

Abdelkrim HAMOUDI

Boutkhil MORSLI

Nadjai MEDEDJEL

Mohamed MAZOUR

Khaled BRAHAMIA

Problématique

Le bassin méditerranéen a attiré au cours des millénaires des populations nombreuses. Les colonisations successives (défrichement, agriculture, élevage, urbanisation, guerres) ont entraîné la dégradation des couvertures végétales, des sols, des rivières, du microclimat et finalement des sociétés. Le survol du nord de l'Algérie, région la plus productive mais très fragile, montre des montagnes surpâturées, des collines dénudées, des sols décapés par l'érosion en rigole, des versants raides et des plaines lacérées par des ravines et des oueds, des barrages envasés en une trentaine d'années (ARABI *et al.*, 2004). Qui est responsable de ces paysages désolants ? Le milieu méditerranéen réputé fragile du fait de ses

reliefs jeunes, de l'alternance de roches tendres et de roches dures, de ses climats agressifs où alternent des pluies abondantes en hiver inondant des sols peu couverts et des orages violents à la fin de l'été torride ? Ou les activités dévastatrices de l'homme rarement raisonnable quand il s'agit de s'emparer des ressources naturelles (LAOUIA, 1992).

Pour faire face à ces graves problèmes d'érosion, l'administration des Eaux et Forêts a développé une stratégie, la Défense et Restauration des Sols (DRS) qui comprend :

- la reforestation des hautes vallées (800 000 ha plantés depuis 1962 : MAZOUR, 1992) ;
- la correction torrentielle et la restauration des ravines en amont des barrages ;
- le terrassement des champs cultivés sur les versants (350 000 ha de banquettes coûtant plus de 1 000 €/ha).

L'objectif était de retarder l'envasement des barrages et de protéger les aménagements, l'eau et les terres. Dès 1980, l'échec de cette approche technocratique d'équipement hydraulique des zones rurales pour le bien public était évident. Malgré 40 années d'investissements lourds dans la lutte antiérosive, la productivité des terres ne cesse de se dégrader même sur les banquettes, les barrages continuent à s'envaser, la production de bois reste faible. Le programme de terrassement des banquettes fut abandonné pour des raisons économiques (HEUSCH, 1986). Les forestiers poursuivent la reforestation et la correction des ravines, mais les fermiers ne reçoivent plus d'aide pour maîtriser l'érosion. En revanche, l'Algérie a construit une quinzaine de barrages en dix ans, lesquels sont menacés par l'envasement à court terme, car le taux d'érosion spécifique des bassins versants est parmi les plus élevés du monde (DEMMAK, 1982). Actuellement, avec la crise économique, les villes industrielles connaissent des problèmes d'emplois et d'eau potable. Le gouvernement algérien souhaite maintenir la population à la campagne et intensifier l'agriculture sans pour autant accélérer la dégradation des terres, ni la pollution des eaux, ressource si précieuse en milieux semi-arides.

Depuis 1985, l'Institut national algérien pour la recherche forestière (INRF) et l'Institut français de recherche pour le développement (IRD) ont uni les efforts d'une douzaine de chercheurs pour développer un programme de formation et de recherche sur les causes et les facteurs des différents processus d'érosion et pour tester dans les montagnes semi-arides d'Algérie une nouvelle approche participative de lutte antiérosive : la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) (ROOSE, 1987, 1994). Il s'agit d'améliorer la couverture végétale pour réduire les risques d'érosion. Si on souhaite que les paysans participent à la protection du milieu rural et à la qualité des eaux, il faut d'abord répondre à leurs préoccupations immédiates : améliorer la productivité des terres et du travail, en gérant au mieux l'eau disponible (y compris le ruissellement), la biomasse produite et la fertilité des sols. Au lieu d'investir massivement sur les terres marginales, il s'agit d'améliorer d'abord les systèmes



Les parcelles de mesure de l'érosion (photo a) sous un système agroforestier (abricotiers et rotation blé-lentilles) et (photo b) sous divers systèmes de viticulture sur micro-terrasses avec rotation blé-légumineuses entre les rangs de vignes. Station INRF de Ouzera/Médéa, Nord-Algérie.

© IRD/É. Roose

de production (rotation céréales-légumineuses, vigne et jardins fruitiers avec cultures en sous-étage, mise en défens et enrichissement des parcours avec des légumineuses fourragères, recherche de techniques culturales adaptées aux fortes pentes, utilisation raisonnée des engrais et divers intrants). Les principaux résultats concernant les risques (potentiels et réels) de ruissellement et d'érosion ont été présentés antérieurement (ROOSE *et al.*, 1993). Nous les rappellerons brièvement avant de rapporter les améliorations de la production de biomasse et de la fertilité des sols sur des champs expérimentaux de plus de 100 m² où on a suivi pendant 4 à 10 ans la réduction des pertes en eau et en terre par érosion et l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols.

Méthodes

La comparaison des risques d'érosion et de l'évolution des propriétés des sols a été suivie pendant 4 à 10 ans sur un réseau de 50 parcelles d'érosion d'une centaine de mètres carrés représentant les quatre principaux sols, le témoin en jachère nue travaillée chaque année, les principaux systèmes de production et diverses innovations dans une zone montagneuse de l'Atlas tellien comprise entre Médéa (au centre de l'Algérie) et Tlemcen (à l'ouest) recevant en moyenne 650 à 300 mm de pluie, essentiellement en période froide. Ces innovations seront précisées pour chaque site.

Après la fin des expérimentations, les propriétés physiques ont été comparées sur le terrain au simulateur de pluie (type Orstom), ainsi que les stocks de carbone séquestrés dans l'horizon labouré (20 cm) et les teneurs en nutriments. (ROOSE et BARTHÈS, 2006 ; MORSLI *et al.*, 2006).

À la station de Ouzera-Médéa, située à 90 km au sud d'Alger, l'INRF a installé quinze parcelles d'érosion sur des pentes de 12 à 40 %, vers 1 000 m d'altitude, sur des vertisols gris sur marnes, très argileux, bien structurés, avec 2 % de MO, saturés en calcium, sur des sols rouges fersiallitiques lessivés sur grès tendres, pauvres en MO et instables et sur des sols bruns calcaires sur colluvions, bien structurés et caillouteux. Les systèmes de production comparés à la jachère nue sont un matorral surpâturé, un verger d'abricotiers de 30 ans, une vieille vigne sur terrassettes et un système agropastoral traditionnel comportant un blé suivi d'une jachère pâturée (ARABI, 1991).

À Mascara, dix parcelles ont été installées sur le terroir de Ain Fares sur un sol brun calcaire limoneux de 20 % de pente et sur un sol brun vertique très argileux de 45 % de pente. On y a comparé la jachère nue, la jachère non travaillée, les légumineuses fourragères et les pois sur billons isohypses. Normalement, les pluies atteignent 450 mm, mais elles furent très déficitaires durant les expérimentations (P = 241 à 320 mm) (MORSLI, 1995).

Près de Tlemcen, 17 parcelles furent installées dans le bassin de l'oued Isser. Au nord sur les stations de Heriz et Cherif, sur vertisols sur marnes furent comparés les jachères nues ou traditionnelles ou à vesce-avoine, et des blés traditionnels ou intensifs.

Au sud, sur la station de Madjoudj, sur des sols bruns calcaires sur calcaire jurassique et à Gourari sur sols rouges fersiallitiques sur grès, furent testés des jachères nues, des matorrals dégradés, en défens ou enrichis de légumineuses. La pluviosité moyenne varie autour de 530 mm et on peut enregistrer tous les dix ans des pluies de 100 mm/jour au printemps (MAZOUR, 1992, CHEBBANI *et al.*, 1995)

À Taasalet, à 60 km au nord de Relizane, huit parcelles furent installées sur sol brun calcaire vertique sur marnes (pente de 9 à 21 %) et sur une rendzine sur roche marno-calcaire (pente de 30 %) (BRAHAMIA, 1993). La comparaison porte sur la jachère nue, la culture d'orge à plat et de pois sur billons perpendiculaires à la pente. Les pluies furent déficitaires ($P = 250$ mm) si bien que l'introduction d'arbustes fourragers a échoué, tandis que le labour profond et le billonnage isohypse ont réduit l'érosion et amélioré la production fourragère.

Les résultats sur l'érosion

Les précipitations

Toute la région a connu des années pluviales déficitaires plus ou moins graves (de 60 à 280 mm par rapport aux moyennes sur 30 ans), mais on a quand même observé de grosses averses. Non seulement la hauteur des pluies fut modeste, mais aussi leur intensité et leur énergie. L'indice d'agressivité des pluies Rusa (WISCHMEIER et SMITH, 1960) n'a guère dépassé 50 par campagne et le rapport Rusa/hauteur des pluies annuelles n'atteint que 0,1, alors qu'il atteint 0,4 à 0,6 en Afrique occidentale (ROOSE, 1994). Il y a donc une situation paradoxale. D'une part, les climats méditerranéens sont réputés très érosifs (des paysages ravinés et des inondations catastrophiques). Mais d'autre part, les auteurs s'accordent pour constater de modestes indices d'agressivité des pluies, nettement moindres qu'en régions tropicales (KALMANN, 1976 ; PIHAN, 1978 ; ROOSE, 1972 et 1994 ; ARABI, 1991 ; MAZOUR, 1992). Cela semble indiquer que les séries de pluies saturantes et la faible couverture pédologique sont à l'origine de ces phénomènes catastrophiques, plus que l'énergie des pluies orageuses, généralement limitées dans l'espace.

Le ruissellement

Le ruissellement annuel fut très discret sous matorral et jachères pâturées (Kram = 0,6 à 4 % des pluies), modeste sous cultures (0,1 à 7 %), mais il peut dépasser 5 à 28 % sur sol nu, même labouré.

Par contre, le ruissellement maximal lors d'une grosse averse varie beaucoup selon qu'il s'agit d'un matorral bien couvert ($K_{rmax} = 1$ à 9 %), d'un parcours dégradé, surpâturé et tassé (25 à 30 %), d'une terre labourée et cultivée (1 à 23 %) ou d'une terre nue, tassée, encroûtée par les pluies, engorgée ou peu profonde (K_{rmax} peut dépasser 50 à 85 %). C'est lors de ces événements exceptionnels que se déclenchent le ravinement, les crues des oueds, les glissements de terrain et l'envasement rapide des barrages. Deux facteurs expliquent la modestie du ruissellement : les pluies déficitaires (ce sont les séries et les gros orages qui manquent pour saturer le sol) et le fort couvert végétal obtenu grâce aux bonnes techniques culturales (labour grossier, engrais, et litière entre les rangs cultivés). Par contre, les parcours surpâturés, les pistes tassées par le bétail, les vignes non entretenues, les sols nus engorgés en hiver et les jachères encroûtées peuvent produire plus de 30 % de ruissellement lors des averses importantes.

On voit au tableau 1, que l'aptitude des sols à ruisseler dépend plus des états de surface du sol lors des averses que du type pédogénétique. Les vertisols sont presque imperméables, une fois que le profil est humecté, les argiles gonflées et les fissures colmatées. Les sols rouges fersiallitiques sont généralement perméables, mais une fois dégradés, les horizons sableux pauvres en MO deviennent instables, se tassent et s'encroûtent et le ruissellement devient aussi fort que sur les sols argileux. Les sols bruns calcaires et les rendzines, souvent caillouteux, sont les sols les plus perméables.

Tableau 1
Aptitude au ruissellement des sols nus labourés : K_{rmax} % et pluies d'imbibition (P_i en mm) observés sur sols secs ou humides.

Station	Pluies (mm)	Vertisol gris	Fersiallitique rouge	Brun calcaire	Rendzine
Ouzera-Médéa	650	80	40	33	-
Tlemcen	500	27-39	30	29	-
Mascara	450	30			
Taasalet	300	15	-	-	13
Pluie d'imbibition (mm)		3 à 20	4 à 10	6 à 22	6 à 14

Pour déclencher le ruissellement, la pluie d'imbibition varie de 10 à 22 mm quand la pluie tombe sur un sol sec et de 3 à 6 mm sur sol humide. Ces seuils de hauteur de pluie limite dépendent surtout de l'humidité préalable et de l'état de la surface du sol : tassement par le bétail, fissures de dessiccation et trous creusés par les vers de terre, croûtes de battance ou de sédimentation, litière et canopée, cailloux, agrégats et mottes créées par le travail du sol. Le labour grossier et profond augmente temporairement l'infiltration, mais réduit la cohésion, d'où des pertes en terre importantes lors des averses abondantes. Par contre

quand on a remplacé le labour par un sarclage aux herbicides sous un vignoble à Ouzera, la surface du sol s'est tassée et le ruissellement a triplé, alors que les pertes en terre ont diminué, car la surface battue du sol est plus cohérente.

L'érosion en nappe et rigoles

Sous les garrigues méditerranéennes, les pertes en terre sont très réduites ($E = 0,03$ à $0,4$ t/ha/an), du fait des litières et végétations basses (CLAUZON et VAUDOUR, 1969 ; MARTIN, 1975 ; DELHOUME, 1981 ; ROOSE *et al.*, 1993). L'érosion en nappe a aussi été modérée sur les diverses cultures testées ($E = 0,04$ à 3 t/ha/an) et même sur les jachères nues travaillées ($E = 0,7$ à 20 t/ha/an) malgré de fortes pentes ($p = 10$ à 45 %). Cela s'explique par la faible agressivité des pluies ($R_{usa} < 50$) et la forte résistance des sols riches en argile saturée, en calcium et souvent caillouteux ($K = 0,02$ à $0,25$). À titre de comparaison, sur des sols ferrallitiques sableux de Côte d'Ivoire, Roose a mesuré sur jachère nue des pertes en terre 35 fois plus importantes (700 t/ha/an) pour des pluies 4 fois plus abondantes (ROOSE, 1977). L'érosion en nappe sélective (entraînant l'appauvrissement de l'horizon humifère) ne semble pas le processus le plus actif sur ces versants méditerranéens raides. L'érosion en rigole et l'érosion aratoire, qui ne sont pas sélectives, peuvent entraîner le décapage de l'horizon humifère en une génération : le travail du sol participe activement à la formation des talus en bordure des champs.

L'érodibilité

L'érodibilité des quatre types de sols testés sous pluies naturelles varie de $0,002$ à $0,033$: les sols sont donc très résistants à l'énergie des pluies comparés à l'échelle mondiale où K augmente de $0,01$ à $0,70$ avec la fragilité des sols. Les risques d'érosion en nappe sont donc peu différents des risques de ruissellement, sauf que les sols fersallitiques lessivés sont plus fragiles que les vertisols, plus argileux. Cependant, si les vertisols sont résistants à la battance des pluies, une fois le profil réhydraté, le ruissellement est si fort qu'il provoque du ravinement : c'est d'ailleurs sur les marnes et les vertisols qu'on observe le plus de ravines.

L'influence des pentes

Elle est difficile à démontrer car les sols varient en même temps que la pente (sauf à Tlemcen). Au tableau 2, il apparaît clairement que le ruissellement (moyen et maximum) diminue lorsque la pente augmente, tandis que l'érosion est plus liée au type de sol qu'à la pente exprimée en %. Ce résultat étonnant à première vue a déjà été observé au Maroc sur vertisols (HEUSCH, 1970), et sur sols ferrallitiques en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1977) et sur sols bruns en Belgique (POESEN, 1984). Ces résultats remettent en cause l'utilisation classique des équations de Ramser, SACCARDY (1950), Bourgeat et d'autres selon lesquelles l'érosion augmente avec la pente et que, par conséquent, il faut rapprocher les structures antiérosives.

Tableau 2
Influence de la pente et du type de sol sur le ruissellement moyen et extrême et l'érosion sur une jachère nue travaillée.

Type de sol	Surf. couverte par les cailloux %	Pente %	Kram %	Krmax %	Érosion t/ha/an
Ouzera-Medea					
Vertisol gris	4	12	21	86	2,3
Fersiallitique rouge	0	30	20	57	12,0
Colluvial brun calcaire	20	35	12	36	2,5
Brun calcaire/versant	16	40	11	34	2,7
Tlemcen					
Sol vertique gris	5	15	10	39	5,7
Idem	4	20	6	25	2,4
Idem	3	30	7	27	2,5

Source : d'après ROOSE et al., 1993.

Influence de l'amélioration des systèmes cultureux

L'amélioration du couvert végétal (forte densité, fertilisation raisonnée, rotations avec des légumineuses, cultures intercalaires sous les vignes et les abricotiers) a réduit fortement les risques d'érosion et de ruissellement. Mais le résultat le plus important concerne l'amélioration significative des rendements des cultures et des revenus des agriculteurs.

À Ouzera, les rendements observés sur les parcelles d'érosion soumises aux pratiques traditionnelles sont aussi médiocres que sur les champs voisins des paysans : 7 quintaux/ha de blé d'hiver, 28 q/ha de raisin et 8 q/ha pour les abricots, sur des arbres malingres. Juste à côté, grâce aux techniques améliorées les rendements ont atteint en culture pure 48 à 65 q de blé, 40 q/ha de raisin, 10 q d'abricots et en plus les cultures associées (34 q/ha de fève et 30 q de blé).

Les revenus nets augmentent de 250 \$ US/ha sur céréales traditionnelles, à 2 500 sur rotation blé/légumineuses améliorée et jusqu'à 5 100 dollars sous vigne améliorée avec sous-étage en blé en rotation avec légumineuses (fèves). Dans la région de Tlemcen, l'apport de 75 t/ha de compost urbain (24 % d'humidité) appliqué sur un sol brun vertique a multiplié les rendements de pois chiche par deux, en année déficitaire (MEDEDJEL, 1995). Ces résultats obtenus sur des petites parcelles (100 m²) ont été confirmés par la suite à l'échelle de l'hectare dans les champs des paysans locaux (tabl. 3).

L'érosion en ravine

Dans ces paysages surpâturés, on observe fréquemment des sentiers suivis par le bétail ou des rigoles dans les champs abandonnés, les pistes en terre ou les jachères

Tableau 3
*Effets de l'amélioration des systèmes culturels sur le ruissellement,
 l'érosion en nappe, le rendement des cultures et le revenu annuel net à Ouzera (Roose, 1992),
 à Mascara (MORSLI et al., 2013), à Tlemcen.*

Systèmes		Kram %	Krmax %	Érosion t/ha/an	Rendement q/ha/an	Revenus \$ US
Ouzera-Medea						
Agropastoral	traditionnel	2,4	14	0,23	7b + 2,3p	250
Sur vertisol	amélioré	0,9	5	0,05	48b + 22p + 70f + 27rc	2 500
Sylvo-pastoral	dégradé	15	25	2,0	nm	17
Sur sol brun	reforesté	0,6	2	0,05	nm	forfait
"	enherbé	1,0	4	0,03	nm	forfait
Verger	traditionnel	5,0	12	0,9	11a	605
Sur sol rouge	amélioré	0,7	3	0,1	10a + 64f + 33b + 19rc	3 000
Vigne	traditionnelle	2	8	0,2	29r	2 500
Sur sol brun	associée	0,2	2	0,01	37r + 37f + 29b + 4rc	5 100
Mascara						
Agropastoral	traditionnel	1,8	19	0,95	6b + 6bsp	
Sol brun vertique	amélioré	0,9	5	0,40	14b + 45 bsp	
Agropastoral	traditionnel	2,1	22	0,75	70 + 13pp + 5 bsp	
Sol brun calcaire	amélioré	0,9	5	0,06	140 + 31 pp + 30 bsp	
Tlemcen						
Blé	intensif	4,7	14,6	0,95	48b	1 920
Agropastoral	engrais NP					
Vertisols marneux Labour CES						

Source : MAZOUR, 1992 ; ARABI et ROOSE, 1992 ; MORSLI et al., 2013.

B = blé ; p = paille ; a = abricots ; f = fourrage ; r = raisin ; rc = résidus de culture ; O = orge ; pp = petits pois ; bsp = biomasse sèche des jachères ; nm = non mesuré

évoluant en ravines. Alimentées par le ruissellement provenant de zones peu couvertes, tassées et/ou encroûtées situées en amont, ces ravines creusées dans les couvertures pédologiques et les roches tendres (surtout marnes, argilites et schistes tendres) présentent des formes en V où les terres arrachées ou éboulées durant les périodes peu pluvieuses s'accumulent au fond des ravines, puis sont évacuées lors des averses très abondantes. Leur approfondissement est généralement très rapide ($E = 90$ à 300 t/ha/an), mais une fois atteint un certain équilibre, les versants s'enherbent et se stabilisent (CHEBBANI *et al.*, 1995 ; ROOSE *et al.*, 2000).

En milieu méditerranéen, il n'est pas rare de rencontrer des ravines initiées en milieu de versant au point de résurgence d'une nappe d'eau temporaire ou de ruissellement hypodermique : plus on stabilise l'amont, plus on améliore



a : ravine témoin non aménagée, coupant tout le versant marneux en deux.

© IRD/É. Roose

b : ravine voisine aménagée : seuils en gabion complètement enterrés après une seule saison et plantée de diverses essences d'arbres et d'herbes dès la seconde année. Souagui, Algérie.

© IRD/É. Roose



a : vingt ans après l'aménagement physique (seuils divers) et biologique (plantations de diverses espèces d'herbes et d'arbres), la ravine reverdie a résisté aux dégradations durant la guerre.

© IRD/É. Roose

b : une fois le fond de la ravine stabilisé et recouvert de sédiments piégés par les seuils, l'ensemble du fond et des versants de la ravine s'est recouvert naturellement de végétation.
Bassin de Souagui, Algérie.

© IRD/É. Roose

l'infiltration et plus on accélère le ravinement. C'est par l'enrochement de la tête de ravine et l'aménagement de la ravine elle-même qu'on pourra stabiliser l'évacuation de ces excès d'eau localisés. Enfin, les oueds connaissent des crues impressionnantes qui peuvent déstabiliser les berges et créer des ravines remon-tantes. On peut réduire les risques de glissement de terrain par la plantation d'arbres à croissance rapide, mais il faut aussi stabiliser les ravines et le lit des oueds.

La restauration des sols

Un des objectifs à moyen terme de la GCES, outre la réduction des transports solides, vise la restauration de la capacité de production des sols. La restauration de la couverture végétale est beaucoup plus spectaculaire et rapide que l'amélioration des propriétés des sols : ces recherches se sont donc étalées sur dix ans pour vérifier sur le terrain l'évolution du stock de matières organiques de l'horizon superficiel, les propriétés physiques qui y sont directement liées et la disponibilité en nutriments pour les plantes cultivées (ou simplement gérées par le pâturage et la fertilisation organique et minérale).

Le stockage du carbone

Il va dépendre à la fois de l'érosion des MO du sol (en réalité peu abondante si on maîtrise l'érosion en nappe : ROOSE et BARTHÈS, 2006), de la minéralisation des MO du sol (rapide en milieu humide et chaud, ce qui ne dure pas toute l'année en milieu méditerranéen froid l'hiver et sec l'été chaud) et surtout des apports de biomasse fraîche à la surface du sol (peu abondants dès lors que les animaux circulent partout) et dans le sol (racines des plantes annuelles). Dans le Rif marocain, en milieu forestier naturel, le stock de carbone du sol sur 30 cm peut atteindre 100 t/ha/30 cm sur les sols argileux saturés en calcium (MO = > 2 à 4 % sous la litière), mais diminue de 25 % sous matorral surpâturé, et de 50 % sous cultures sarclées (SABIR *et al.*, 2004).

Après 5 à 10 ans d'expérimentation, *la teneur en carbone* de l'horizon superficiel varie de 0,6 à 1,2 % dans l'ensemble des sols testés, quel que soit le type de sol, à part à Tlemcen où le sol brun calcaire de Madjouj atteint 1,9 à 3,3 % sous diverses jachères arbustives. Le mode d'utilisation de la terre affecte plus clairement le taux de carbone et le stock de carbone des dix premiers centimètres que le type de sol. Les taux de MO sont les plus bas sur sol nu et les plus hauts sous jachère ou matorral mis en défens. Sous culture, le taux de MOS n'est pas toujours le plus élevé sous culture améliorée, fertilisée (MORSLI *et al.*, 2006).

Le stock de carbone organique contenu dans les dix premiers centimètres des sols varie de 9 à 18 t/ha, sauf sur le sol brun calcaire de Tlemcen où il atteint le double sous matorral dense (tabl. 4). Ces sols sont situés en bas de pente et

reçoivent pas mal d'eau, de débris végétaux et parfois les déjections laissées par les animaux au pâturage : ceci a permis le développement d'une forte biomasse et l'amélioration du stock de carbone du sol.

Le stock de carbone est le plus faible sous jachère nue : il est généralement amélioré sur cultures fertilisées (+ 5 %) et sous matorral ou jachère protégée (+ 44 %) : le pâturage le réduit systématiquement (- 4 à - 28 %). Les valeurs de stock de MO sont souvent plus faibles (9 à 18 t/ha/10 cm) dans les stations testées en Algérie que dans le Rif marocain où il atteint 20 à 40 t/ha sur 10 cm sur des sols forestiers bruns calcaires, sauf à la station de Tlemcen où les valeurs sont équivalentes (21 à 37 t/ha) et sont peut-être le reflet d'un passé forestier plus récent. Le type et le taux de couverture végétale peuvent aussi influencer les stocks de carbone du sol.

Les pertes de stock de carbone furent suivies pendant 5 ans à Mascara et 10 ans à Tlemcen.

Sous jachère nue, le stock de carbone a perdu 160 à 820 kg de C/ha/an selon les sols.

Le pâturage des jachères ou des matorrals réduit logiquement les stocks de carbone du sol par rapport aux parcours en défens. Sous jachère et matorral en défens, le gain de stock varie de 330 à 750 kg C/ha/an. Le pâturage a fait perdre près de 400 kg/ha/an et la mise en défens a permis de gagner plus de 600 kg/ha/an. Sous cultures, le stock a peu varié : - 50 à - 80 kg sous légumineuses et - 30 à + 80 kg/ha/an sous céréales.

Les pertes de carbone par érosion furent modestes si on considère les fortes pentes testées : 19 à 136 kg sous jachère nue, de 0,1 à 42 kg sous cultures. Les pertes de MOS proviennent donc essentiellement du faible apport de litière fraîche qui ne peut compenser la minéralisation par les microbes. Les résidus de cultures des légumineuses étant plus riches en azote, minéralisent plus vite que les résidus de céréales. Les légumineuses sont aussi exploitées comme fourrages et laissent très peu de biomasse dans le sol. On comprend donc mieux que les associations de légumineuses avec les céréales améliorent la production végétale et les revenus des cultivateurs, mais assez peu les qualités du sol. Par contre, l'apport de litière plus riche en lignine des jachères forestières améliore nettement le stock de carbone de l'horizon de surface et toutes les propriétés qui y sont liées, en particulier la densité apparente, l'infiltration et la stabilité des agrégats (tableau 4).

Les propriétés physiques

La densité apparente du sol (mesurée au cylindre de 250 cm³) varie de 1,12 à 1,70 dans l'horizon superficiel en fonction des types de sol, du travail du sol et du couvert végétal. Dans les sols argileux vertiques, la densité apparente (dapp) varie autour de 1,30 entre les fissures, les sols bruns calcaires et les fersiallitiques atteignent 1,50-1,70. À l'intérieur de chaque groupe de

Tableau 4
Stock de carbone, de nutriments et propriétés physiques du sol sur 10 cm.

Station, sol, traitements	Stock de C t/ha	dapp	Is (Hénin)	Infiltration mm/h
Medea, vertisol				
Blé-jachère pâturée	9,4	1,30		
Blé-légumineuse fertilisée	8,8	1,30		
Médeja, brun calcaire				
Matorral pâturé	10,2	1,70		
Matorral enrichi en herbes	10,7	1,50		
Médeja, brun calcaire				
Vigne traditionnelle	10,0	1,20		
Vigne fertilisée + cult. associée	9,0	1,10		
Médeja, sol fersiallitique				
Abricotiers sur sol nu	10,7	1,51		
Abricotiers/blé + légumineuses	12,0	1,50		
Mascara, sol brun vertique argileux				
Jachère nue	13,8	1,35	0,8 à 1	04
Cultures	14-16	1,35	0,5 à 0,8	10
Jachère pâturée	15,4	1,36	0,6 à 0,8	09
Jachère en défens	16,1	1,31	0,4 à 0,6	14
Mascara sol brun calcaire				
Jachère nue	15,1	1,51	7 à 24	03
Cultures	15,7	1,51	4 à 8	10
Jachère pâturée	15,8	1,53	5 à 15	10
Jachère en défens	17,7	1,44	2 à 4	18
Tlemcen, sol vertique				
Jachère nue	10,5	1,31		
Blé + Jachère pâturée	11,7	1,30		
Blé fertilisé	13,4	1,30		
Tlemcen, brun calcaire				
Jachère nue	20,8	1,12		
Matorral surpâturé	26,7	1,16		
Matorral en défens	37,3	1,12		
Tlemcen, sol rouge fersiallitique				
Jachère nue	9,4	1,49		
Matorral surpâturé	10,3	1,51		
Matorral en défens	14,1	1,50		

parcelles (même sol), les jachères nues labourées et les céréales ont à peu près la même densité en fin de campagne ; par contre, le pâturage entraîne une augmentation de la densité du sol (tassement par les sabots) et la mise en défens, une diminution (activité de la faune et humification de la litière). L'amélioration de l'infiltration est liée à la diminution de la densité apparente (correspondant à une augmentation de la macroporosité de l'horizon superficiel), mais la présence d'une mince croûte de battance sur les sols nus, indétectable aux cylindres, peut modifier considérablement le ruissellement et donc l'infiltration. La pression des sabots des moutons et chèvres atteint 2 à 3 kg/cm² et celle des vaches, chevaux et ânes 5 à 7 kg/cm², soit deux fois plus que la pression des pneus des tracteurs et remorques. On comprend pourquoi dès qu'une jachère ou une forêt est dégradée par le parcours régulier du troupeau, la surface du sol est tassée en saison des pluies et pulvérisée (la structure est détruite) en saison sèche, ce qui entraîne la désorganisation des agrégats et la destruction des macropores par où les eaux de surface pénètrent et circulent rapidement dans les sols. La mise en défens de parcours a entraîné en 5 ans une amélioration de la stabilité des agrégats, de la densité apparente, de la pluie limite d'imbibition (P_i sur sol brun vertique augmente de 17 à 27 mm sur sol brun vertique et de 7 à 15 mm sur sol brun calcaire) et de l'infiltration limite (F_n de 10 à 18 mm/h sur sol saturé) en relation avec la surface fermée et la surface couverte des parcours (MORSLI et HAMOUDI, 2013).

Dans la station de Hériz (Tlemcen), les sols cultivés en blé intensif sur marnes sont pauvres en MO : leur structure est peu poreuse et peu stable. Le travail mécanisé peut contribuer au tassement du sol et exige beaucoup de précautions (MAZOUR, 1992).

Les nutriments

La plupart des sols testés sont riches en calcaire libre (à part les sols rouges lessivés) et les argiles saturées en calcium, donc la structure est assez stable. Le calcaire s'accumule souvent en profondeur et forme des amas friables, des nodules et/ou des encroûtements feuilletés. Le complexe absorbant est saturé et dominé par le calcium et le magnésium. Le pH est donc légèrement alcalin, ce qui va avoir une influence sur la disponibilité en phosphore assimilable. Le taux de MO est faible, du fait du labour qui accélère la minéralisation, mais sous couvert forestier (matorral), les horizons de surface sont bien pourvus en MO (3 à 4 %). Les sols étudiés en zone de culture sont carencés en phosphore assimilable ($P_2O_5 < 14$ ppm)

La mise en défens des parcours a entraîné une nette amélioration de l'azote total, du phosphore assimilable et du carbone des sols bruns calcaires et bruns vertiques (Morsli et Hamoudi, 2013, chap. 32 de cet ouvrage). L'accroissement par 2 ou 4 de l'azote et du phosphore des parcelles améliorées proviendrait de l'augmentation de la biomasse et de sa décomposition rapide ($C/N < 12$).

Discussion et conclusions

Les mesures en un réseau de 50 parcelles d'érosion (100 m²) situées sur pentes fortes sur quatre sols représentatifs des montagnes moyennes du nord-ouest de l'Algérie ont confirmé qu'il est techniquement possible d'intensifier la production végétale dans ces milieux semi-arides (300 à 600 mm), tout en réduisant les risques de ruissellement et d'érosion, même lors des plus fortes averses.

Étant donné l'insécurité qui a régné dans certaines zones du pays, on n'a pas relevé et analysé autant d'échantillons qu'il aurait fallu pour démontrer la vitesse avec laquelle les propriétés physiques et biochimiques du sol s'améliorent.

Cependant, les résultats disponibles après 5 à 10 ans d'expérimentation montrent bien l'influence de l'usage des terres sur leur capacité à produire et sur les propriétés physiques et biochimiques du sol qui déterminent leur fertilité, en particulier la séquestration du carbone. Quel que soit le type de sol, les parcours et les jachères nues ou surpâturées entraînent des taux de matières organiques des sols et de NPK les plus faibles. Par contre, les sols sous jachère ou matorral mis en défens ou enrichis en légumineuses qui accumulent en surface une litière morte ou un tapis d'adventices sont les moins sujets au ruissellement (bonnes propriétés physiques) et à l'érosion (accumulation d'humus et de nutriments assimilables) : ces matières organiques disponibles en surface favorisent les activités de la faune (vers de terre, termites et population microbienne) qui vit dans les horizons humifères superficiels et y organise un réseau de pores améliorant l'infiltration. Les sols cultivés évoluent plus lentement vers un enrichissement de l'horizon labouré ou vers un appauvrissement en fonction du bilan des apports de résidus de culture, d'engrais organiques et minéraux et des pertes par érosion, mais surtout par exportation des graines et des pailles récoltées. Les améliorations les plus spectaculaires des propriétés des sols ont eu lieu sur des parcours et des matorrals en défens, donc des sols non labourés ; cependant, nous n'avons pas eu l'occasion de tester les techniques de semis direct sous litière. Il semble cependant que si techniquement cette approche semble possible, même en zones semi-arides (Mrabet, chap. 27 dans cet ouvrage), le manque de fourrage et les habitudes d'élevage en liberté en saison sèche réduisent les chances de garder une litière suffisante à la surface des sols à l'époque des semis.

Ces résultats confirment les observations selon lesquelles en milieu méditerranéen, la restauration de la couverture végétale est plus rapide que la restauration de la fertilité des sols. La nutrition raisonnée des plantes cultivées en fonction du milieu accélère la production de biomasse exploitable et la restauration du taux d'humus de l'horizon superficiel des sols : la correction des carences du sol serait trop coûteuse, car les stocks à pourvoir sont énormes et les nutriments risquent d'être bloqués par les carbonates et les métaux libres contenus dans ces sols. L'hétérogénéité des sols est si grande et le poids des horizons arables si élevé par rapport aux apports de nutriments, qu'il est bien difficile de le mettre en évidence. Pour des raisons économiques, il faut viser à améliorer la nutrition

des plantes cultivées, plutôt que de tenter de corriger toutes les carences des sols, d'autant plus que les sols sont soumis à des pertes de nutriments par érosion, par drainage, par exportation des récoltes et surtout par minéralisation des matières organiques des sols. Ces pertes sont d'autant plus fortes que les horizons de surface sont enrichis en nutriments.

Bibliographie

- ARABI M., 1991** – *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie)*. Thèse géographie, univ. Grenoble, 272 p.
- ARABI M., ROOSE E., 1992** – Influences de quatre systèmes de production de moyenne montagne méditerranéenne algérienne. In ISCO Conf. Proc. 3, 3 : 341-347.
- ARABI M., KEDAID O., ASLA T., BOUROUGAA L., ROOSE É., 2004** – Bilan de l'enquête sur la défense et restauration des sols (DRS) en Algérie. *Sécheresse*, 15 : 87-95.
- BRAHAMIA K., 1993** – *Essai sur la dynamique actuelle dans la moyenne montagne méditerranéenne : bassin versant de l'oued Mina, Algérie*. Thèse géographie, univ. Grenoble, 241 p.
- CHEBBANI R., MEDEDJEL N., BELAIDI S., 1995** – Application de la GCES dans la région de Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 15 : 489-497.
- CLAUZON G., VAUDOUR J., 1969** – Observations sur les effets de la pluie en Provence, France. *Annales de Géographie*, 13 (4) : 390-405.
- DELHOUME J. P., 1981** – *Études en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (Djebel Semmama)*. Tunis, Orstom-DRE, 187 p. ou In : *Processus et mesure de l'érosion*, 1987, CNRS : 487-507.
- DEMMAK A., 1982** – *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie*. Thèse doct. ing., Paris VI, 323 p.
- HEDDADJ D., 1997** – La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 17 : 168-175.
- HEUSCH B., 1970** – L'érosion du Pré-Rif. Étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental, Maroc. *Annales Recherches Forestières au Maroc*, 12 : 9-176.
- HEUSCH B., 1986** – Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 153-162.
- KALMANN R., 1976** – *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou*. Projet Sebou, Rabat, 40 p.
- LAOUINA A., 1992** – Recherches actuelles sur les processus d'érosion au Maroc. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 292-299.
- LAOUINA A., 1998** – Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull. Réseau Érosion*, 18 : 33-53.
- MARTIN CL., 1975** – L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal. *Rev. Géomorphologique Dynamique*, 24 : 49-63.
- MAZOUR M., 1992** – Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin de l'oued Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 300-313.
- MEDEDJEL N., 1995** – Étude du comportement des sols à caractères vertiques sous l'apport de compost urbain et d'engrais. *Documentation INRF, « Préservation et valorisation des terres de montagne*», Alger : 74-77.
- MORSLI M., 1995** – *Les sols de montagne et leur susceptibilité à l'érosion : cas des monts de Beni-Chougrane*. Thèse de magistère, INA Alger, 170 p.
- MORSLI B., MAZOUR M., MEDEDJEL N., HAMOUDI A., ROOSE É., 2004** – Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du NO de l'Algérie. *Sécheresse*, 15 (1) : 96-104.

- MORSLI B., MAZOUR M., ARABI M., MEDEJEL N., ROOSE É., 2006** – « Influence of land use, soils, and cultural practices on erosion, eroded carbon and soil carbon stocks at the plot scale in the Mediterranean mountains of northern Algeria ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics*, Advances in Soil Science, CRC, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA : 103-124.
- MORSLI B., HAMOUDI A., 2013** – « Restauration des terres de parcours dans les Monts de Beni-Chougrane (NO Algérie) : mise en défens et enrichissement en légumineuses ». In Roose É. (éd.) : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Montpellier, IRD Éditions, 9 p.
- MRABET R., 2013** – « Potentiel du semis direct sous litère pour restaurer les sols cultivés en zones semi-arides du Maroc ». In Roose É. (éd.) : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Montpellier, IRD Éditions, 10 p.
- PIHAN J., 1978** – *Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité des pluies de Wischmeier relative aux stations officielles de la Météorologie nationale*. Rennes, Lab. Inra-Univ. Haute Bretagne, 110 p.
- POESEN J., 1984** – The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeit. Geom. Suppl. Bd*, 49 : 117-131.
- ROOSE É., 1972** – « Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne ». In : *Journées d'études du génie rural*, Florence, Italie, : 417-441.
- ROOSE É., 1977** – *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 78, 108 p.
- ROOSE É., 1987** – Évolution des stratégies de LAE. Nouvelle démarche proposée en Algérie : la GCES. *Bull. Réseau Érosion*, Montpellier, IRD, 7 : 91-96.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO*, Rome, 70, 420 p.
- ROOSE É., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993** – Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 289-308.
- ROOSE É., CHEBBANI R., BOURUGAA L., 2000** – Ravinement en Algérie : typologie, contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, 11 (3) : 317-326.
- ROOSE É., BARTHÈS B., 2006** – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics*, Advances in Soil Science, CRC, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA : 55-72.
- SABIR M., BARTHÈS B., ROOSE É., 2004** – Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15 (1) : 105-110.
- SACCARDY L., 1950** – Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et Eaux*, 11 : 3-19.
- WISCHMEIER W., SMITH D., 1960** – *Predicting rainfall erosion losses. A guide to solve conservation planning*. Washington, USDA, Handbook, 537, 58 p.

Adaptations de l'agriculture à l'aridité dans les îles Canaries

De la collecte du ruissellement au mulch de pierres volcaniques

Marisa TEJEDOR

Conception JIMÉNEZ

Francisco DÍAZ

Introduction

Les Canaries (27° 37' lat. N et 13° 20'-18° 10' long. W) sont situées à environ 100 km de la côte africaine. L'archipel est formé de sept îles volcaniques de hauteur décroissante : Tenerife (3 718 m), La Palma (2 426 m), Grande Canarie (1 949 m), La Gomera (1 487 m), El Hierro (1 500 m), Fuerteventura (807 m) et Lanzarote (670 m).

Le climat varie entre le climat tempéré marin et le climat tropical et comprend de nombreux microclimats locaux en fonction de l'altitude, des vents du nord-est et des vents chauds d'altitude, de la proximité de l'Afrique et du courant froid des Canaries. La face nord des zones montagneuses est soumise aux vents humides et froids, tandis que les vents du Sud sont chauds et secs. Fuerteventura et Lanzarote sont trop basses pour profiter des vents humides : leur climat est donc aride. Tenerife montre une série de régimes hydriques du sol en fonction de son altitude : aride, ustic, udic, xeric (N) et aridic au Sud. Le régime thermique varie beaucoup de hyperthermique, isothermique, isomesic, mesic au Nord et hyperthermic et thermique au Sud. Au-dessus de 3 000 m, le régime est cryic. Sous conditions naturelles, les sols de Lanzarote et Fuerteventura ont des régimes aridic et hyperthermic.

De vieux matériaux Miocène coexistent avec toute une série de matériaux volcaniques. La dernière éruption sur terre eut lieu à La Palma en 1971 et sous la mer en 2012 au large de El Hierro. On trouve aussi des dépôts alluviaux et des sables marins éoliens sur certaines îles.

Les systèmes de conservation de l'eau et des sols (CES) décrits ici sont pratiqués dans les zones les plus arides et au sud des îles montagneuses. Les précipitations moyennes ne dépassent pas 150 mm/an et sont concentrées en quelques événements avec une grande variabilité interannuelle. La température moyenne varie autour de 20 °C avec de grosses fluctuations entre le jour et la nuit. Le vent souffle constamment. Le soleil luit durant 7 à 8 heures/jour et l'ETP tourne autour de 1 800 mm/an. D'après la convention des Nations unies pour combattre la désertification, la zone court de gros risques de désertification avec un rapport Pluies/ETP de 0,08.

Les sols les plus anciens sont des Aridisols (Calcids, Argids, Salids) correspondant aux formations paléo-édaphiques qui reflètent les fluctuations climatiques du Quaternaire. Les Entisols sont aussi présents (Psamments, Fluvents, Orthents). Les Andisols et Vertisols sont moins fréquents.

Les ressources en eau sont extrêmement limitées. Les eaux de surface sont collectées dans des barrages, des réservoirs et des citernes, lesquels sont souvent remplis de sédiments, tandis que les eaux de nappe riches en Na Cl sont tirées des puits. La rareté des eaux a entraîné récemment l'application de méthodes de désalinisation et purification des eaux de mer, de nappes et de puits, ainsi que le recyclage des eaux usées. Aujourd'hui, 100 % des eaux de consommation humaine de Fuerteventura et Lanzarote sont désalinisées. Cependant, l'agriculture pluviale a été pratiquée depuis des lustres, associée à des techniques traditionnelles de CES qui seront décrites ici. Ces systèmes peuvent être classés en deux groupes : la capture du ruissellement et le mulch minéral de graviers volcaniques.

Les pratiques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols

L'agriculture sous capture du ruissellement

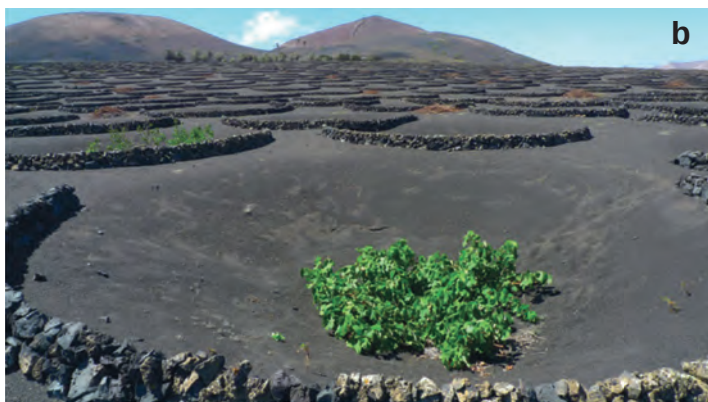
Elle a été utilisée depuis des millénaires dans les zones arides et semi-arides en Afrique, Amérique et Asie, là où l'eau est le facteur limitant de la production de cultures (ROOSE, 1994 ; DOOLITTLE, 2000 ; TESFAI et STROOSNIJDER, 2001 ; PANDEY *et al.*, 2003 ; PRASAD *et al.*, 2004 ; AVNI *et al.*, 2006 ; SANDOR *et al.*, 2007 ; ROOSE *et al.*, 2011). Malgré une grande diversité de formes, les systèmes

de capture du ruissellement appliquent toujours la même stratégie d'amélioration de la disponibilité en eau des cultures en capturant le ruissellement généré durant les averses sur des parcelles planées et damées situées en amont des cultures (BEN-ASHER et BERLINER, 1994). Une grande quantité d'eau peut être stockée profondément dans le profil du sol cultivé, permettant de produire des cultures sans irrigation malgré le climat aride et sans utiliser d'engrais. En effet, le ruissellement capté apporte non seulement l'eau nécessaire, mais aussi des sédiments fertiles et riches en MO arrachés au sol de l'impluvium, renouvelant ainsi la fertilité du sol cultivé (TESFAI et STERK, 2002). Dans les îles extrêmement arides de Lanzarote et Fuerteventura, un de ces systèmes connu sous le nom de « *gavias* » a permis la production agricole durable depuis plus de deux siècles sans irrigation ni engrais organique ou minéral.

Ce système « *gavias* » occupe environ 7 300 ha sur les deux îles : il peut être classé comme un système agricole à « macrobassins » (TAUER et HUMBORG, 1992 ; LOVENSTEIN, 1994) dont le rapport surface impluvium/surface cultivée varie de 8/1 à 50/1. Sur des pentes de 20 à 80 %, la présence de croûtes de battance réduisant l'infiltration ou d'une croûte calcaire et d'une faible couverture végétale (10 à 20 %) tout cela entraîne le ruissellement même à des faibles intensités des pluies considérées comme non érosives. Ainsi, JIMÉNEZ *et al.* (2002), rapportent que l'intensité de pluie de 10 mm/h est suffisante pour déclencher du ruissellement capté par ce système. L'impluvium est aménagé en parcours léger pour des chèvres pour maintenir un couvert végétal faible d'herbes annuelles et de buissons de xérophytes (*Lansea arborescens*, *Salsola vermiculata*).

La configuration des parcelles de « ruissellement-capture » dans les îles est montrée sur la photo a. Le ruissellement pendant les averses est capté par des drains et redistribué dans les zones plates par des canaux de diversion dans les parcelles entourées de murs de terre de 0,5 à 3 m de hauteur. Les parcelles cultivées sur les glaciis sont orientées perpendiculairement à la pente : elles peuvent atteindre 600 à 10 000 m². Chaque parcelle a une entrée réglable par des planches pour contrôler le volume d'eau et un seuil pour drainer les excès. Ces parcelles sont généralement groupées en terrasses, appelées « *rosas* », de telle sorte que chaque parcelle est située un peu en contrebas de la parcelle directement en amont et reçoit de l'eau du drain principal, mais aussi l'excédant ruisselant de la parcelle amont. Généralement, les paysans choisissent quelle parcelle sera inondée lors de chaque averse en jouant sur le seuil de sortie. Par conséquent, avec les années, le taux de sédiment est supposé homogène dans toutes les parcelles d'un groupe. Les sols les plus fréquemment cultivés sont classés en Torrifluvent, Paleargids, Calciargids, Natrargids, Haplocalcids et Petrocalcids : leur texture en surface varie de limons à argile limoneuse (JIMÉNEZ *et al.*, 2002).

Une fois le ruissellement retenu sur les parcelles, l'eau s'infiltre dans le profil permettant la croissance des plantes, mais aussi la recharge des nappes. Les pluies erratiques et peu abondantes arrivent cependant à produire du



a : exemple de capture du ruissellement (= gavias) dans l'île de Fuerteventura, Canaries, Espagne.

© M. Tejedor

b : type « d'arenados », champs couvert de cendres volcaniques, aménagé en entonnoir planté en vignes ou en figuiers.

© M. Tejedor

c : arenados billonné, irrigué par goutte à goutte et planté en oignons : île de Lanzarote, Canaries, Espagne.

© M. Tejedor

ruissellement au moins une fois par an. Les cultures doivent donc réaliser tout leur cycle à partir de l'eau stockée dans le profil. Même lors des années les plus sèches ($p < 100$ mm), le système des « *gavias* » permet de stocker près de 350 mm dans le mètre supérieur du profil, ce qui correspond à environ 150 mm d'eau disponible pour la culture. Dès que les eaux du *gavia* sont infiltrées, les champs sont cultivés en céréales (*Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, *Zea mays*) et en légumineuses (*Lens esculenta*, *Cicer arietinum*, *Phaseolus lunatus*, *Medicago sativa*). Généralement, on observe une rotation avec des légumineuses tous les trois ans. Les rendements dans les *gavias* sont relativement bas et très variables en fonction des disponibilités en eau : le blé produit en moyenne 1,2 t/ha de grains.

Le tableau 1 compare les propriétés chimiques et physiques des 25 cm supérieurs des *gavias* et des sols adjacents non cultivés. La conductivité électrique et le Na échangeable sont significativement plus bas sur *gavias* cultivés que sur les sols non cultivés, tandis que le pH et Ca + Mg échangeables sont plus hauts sur *gavias*. Ceci montre le lessivage des sels Na lors de l'inondation des parcelles de *gavias* : la dissolution des carbonates de calcium apporte probablement le calcium nécessaire pour déloger le sodium. Le pH élevé provient de l'incorporation de sédiments riches en bases des couches voisines du bassin versant. Les sols cultivés sur *gavias* sont généralement plus riches en argiles et limons, tandis que les parcelles non cultivées sont plus sableuses : cela s'explique par l'apport de particules fines en suspension dans le ruissellement. Cet apport de particules fines entraîne aussi une capacité d'échange de base (CEC) plus élevée. Le taux de carbone, le phosphore assimilable, le K échangeable et le fer extrait au DPTA

Tableau 1

Propriétés chimiques et physiques de l'horizon superficiel (25 cm) dans des sols aménagés pour capturer le ruissellement et des sols non cultivés ; $n = 40-41$; moyennes $\pm$ deviation standard ; asterisque derrière les valeurs indique les différences significatives ($p < 0,05$).

Site/paramètre	Ruissellement sur sols aménagés	Ruissellement sur sols non aménagés	Site/paramètre	Ruissellement sur sols aménagés	Ruissellement sur sols non aménagés
EC _e dS m ⁻¹	1,8 $\pm$ 1,3	51,0 $\pm$ 44,3*	TN g kg ⁻¹	0,7 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,2*
pH _e	8,1 $\pm$ 0,2	7,5 $\pm$ 0,5*	Olsen-P mg kg ⁻¹	13,3 $\pm$ 7,4	11,7 $\pm$ 6,2
Exch. Ca cmol _c kg ⁻¹	16,6 $\pm$ 3,8	14,5 $\pm$ 4,2*	Fe mg kg ⁻¹	20,9 $\pm$ 6,7	24,4 $\pm$ 14,2
Exch. Mg cmol _c kg ⁻¹	7,4 $\pm$ 2,8	5,0 $\pm$ 3,2*	Mn mg kg ⁻¹	19,5 $\pm$ 8,9	14,3 $\pm$ 10,0*
Exch. K cmol _c kg ⁻¹	2,8 $\pm$ 0,6	3,2 $\pm$ 1,0	Cu mg kg ⁻¹	3,3 $\pm$ 0,7	2,7 $\pm$ 0,9*
Exch. Na cmol _c kg ⁻¹	2,6 $\pm$ 1,3	9,8 $\pm$ 7,7*	Zn mg kg ⁻¹	2,2 $\pm$ 0,6	1,9 $\pm$ 0,5*
CEC cmol _c kg ⁻¹	27,9 $\pm$ 7,5	24,1 $\pm$ 8,8*	B mg kg ⁻¹	3,2 $\pm$ 1,8	5,8 $\pm$ 4,8*
ESP %	11,1 $\pm$ 2,6	30,6 $\pm$ 15,2*	Clay g kg ⁻¹	403 $\pm$ 122	308 $\pm$ 143*
CaCO ₃ g kg ⁻¹	185 $\pm$ 36	182 $\pm$ 49	Silt g kg ⁻¹	471 $\pm$ 75	388 $\pm$ 121*
Organic C g kg ⁻¹	4,8 $\pm$ 1,6	4,2 $\pm$ 1,8	Sand g kg ⁻¹	128 $\pm$ 86	305 $\pm$ 137*

ne sont pas statistiquement différents. Cependant, le N total, le manganèse, le cuivre et le zinc extraits au DPTA sont significativement supérieurs, ce qui montre qu'ils sont arrachés par l'érosion dans le bassin en amont, et déposés dans les *gavias*, ce qui équilibre les pertes et exportations de nutriments lors des cultures (DÍAZ *et al.*, 2011).

Grâce à des pièges à sédiments disposés dans 14 parcelles, DÍAZ *et al.* (2011) ont observé que l'épaisseur des sédiments déposés varie de 2 à 8 mm, soit en moyenne 46,1 t/ha/an. Cependant, cette épaisseur varie en fonction de l'intensité des pluies, facteur explicatif majeur du ruissellement et de l'érosion. Ces dépôts frais cumulés depuis des années entraînent l'approfondissement des sols cultivés et des profils moins contrastés, moins évolués, car la sédimentation est plus rapide que la formation naturelle du sol. La teneur en argile et limons représente plus de 80 % de la texture des *gavias* cultivés.

L'analyse chimique de ces sédiments permet de calculer les apports de nutriments par le ruissellement. On estime à 76,7 kg de C et 8,7 kg de N par mm de sédiment/ha. L'apport annuel de N total varie autour de 33,6 kg/ha/an. L'apport de phosphore assimilable (Olsen) varie de 0,11 à 0,48 kg/ha/mm de sédiment. Le contenu en P total d'un millimètre de sédiment varie de 3 à 16 kg/ha/mm de sédiment, soit une moyenne de 35,3 kg/ha/an de P total. Les sédiments apportés par le ruissellement sont riches en bases, principalement du Ca et Mg. L'apport de calcium varie entre 27,6 et 58,9 kg de Ca et 5,7 à 16,6 kg de Mg par hectare et par millimètre de sédiments. Cet apport de cations bivalents est très important dans ces sols souvent affectés par la sodification, car ils chassent le Na du complexe absorbant. L'apport annuel de K atteint en moyenne 48,8 kg/ha/an. L'apport des micro-nutriments (Fe, Mn, Cu, Zn) s'élève à 0,13-0,18-0,04 et 0,01 kg/mm de sédiments/ha. Tous ces nutriments associés aux sédiments, au ruissellement, à la fixation biologique de N avec les légumineuses et aux dépôts éoliens maintiennent durablement la fertilité de ces sols cultivés malgré la minéralisation des MO, le lessivage dans les eaux de drainage, la dénitrification et l'exportation des nutriments par les récoltes.

L'agriculture sous mulch de cailloux

C'est une technique agricole qui existe depuis des millénaires dans diverses zones arides et semi-arides du monde. Elle consiste à couvrir la surface du sol par une couche de pierres dans le but principal de conserver l'eau (MODAIHSH *et al.*, 1985 ; NACHTERGAELE *et al.*, 1998 ; LIGHTFOOT, 1994 ; DOOLITTLE, 1998 ; PÉREZ, 2009). Bien que cette technique ait permis une augmentation du rendement des cultures et une extension à des terres marginales, elle reste confinée à de petites surfaces et est abandonnée après une période relativement courte. Les auteurs pensent que c'est dû à un changement climatique, à une perte de fertilité ou même à l'érosion décapante (BERLIN *et al.*, 1990 ; LIGHTFOOT, 1994 ; DOOLITTLE, 1998). Mais certaines de ces techniques subsistent encore dans les

îles Canaries. Comme mulch on utilise les produits pyroclastiques volcaniques, basaltiques à Lanzarote et Fuerteventura, des pierres ponce à Ténériffe et des sables marins organiques à Lanzarote.

À Lanzarote et Fuerteventura, la vieille tradition de l'usage de tephra (pyroclastes basaltiques) comme mulch a permis une certaine extension de la culture pluviale. Grâce à la proximité des carrières de produits volcaniques pyroclastiques et des sols agricoles, 14 214 ha de ce mode de culture sont rentables. Cette technique nommée « *arenados* » est probablement née à la période 1730-1736, en même temps que les éruptions de Lanzarote. QUINTANA et DE LEÓN (2000) ont retrouvé des cultures selon cette technique jusqu'en 1733 (voir photos b, c).

À Lanzarote, près des cônes volcaniques, on trouve des *arenados naturels*. Lorsque la couche de cendres est épaisse, les fermiers creusent des trous de 3 m de diamètre jusqu'au sol primitif, ajoutent du fumier avant de planter des vignes ou des figuiers et les entourent souvent de murettes de basalte de telle sorte que la culture est bien ancrée dans le sol et protégée du vent. Ces paysages typiques sont appelés « *Geria* ».

À Lanzarote et Fuerteventura, des *arenados artificiels* sont établis par les fermiers sur des terres qui n'ont pas été recouvertes par les cendres lors des éruptions volcaniques. Il s'agit souvent de champs de capture du ruissellement « *gavias* » ou des terres trop pauvres qui reçoivent une couche de tephra volcaniques extraits de carrières. L'épaisseur de cette couche varie de 5 à 20 cm, le plus souvent autour de 10 cm. Auparavant, le sol est couvert de 3 cm de fumier. La durée de ce système est de 25 à 30 ans, après quoi le mulch doit être remplacé. Les cultures les plus fréquentes sont : les oignons, les patates, les patates douces, les potirons, le maïs, les haricots et les lentilles. La production est relativement élevée : 10 t/ha/an d'oignons et 7 t/ha de patates.

Le système du mulch de pyroclaste basaltique améliore les conditions pédo-logiques en augmentant l'infiltration et en réduisant l'évaporation, la salinisation et la sodification. Des mesures en laboratoire sous simulation de pluies, avec des pyroclastes basaltiques moyens (D médian = 2 à 4 mm) sur un sol argileux ont montré que l'intensité d'infiltration double et que le stock d'eau infiltré triple. Sur le sol non mulché, le ruissellement commence déjà après 3 minutes, mais seulement après 28 minutes sur parcelle mulchée (TEJEDOR *et al.*, 2003a). En effet, le mulch de tephra réduit l'action directe des gouttes de pluie, la rupture des agrégats, le remplissage des pores et la formation d'une croûte de battance qui réduit considérablement l'infiltration et le temps de la naissance du ruissellement (VALENTIN, 1991 ; LE BISSONNAIS et SINGER, 1992 ; ROOSE, 1994).

DÍAZ *et al.* (2005) ont conduit des essais en laboratoire sur l'influence de l'épaisseur (2, 5 et 10 cm) et la texture des mulch sur l'évaporation du sol. Un sol typique de Lanzarote (silty clay Haplocambids) a été choisi. Un mulch de 5 cm fut choisi pour comparer l'effet des pyroclastes basaltiques fins, moyens et grossiers. Le sol a été saturé, drainé jusqu'à 50 % de son poids d'eau, puis soumis à l'évaporation pendant 31 jours à raison de 10 ± 1 mm/j., tenant compte

du climat aride. Tous les échantillons couverts de mulch ont réduit l'évaporation de 92 % si leur épaisseur est de 10 cm, de 83 % pour 5 cm, de 52 % pour 2 cm. Tous les mulch de 5 cm, quelle que soit leur texture ont réduit l'évaporation de 81 à 85 %. Ces effets sur l'infiltration et l'évaporation sont reliés aux caractéristiques des pyroclastes utilisés qui ont des particules plus grossières et plus perméables que le sol en place, une très faible capacité de stockage de l'eau et une faible conductivité thermique. Toutes ces propriétés font de ce matériau un excellent mulch pour valoriser les rares averses.

L'amélioration du régime hydrique du sol a un effet direct sur la salinité au voisinage des racines. TEJEDOR *et al.* (2003b) ont montré que les sols couverts de 15 cm de pyroclastes depuis 20 ans montrent des conductivités électriques et des taux de Na échangeables nettement plus faibles que les sols voisins non couverts ($EC = 1,5$ au lieu de 43 dSm^{-1} et $ESP = 9$ au lieu de 44). Ces résultats furent confirmés sur deux sols salés argileux ou limoneux, à partir du moment où ils furent recouverts d'un mulch (TEJEDOR *et al.*, 2007). Pendant quatre ans, on a suivi l'évolution à court terme de la salinité après couverture des sols par 12 cm de mulch de basalte pyroclastique. La pluviosité annuelle a varié autour de 130 mm/an. La salinité des 40 premiers centimètres a baissé de 76 et 86 % sur ces deux sols. Le mulch a augmenté l'infiltration et réduit l'évaporation et les remontées du Na^+ et des autres sels. L'augmentation de la dilution de la solution du sol a favorisé le lessivage du Na^+ et la dissolution des sels calciques, ce qui explique la désodisation et la désalinisation du sol.

Des variantes du système *arenados* qui utilisent d'autres matériaux minéraux comme mulch sont développées dans le sud de Tenerife et au centre de Lanzarote. Ces *jables* occupent 3 800 ha à Tenerife et 5 430 ha à Lanzarote : ces sols sont couverts de 20 à 60 cm de pierres ponce : les patates et la vigne sont les principales cultures. À Lanzarote, ces sols sont couverts d'une épaisseur variable de sables éoliens marins : si leur épaisseur est inférieure à 1 m, on y cultive des patates douces et des potirons.

Conclusions

Les systèmes traditionnels agricoles ont eu un rôle clé dans l'histoire récente des zones arides des Canaries. Pourtant, la grande variabilité interannuelle de la pluviosité et les sécheresses prolongées ont entraîné maintes fois une très basse production des cultures non irriguées. Les systèmes décrits demandent peu de technologie ou de capital, mais beaucoup de main-d'œuvre pour leur construction et leur entretien, surtout pour les *gavias*. Considérant ces aspects socio-économiques et l'arrivée des touristes, plus de 50 % des surfaces aménagées avec ces techniques ont été abandonnées progressivement durant ces dernières décennies.

Les systèmes étudiés présentent un haut degré d'adaptation au milieu et conservent bien les sols et l'eau, ressources très limitées en milieu aride. On peut les considérer comme des agrosystèmes durables. Ils ont un intérêt pour la production agricole, mais aussi pour la conservation des sols et contre la désertification. Ces agrosystèmes sont associés à l'identité de ces îles et font partie du paysage et du patrimoine culturel.

Ces dernières décennies, le tourisme est à l'origine de nouvelles ressources non conventionnelles en eau à travers la désalinisation et le recyclage des eaux usées qui peuvent être utilisées pour irriguer ces zones de culture en sec. Les effets bénéfiques du mulch sur la qualité des sols ont permis le développement d'une agriculture irriguée plus productive qui combine les nouvelles technologies agricoles avec les avantages des techniques traditionnelles.

Bibliographie

- AVNI Y., PORAT N., PLAKHT J., AVNI G., 2006 – Geomorphic changes leading to natural desertification *versus* anthropogenic land conservation in an arid environment, the Negev Highlands, Israel. *Geomorphology*, 82 : 177-200.
- BEN-ASHER J., BERLINER P. R., 1994 – « Runoff irrigation ». In Tanji K. K., Yaron B. (eds) : *Management of Water Uses in Agriculture*, Berlin, Springer, Advanced Series in Agricultural Sciences, 22 : 127-155.
- BERLIN G. L., SALAS E., GEIB P. R., 1990 – A prehistoric Sinagua agricultural site in the ashfall zone of Sunset Crater, Arizona. *Journal of Field Archaeology*, 17 : 1-16.
- DÍAZ F., JIMÉNEZ C., TEJEDOR M., 2005 – Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. *Agricultural Water Management*, 74 (1) : 47-55.
- DÍAZ F. J., TEJEDOR M., JIMÉNEZ C., DAHLGREN R. A., 2011 – Soil fertility dynamics in runoff-capture agriculture, Canary Islands, Spain. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 144 : 253-261.
- DOOLITTLE W., 1998 – Innovation and diffusion of sand and gravel-mulch agriculture in the American Southwest: a product of the eruption of Sunset crater. *Quaternaire*, 9 (1) : 61-69.
- DOOLITTLE W. E., 2000 – *Cultivated Landscapes of Native North America*. New York, Oxford University Press.
- GALE W. J., MC COLL R. W., FANG X., 1993 – Sandy fields traditional farming for water conservation in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48 (47) : 4-477.
- JIMÉNEZ C., TEJEDOR M., DÍAZ F., 2002 – Runoff harvesting systems in the Canaries. *Tropical Resources Managements Papers*, 40, Wageningen, The Netherlands : 41-48.
- LE BISSONNAIS Y., SINGER M., 1992 – Crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Science Society of America Journal*, 56 : 1898-1903.
- LIGHTFOOT D. R., 1994 – Morphology and ecology of lithic-mulch agriculture. *Geographical Review*, 84 : 172-185.
- LIGHTFOOT R., EDDY W., 1994 – The agricultural utility of lithic-mulch gardens: past and present. *GeoJournal*, 34 : 425-437.
- LOVENSTEIN H., 1994 – From water harvesting to crop harvesting: opportunities for efficient use of runoff water by crops. Water harvesting for improved agricultural production. *FAO Water Reports*, 3 : 301-314.

- MODAIHS A. S., HORTON R., KIRHAM D., 1985** – Soil water evaporation suppression by sand mulches. *Soil Science*, 139 (4) : 357-361.
- NACHTERGAELE J., POESEN J., VAN WESEMAEL B., 1998** – Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil & Tillage Research*, 48 : 51-59.
- PANDEY D. N., GUPTA A. K., ANDERSON D. M., 2003** – Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Current Science*, 85 : 46-59.
- PRASAD R., MERTIA S., NARAIN P., 2004** – Khadin cultivation: a traditional runoff farming system in Indian Desert needs sustainable management. *Journal of Arid Environments*, 58 : 87-96.
- PÉREZ F. L., 2009** – The role of tephra covers on soil moisture conservation at Haleakala's crater (Maui, Hawaii). *Catena*, 76 : 191-205.
- QUINTANA A. P., DE LEÓN HERNÁNDEZ J., 2000** – « Los resabios del volcán: los lanzaroteños desplazados a Fuerteventura entre 1730-1736 ». In : *IX Jornadas de Estudios sobre Fuerteventura y Lanzarote. Tomo I Historia, Prehistoria* : 227-247.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique de la FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2011** – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.
- SANDOR J. A., NORTON J. B., HOMBURG J. A., MUENCHRATH D. A., WHITE C. S., WILLIAMS S. E., HAVENER C. I., STAHL P. D., 2007** – Biogeochemical studies of a native American runoff agroecosystem. *Geoarchaeology – An International Journal*, 22 : 359-386.
- TAUER W., HUMBORG G., 1992** – *Runoff irrigation in the Sahel zone: remote sensing and geographical information system for determining potential sites*. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation, ACP-EEC, 192 p.
- TEJEDOR M., JIMÉNEZ C., DÍAZ F., 2003a** – Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma*, 117 (3-4) : 283-295.
- TEJEDOR M., JIMÉNEZ C., DÍAZ F., 2003b** – Use of volcanic mulch to rehabilitate saline-sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 67 : 1856-1861.
- TEJEDOR M., JIMÉNEZ C., DÍAZ F., 2007** – Rehabilitation of saline soils using volcanic material coverings. *European Journal of Soil Science*, 58 : 490-495.
- TESFAI M., STROOSNIJDER L., 2001** – The Eritrean spate irrigation system. *Agricultural Water Management*, 48 : 51-60.
- TESFAI M., STERK G., 2002** – Sedimentation rate on spate irrigated fields in Sheeb area, eastern Eritrea. *Journal of Arid Environments*, 50 : 191-203.
- VALENTIN C., 1991** – Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. *Geoderma*, 48 : 201-222.

Conclusions de la troisième partie

Les effets des techniques culturales

Éric ROOSE

Le mode de gestion de la biomasse disponible induit des techniques culturales adaptées. Le fumier par exemple doit être enfoui si on ne veut pas perdre une bonne partie de l'azote, du carbone et des bases par érosion, lessivage ou gazéification. Par ailleurs, le semis direct est associé à une litière vivante ou morte. Mais si on ne dispose pas d'assez de biomasse, comment assurer la couverture du sol et l'affouragement du bétail jusqu'à la fin de la saison sèche ? Il y a des choix à faire.

Le labour permet d'enfouir la biomasse disponible

Ce sont les résidus de cultures, les adventices et autres plantes de couverture développées pendant la jachère (entre deux cultures), le fumier, le compost et les cendres. Il améliore temporairement la porosité de l'horizon labouré (8 à 25 cm), l'aération du sol tassé par les engins, les hommes ou les pluies, l'infiltration des premières pluies si importantes en zones semi-arides, la profondeur de l'enracinement et donc l'accès des cultures à des stocks de nutriments et d'eau plus abondants (CHARREAU *et al.*, 1970 ; ROOSE 1978, 1994). En retournant chaque année l'horizon labouré, il l'homogénéise, participe à la maîtrise des adventices,

mais ramène en surface des horizons moins riches en MO, moins stables et plus érodibles que l'horizon superficiel (qu'on trouve sous forêt). En triturant l'horizon de surface, le plus riche en MO et aussi en microbes et macrofaune (vers de terre, termites, fourmis, etc.), le labour réduit les populations des « ingénieurs du sol » si importantes pour assurer l'ouverture du sol à l'atmosphère, aux pluies et leur diffusion rapide vers les horizons plus profonds grâce à leurs galeries et aux agrégats stables qu'ils construisent (BLANCHART et JOUQUET, 2013). À moyen terme par contre, le labour introduit de l'oxygène dans le sol et accélère la minéralisation des MO du sol, réduit la stabilité de la structure, expose la surface du sol à l'agressivité des pluies, remonte en surface des matériaux plus fragiles et le stock de graines d'adventices et accélère la dégradation de cet horizon de surface si important pour la croissance des plantes et la dynamique de la vie biologique du sol. Enfin, le coutré qui appuie sur la base de la couche labourée, lisse et compacte la surface de séparation (semelle de labour) et réduit la pénétration en profondeur de l'eau et des racines de certaines plantes cultivées (ex maïs, coton, tubercules). C'est pourquoi depuis les années 1960, les agronomes ont tenté de réduire les travaux culturaux d'abord aux USA + Canada : chisel et diverses dents maintenant en surface une partie des résidus de culture, puis semis direct sous litière de prairies grillées aux herbicides. Ces recherches ont donné lieu à l'approche « Agriculture de conservation ». Ces essais restaient confinés à de très petites surfaces (1 % des surfaces cultivées). Ce n'est que vers les années 1980-1990 que des grandes coopératives agricoles d'Amérique du Sud ont développé tout un système de cultures en semis direct sous litière sur de grandes surfaces. Dès lors, ce système a pris beaucoup d'importance en Amérique, en Australie et a commencé timidement en Europe et en Afrique.

En Afrique, on observe dans la majorité des systèmes de cultures (extensifs ou intensifs) une dégradation plus ou moins rapide des propriétés biologiques, chimiques et physiques des horizons labourés. Jadis, quand la production d'un champ n'était plus suffisante, ou les adventices trop envahissantes, le paysan abandonnait alors le champ à une jachère, friche de moins en moins longue à mesure que la pression foncière augmentait, et il défrichait de nouvelles surfaces. Aujourd'hui, la pression démographique est importante, mais rares sont les systèmes de culture qui gardent un bon niveau de productivité des terres cultivées sur le long terme grâce à l'enfouissement massif de fumier, compost ou résidus de culture (6 à 10 t de MS/ha/2 ans, voir Rhishirumuhirwa *et al.*, chap 15), ou grâce à une culture de légumineuses enfouies chaque année (ex. Sud-Bénin ; Barthès *et al.*, chapitre 31) ou à une jachère courte de légumineuses arbustives (voir Razafindrakoto, chapitre 6)

Le semis direct sous couvert végétal

Il a fallu attendre les travaux de Lal (1964-1978) sur les sols ferrallitiques du Nigeria, pour remettre en cause le bilan trop positif du labour (par rapport au

griffage superficiel ou au non-labour) soutenu par l'école française et pour développer des études sérieuses sur les effets du semis direct sous litière vivante ou morte sur l'érosion, la fixation du carbone dans le sol et la production des cultures (équipe du Cirad).

Cependant, le système de cultures sous couvert végétal (SCV) n'a pas que des avantages et n'est pas adapté à toutes les conditions naturelles (comme l'ont prétendu certaines personnes trop enthousiastes). En effet pour que les résultats soient favorables à long terme, il est impératif de garder toute l'année une couverture végétale vivante ou morte couvrant plus de 30 à 50 % de la surface du sol. Or en Afrique, cette condition est très difficile à obtenir à cause des droits de vaine pâture (le bétail est lâché sur tout le terroir dès que les récoltes sont faites) et des feux de brousse qui ont diverses raisons d'être : défrichement et nettoyage d'une biomasse encombrante, lutte contre les prédateurs, les maladies et les adventices, chasse et destruction des nuisibles, destruction des arbustes en faveur des graminées pour le bétail, règlement de compte entre voisins ou avec l'État, etc. Pour les sols dégradés (pauvres en MO, tassés, $\text{pH} < 5$), très fréquents en Afrique, il faut prévoir une phase transitoire : soit un labour profond avec enfouissement de fumier, soit une jachère améliorée de légumineuses arbustives ou non, soit une plante de couverture qui en quelques années (2 à 4 ans) réorganise la structure du sol et l'approvisionne en MO stabilisant la macrostructure (ROOSE *et al.*, 2011).

Il était donc nécessaire de tester sur différents sols (argileux ou sableux), différents climats (semi-arides à hyper humides) et diverses plantes cultivées (céréales, coton, arachide, haricot, tubercules) l'efficacité de ces systèmes de semis direct sous couvert végétal (SCV).

En milieu méditerranéen, même semi-aride, Mrabet a montré que sur vertisols et sols bruns calcaires bien structurés à argile gonflante du Maroc, il est techniquement possible d'abandonner le labour tout en améliorant la structure, l'infiltration, le taux de MO de l'horizon humifère, la résistance à l'érosion de l'horizon superficiel, à condition de bien maîtriser l'élevage et de limiter la vaine pâture (production fourragère, importation de céréales bon marché, réduction du nombre de têtes mais intensification, stabulation partielle). Cependant, l'extension actuelle de ce système de production (SCV) est limitée pour des raisons culturelles (habitude ancestrale du labour laissant un sol nu sans adventice), économiques (importance de l'élevage extensif et des besoins en fourrages, en particulier des pailles de céréales) et techniques (envahissement par les adventices résistantes aux herbicides et tassement en milieu aride pauvre en biomasse).

En milieux soudano-sahéliens semi-arides, Boli, Diallo et Roose ont démontré en parcelles de 100 à 1 000 m² que diverses variantes du système de SCV sont possibles sur des sols ferrugineux sableux et des sols bruns tropicaux argileux du Mali et du Cameroun. Il réduit considérablement les risques de ruissellement et d'érosion en nappe, mais en années à période très humide (Pluie > 200 mm/5 jours), la réduction du ruissellement entraîne l'augmentation du

drainage et du lessivage de l'azote et des cations solubles. Sous maïs, le SCV produit moins de grains (- 10 à - 40 %), tandis que sous coton le rendement en coton graine varie de + 10% à - 10 % du rendement sous labour classique, la fertilisation étant la même : mais l'écart avec le rendement des parcelles labourées diminue avec le temps. De même, le rendement dépend de la surface du sol couverte par une plante de couverture (quasi complet) ou par les résidus de culture (pas total). Il faut donc encore vérifier sur le long terme la durabilité et l'économie du système, les risques d'acidification ou d'envahissement par les adventices. Par ailleurs, Dugué *et al.* (chap. 30 dans cet ouvrage) ont montré que même lorsque les paysans se sont engagés dans le système de SCV, ils ont beaucoup de mal à garder la surface du sol couverte jusqu'à la fin de la saison sèche, dès lors qu'ils ont du bétail à nourrir : la ressource fourragère est toujours prioritaire sur les besoins environnementaux. D'où la recherche de plantes de couvertures fourragères semées en retard sous le couvert du maïs et l'alternance de labour sous maïs avec plante de couverture (semis décalé) et SCV sous coton, arachide ou soja.

Sur les hautes terres humides de Madagascar, Norsoa (voir chap. 29) et une équipe du Cirad et de l'IRD ont comparé sur ferralsol acide argileux le rendement de trois cultures sur sol labouré ou non, sous litière morte (résidus de la culture précédente) ou vivante (*Brachiaria ruziziensis*).

Dans ces conditions humides, le semis direct protège mieux le sol contre le ruissellement et l'érosion et améliore la séquestration du carbone dans l'horizon superficiel : mais ici aussi, son influence sur les rendements varie en fonction du type de culture. Le SCV augmente nettement le rendement en grain des haricots. Par contre, il diminue le rendement en riz par rapport au système labour, mais l'écart diminue avec le temps. Il diminue aussi la production de grains de maïs et l'écart reste constant au cours des quatre années.

En conclusion, le semis direct semble techniquement possible dans des conditions méditerranéennes et tropicales variées : la litière améliore l'infiltration et protège mieux le sol contre l'érosion. Par contre, il ne permet pas d'enfouir du fumier et ne peut restaurer la production des sols trop dégradés sans une phase préliminaire de remise en état mécanique ou biologique. Les résultats semblent meilleurs sur sols argileux que sur sol très sableux qui stockent difficilement l'humus, l'eau et les nutriments solubles. Avec le temps (4 à 10 ans), on peut espérer que la courbe des rendements du système SCV dépasse celle du labour (comme au Brésil). De plus, ce système de semis direct peut être introduit localement ou périodiquement pour réduire les méfaits du labour. Un labour périodique permet l'enfouissement des adventices, des résidus de culture, du fumier ou de l'engrais de fond.

Ce système qui réduit les temps de travaux (labour-semis-sarclages) est bien adapté pour les grandes exploitations, mais des adaptations semblent encore nécessaires pour les petites fermes ne disposant pas des outils nécessaires, ni des fonds d'investissement pour se procurer ce nouveau matériel (semoir, graines de légumineuses, pulvérisateur d'herbicides, engrais minéraux). Il manque encore

du recul en Afrique et des exemples d'adoption par les paysans non soutenus par des projets pour conclure définitivement sur les intérêts spécifiques de chaque système de culture : systèmes avec labour, non-labour, ou systèmes mixtes.

En Afrique, d'autres approches biologiques ont été testées pour restaurer les sols dégradés des champs cultivés au Sud-Bénin ou des parcours dégradés en Algérie.

Sur les plateaux du sud du Bénin qui reçoivent en moyenne 1 200 mm de pluie en deux saisons, sur sols ferrallitiques désaturés et épuisés par vingt années de cultures et de techniques culturales diverses (labour manuel ou mécanique, billonnage cloisonné ou en courbe de niveau, sarclage, fertilisation organique ou minérale), Azontondé (1993) a introduit une courte jachère de *Mucuna pruriens* herbicidée avant la grande saison des pluies et le semis du maïs. Dans cette parcelle (240 m²), durant la première saison des pluies, le maïs est semé en poquets et le *Mucuna* un mois plus tard dans la litière de *Mucuna* de l'année précédente, sans aucune fertilisation minérale. Le *Mucuna* se développe surtout durant la petite saison des pluies, tandis que les autres parcelles sont laissées en jachère naturelle.

Après trois années, le stock de carbone du sol (homogène au départ) a varié de - 2 t/ha sur le témoin, à + 2 t/ha sur parcelle fumée de 76-30-30 de NPK, et + 15 t/ha/40 cm sur la jachère au *Mucuna* semée un mois après le maïs (voir Barthès *et al.*, chap. 31). Le ruissellement a diminué de 28 à 12 et 8 % sur témoin (Tradit), NPK et *Mucuna* et l'érosion de 34 t/ha à 9 et 3 t/ha/an. En 1998, avant cet essai, le rendement en grain du maïs était de 500 kg/ha/an sur les trois parcelles : après trois ans, il a diminué sur la parcelle Tradit (0,2 t/ha), et augmenté sur NPK (2,5 t/ha) et surtout sur *Mucuna* (Rt grain = 3,5 t/ha/an). La production de biomasse, la fixation d'azote de l'air, la protection complète de la surface du sol et l'enracinement puissant de cette légumineuse peu appétante pour le bétail tenu à l'écart, ont réussi en trois ans la reconstitution d'un horizon superficiel humifère et une production de céréale remarquable pour ce sol naturellement pauvre.

Sur les terres pentues des moyennes montagnes d'Algérie, une équipe de l'INRF et de l'IRD a uni ses efforts pour mettre au point des systèmes de culture assurant une bonne couverture du sol, réduisant le ruissellement et l'érosion et donnant des rendements nettement meilleurs que ceux observés alentour grâce à une rotation céréales-légumineuses, à un travail modéré du sol et une fertilisation raisonnée en fonction des rendements attendus.

Sur les parcours dégradés des monts de Beni-Chougrane, Morsli et Hamoudi ont étudié les effets d'une mise en défens (contre le feu et les animaux) et un enrichissement en diverses légumineuses fourragères. Grâce à l'amélioration de la couverture végétale du sol, à l'augmentation de la diversité végétale, la MO du sol a augmenté de 20 %, le ruissellement et l'érosion ont été réduits de 90 % et la production de biomasse a été multipliée par cinq.

Devant le manque d'efficacité des méthodes mécaniques de terrassement pour réduire les risques d'érosion sur les versants cultivés de moyenne montagne du nord de l'Algérie (sur des pentes de 10 à 40 %), une équipe d'une douzaine de

chercheurs a consacré dix années pour développer une nouvelle stratégie de développement agricole (la GCES : Roose, 1987-1994) consistant à gérer au mieux l'eau, la biomasse et la fertilité des sols afin de réduire les surfaces dénudées, de protéger la surface du sol contre la battance des pluies et le ruissellement. En trois sites dont les pluies varient de 300 à 650 mm/an, cette approche a été testée sur une cinquantaine de parcelles d'érosion (100 à 200 m²) et une douzaine de ravines situées sur trois terroirs. L'intensification des systèmes de production (travail réduit du sol, adaptation raisonnée de la fertilisation, protection rapide du sol par une litière ou par les résidus de culture, récupération du ruissellement venant d'amont) a permis de réduire les risques de ruissellement et d'érosion, même lors des averses exceptionnelles. Surtout, cette approche a augmenté remarquablement le rendement des cultures et de la biomasse (herbes et pailles), ce qui a entraîné une forte amélioration des revenus des fermiers, une augmentation de la séquestration du carbone et de toutes les propriétés liées aux MO du sol.

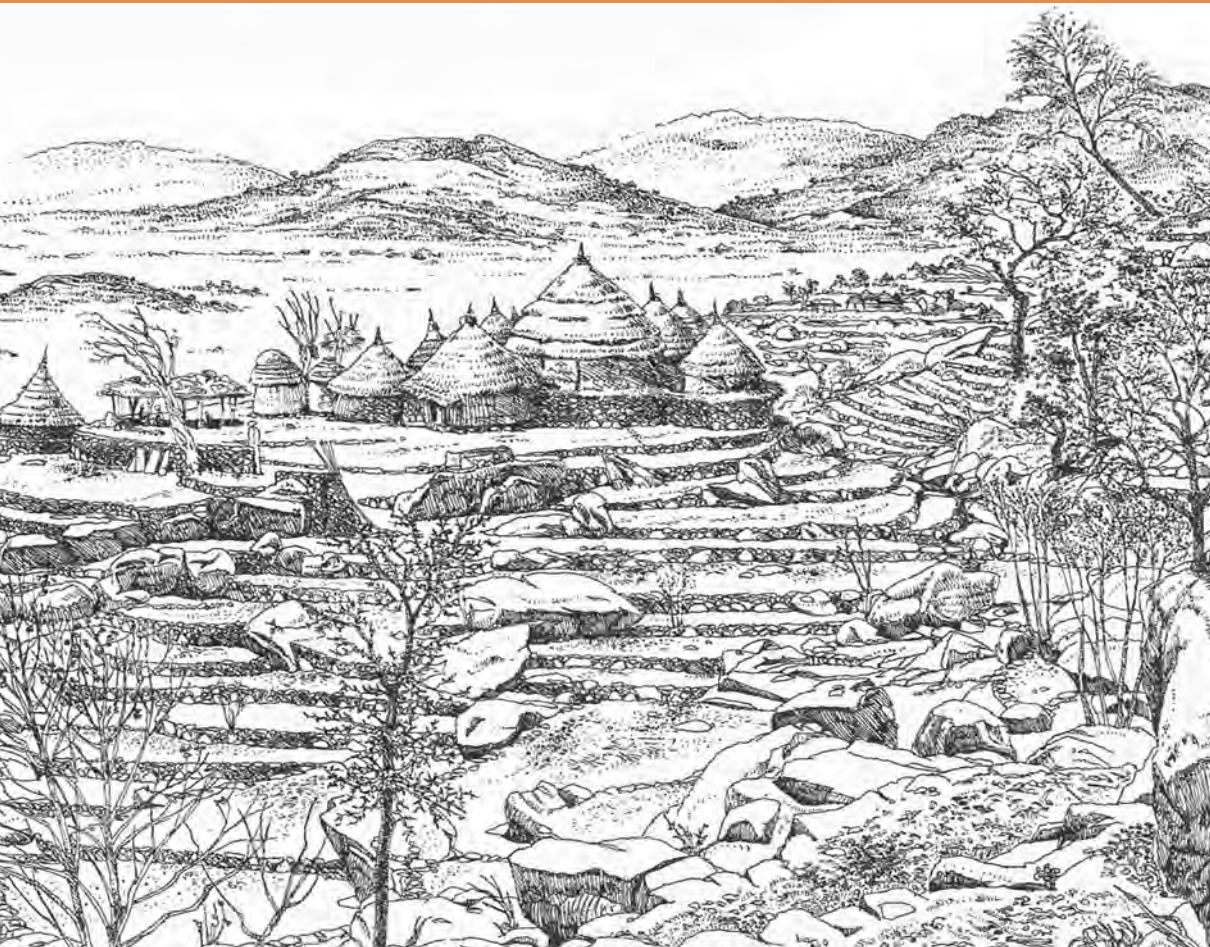
Par ailleurs, l'amélioration du bilan hydrique et la stabilisation des ravines par des seuils perméables et une couverture végétale adaptée ont permis de développer la notion d'oasis linéaire, lieu de production intensif. En définitive, c'est tout le système de production qui doit être repensé au niveau du terroir pour valoriser l'ensemble de ses ressources en eau, biomasse et fertilité des sols.

C'est ce qui va être développé dans la quatrième partie de cet ouvrage où il sera question d'une douzaine d'exemples où la restauration de la productivité des sols a été obtenue par la mise en place d'un système comprenant la gestion des eaux, le développement et la gestion de la biomasse, combinés à une fertilisation raisonnée.

Partie 4

Restauration des sols par des techniques complexes

Structures antiérosives combinées
à des apports de matières
organiques et minérales



< © IRD/É. Roose – Paysage des Monts Mandara (Ouest-Cameroun).
Terroir agroforestier en terrasse sur les Monts Mandara, Nord-Ouest du Cameroun.
Création de sols agricoles en montagne granitique : extraction des pierres pour monter des murets
qui retiennent les terres et les eaux de pluie, sélection et gestion des arbres pour éclater les roches,
fournir du fourrage et du bois et apporter des matières organiques et minérales pour fertiliser les sols cultivés.
Dessin de Ch. Seignobos

Dès la première partie de cet ouvrage, il est apparu clairement que la dégradation de la productivité des sols se manifeste progressivement par le changement de plusieurs propriétés du sol en fonction de divers processus complexes tels que la minéralisation du stock de MO du sol par les microbes, l'acidification par la lixiviation des bases par les eaux de drainage et de ruissellement, l'exportation des nutriments par les récoltes, le décapage des horizons humifères, l'érosion sélective des particules légères et la dégradation de la structure des horizons soumis au travail du sol.

Après avoir analysé dans les parties 2 et 3 l'influence de deux facteurs particulièrement importants (la biomasse et le travail du sol), nous abordons des exemples de techniques complexes permettant la restauration rapide et durable de la capacité de production végétale de sols tropicaux ou méditerranéens. D'après ZOUGMORE *et al.* (2008), les techniques de fertilisation organiques et minérales sont plus économiques, à court terme, que les structures physiques de conservation de l'eau et des sols. Mais leurs interactions aboutissent à l'optimisation et à la durabilité de la productivité des sols restaurés. Par exemple, le ralentissement des eaux de ruissellement par les cordons pierreux ou les haies vives coûte cher en terme de travail, mais ces techniques valorisent le peu de fumure dont disposent les paysans : en l'absence de maîtrise des eaux de ruissellement, les matières organiques et les engrais quittent les champs pour se déposer plus bas dans le paysage (sols colluviaux et alluviaux) ou pour s'échapper dans les fleuves.

Dans les quatre premiers cas présentés, il s'agit de créer des champs cultivés à partir d'un substrat minéral sur granite du plateau Mandara (Nord-Cameroun), sur les grès du plateau Dogon (Nord-Mali), sur les galets calcaires des oueds du Haut Atlas (Maroc) et sur des cendres volcaniques indurées au Mexique.

Dans ces milieux minéraux, il faut créer les conditions principales régnant dans tout sol :

- accumuler un volume suffisant de matières organiques et de particules minérales fines pour stocker l'eau et les nutriments indispensables à toute vie végétale ;
- organiser sa dynamique hydrique, microbienne et structurale.

Dans les dix cas suivants, sont présentées des tentatives pour restaurer la capacité de production de sols profondément dégradés ou de récupérer des champs désertifiés en milieux semi-arides soudano-sahéliens.

Les interventions complexes concernent la gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments par :

- la lutte antiérosive physique : réduire la pente, augmenter la rugosité du versant ;
- la gestion du ruissellement et des sédiments érodés (capture, infiltration totale, diversion ou dissipation de l'énergie du ruissellement) ;
- la gestion de la biomasse : agroforesterie, jachères forestières courtes, cultures associées avec des légumineuses, plantes de couverture, parcs et bocages ;

la nutrition des plantes : amendements organiques et fumures minérales complémentaires pour intensifier la production de biomasse et sa diversité.

À partir de la restauration des zones désertifiées du Burkina Faso (zipelle) par la technique traditionnelle complexe du zaï, nous tenterons de généraliser les règles principales permettant la restauration rapide de la capacité des sols à produire des cultures adaptées au milieu tropical semi-aride.

Bibliographie

ZOUGMORE R., MANDO O., STROOSNIJDER L, OUEDRAOGO E., 2008 – « Rentabilité économique des mesures de conservation des eaux et des sols avec la gestion des nutriments en zone semi-aride

du Burkina Faso ». In Roose É., Albergel J., De Noni G., Laouina A., Sabir M. (eds) : *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, Éditions AUF-EAC-IRD-Enfi : 126-132.

Création de champs cultivés en terrasses dans les monts Mandara et réhabilitation des vertisols dans la plaine du Diamaré (Nord-Cameroun)

Christian SEIGNOBOS

Michel TCHOTSOUA

Introduction

Les régions traditionnellement densément peuplées se sont toujours avérées les meilleures gestionnaires de la conservation des sols et de l'entretien de la fertilité. Ce fut le cas pendant longtemps des pays masa, gizéy, tupuri qui combinent des soles de sorghos sous des parcs denses de *Faidherbia* associés à un élevage bovin important. Après 1970, la saturation foncière et les spéculations ont provoqué, du moins chez les Tupuri, un déséquilibre de ce modèle.

Les monts Mandara auraient pu être le théâtre d'une érosion intense par ravinement, il n'en a rien été. L'équilibre a été obtenu grâce à de fortes densités de peuplement (80 à 150 hab/km²), seules en capacité d'entretenir un aménagement intégral des terroirs par des terrasses, un contrôle des eaux d'écoulement et la gestion savante d'une végétation sélectionnée. C'est la déprise actuelle de certains terroirs montagnards qui introduit l'érosion.

Ainsi, chaque société agricole a dans le passé recherché un équilibre entre potentialités édaphiques, choix agronomiques et densités de peuplement et d'élevage, mais il s'agissait là de modèles fragiles.

Le développement urbain, la sortie des économies de subsistance, l'obligation de passer à des cultures spéculatives ont bousculé ces systèmes qui, sans ignorer

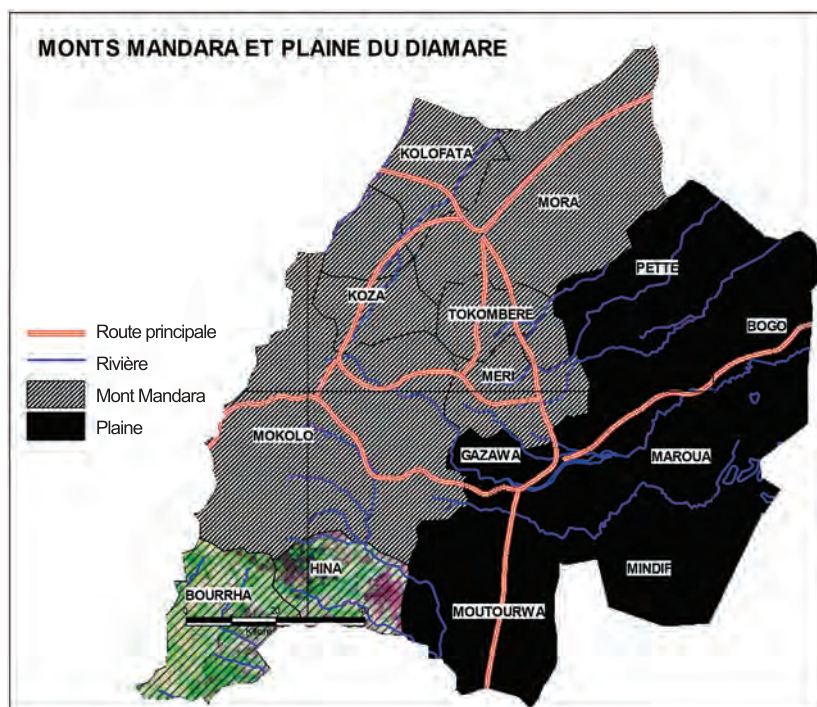


Figure 1
Carte des Monts Mandara et de la plaine du Diamaré (Cameroun).



Figure 2a
Paysage agricole des Monts Mandara. D'après un dessin de Ch. Seignobos.

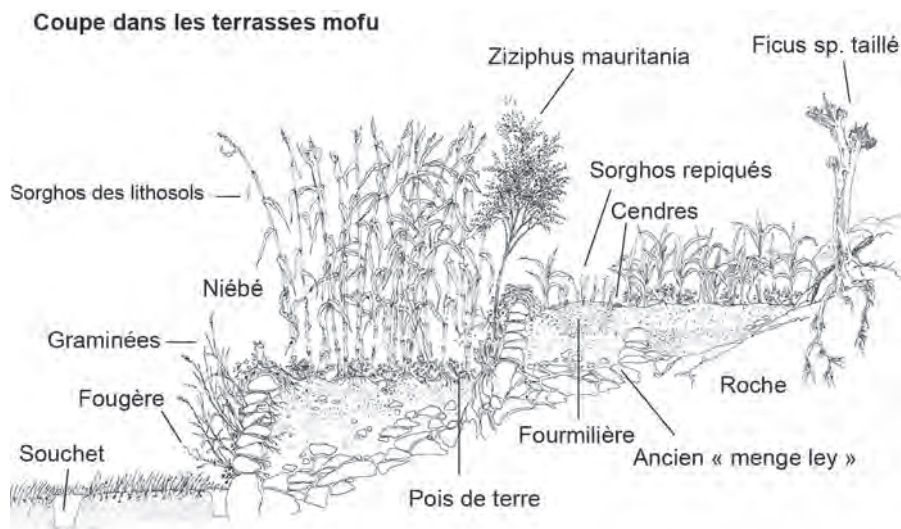


Figure 2b
Coupe dans une terrasse Mofu dans les Monts Mandara.
D'après un dessin de Ch. Seignobos.

l'érosion, savaient en partie en compenser les méfaits. L'érosion s'est développée, avec les spéculations. C'était le prix à payer pour à la fois entrer dans la monétarisation et accéder à « l'indépendance alimentaire ». Pour rester dans le cliché, le tandem charrue-production cotonnière va rapidement produire de l'érosion. Cette érosion va même, pour ainsi dire, s'exporter avec la descente des migrants de l'Extrême Nord, précisément des zones où ils avaient prouvé leurs savoir-faire pour juguler l'érosion, dans les fronts pionniers des plaines de la Bénoué où ils seront accusés de se livrer à une « exploitation minière ».

Nous allons exposer deux exemples d'agrosystèmes qui font la démonstration d'une lutte, encore à l'œuvre, contre l'érosion dans les monts Mandara et les plaines du Diamaré (carte 1).

L'élaboration des pratiques antiérosives dans les monts Mandara : un système global fondé sur les terrasses

L'érosion est dénoncée depuis l'après-guerre par des « ingénieurs d'agriculture coloniale » qui réclament déjà à l'époque une intervention d'urgence pour la restauration des sols et des couverts arborés. A. Vaillant n'en signale pas moins

certains systèmes antiérosifs efficaces comme ceux des monts Mandara à travers ses enquêtes agronomiques chez les Mofu de Wazan : « Les murs en pierre sèche établis par les populations du Mandara forment une série de terrasses qui retiennent la terre. Au moment des pluies, l'eau est absorbée par ces divers plans horizontaux. Toutes ces terrasses forment donc comme autant de cuvettes de terre poreuse qui laissent filtrer lentement l'eau en excès à la base de leurs murs. Longtemps après une forte pluie, une circulation lente de l'eau continue des terrasses supérieures aux terrasses inférieures » (VAILLANT, 1948).

Les populations apportent tous leurs soins à l'entretien des murs de soutènement des terrasses dans la mesure où elles leur permettent de survivre. Toutefois, il n'est pas certain que, dans les monts Mandara, la construction des terrasses se soit faite en commençant par le bas de la pente et en remontant progressivement jusqu'au sommet comme dans le Rif marocain (SABIR *et al.*, 1999). Les monts Mandara ont offert un refuge à des populations qui ont d'entrée privilégié des positions défensives sur les crêtes et les encorbellements. Ce sont les terrasses qui ont créé les champs sur des coulées de blocs de rochers ou sur des collines caillouteuses. Grâce aux chaos de roches granitiques sommitaux travaillés par l'érosion mécanique favorisant à son tour l'action chimique dans les diaclases pour libérer quartz, micas, feldspath et divers cations, les terrasses récupèrent toute cette arène granitique. L'appellation par les Mofu du mur de la terrasse : *mengue ley* (= piège + champ) est sans équivoque. Par ailleurs, Mafa et Mofu accéléraient l'éclatement des roches en semant et en bouturant dans les fentes de futurs gros ligneux : caïlcédrats, *Ficus*, *Diospyros*... qui, dans cette situation, ne pouvaient gêner les cultures. En revanche, ils amendaient fortement, avec des tiges de mil et du fumier, les parcelles de « roches pourries » (*jeheher* en mofu). Les montagnards n'hésitaient pas à construire des parcelles artificielles linéaires sur les plaques rocheuses derrière un liseré de pierres, qui récupéraient l'eau de ruissellement pour des récoltes précoces.

Dans ces milieux de montagne, les éléments fins descendent progressivement avec le ruissellement. Mais les terrasses vont maintenir leur contenu de terre arable qui ne cesse de se renouveler, faisant de ces lithosols des sols à jamais peu évolués. Ils seront longtemps mis au bas de l'échelle des pédogenèses par les pédologues. Toutefois, à partir de ces « sols squelettiques » les hommes vont tirer des cultures et pratiquer des rotations culturales parfaitement adaptées, au point qu'ils pourront supporter à certains endroits des densités de peuplement supérieures à 200 hab./km².

Le choix se portera sur des cultures peu exigeantes, en accord avec ces sols légers : les éléusines, les petits mils et surtout des sorghos de lithosols, les *zlaraway* ou *cerge*, tellement spécialisés qu'ils se révèlent improductifs en plaine.

De plus, dans les massifs mafa, les plus enclavés, la rotation biennale petit mil/sorgho vise encore à ménager ces sols et à enrayer la prolifération de certaines adventices et celle de prédateurs. L'année du petit mil (année bissextille)

s'accompagne d'une grosse production de niébés et d'une surabondance d'oseille de Guinée, semée en ligne qui entoure chaque parcelle afin que les niébés soient mieux protégés. Cette année vouée aux légumineuses prépare celle du sorgho qui permettra de dégager un léger surplus en grains. Oseille de Guinée et niébés peuvent apparaître comme un lot de cultures de substitution lors des crises alimentaires provoquées dans le passé par des criquets et autres ravageurs. La cohérence de ces agrosystèmes a contribué à forger de véritables civilisations climaciques montagnardes.



*a : terrasses à proximité de l'habitat : sols enrichis par le fumier :
2007, Monts Mandara, Cameroun.*

© M.Tchotsoua

*b : terrasses en tête de vallon : noter les murs de pierres,
les nombreux arbres entretenant la fertilité des champs cultivés.*

© M.Tchotsoua

Tout repose sur un entretien scrupuleux des murs des terrasses avant chaque saison des pluies. Elles vont, bien sûr, varier en fonction de la déclivité, du matériau et des pratiques du travail de la pierre des différentes communautés montagnardes. Elles sont plus resserrées sur le haut des pentes alors que, vers les fonds de talwegs, les parcelles prennent de l'ampleur. On peut voir les plus beaux murs de soutènement de pierres sèches jointoyées avec des éclats de roches, de 2 à 3 m de hauteur, chez les Podokwo et les Gemzek ; la pierre est cassée plutôt que taillée. Ailleurs, dans les vallées intramontagnardes, les terrasses, toujours curvilignes, plus modestes (de 0,50 à 0,75 m) relèvent plus d'un épierrage minutieux des champs.

Ce travail transforme des pentes caillouteuses en terrains plus fertiles à certains endroits que les colluvions des piémonts. Sous les gros amas de blocs, les replats des terrasses reçoivent les particules rocheuses délitées qui, mélangées aux sols, participent à leur fertilisation.

Ce qui, dans les Mandara, frappe l'observateur, c'est cette mise en terrasses totale des massifs, comme le souligne J. BOUTRAIS (1973) : « Le modèle du terroir montagnard ne comprend pas d'espaces incultes. L'homme transforme le paysage naturel en paysage densément humanisé. En détruisant le couvert forestier naturel, remplacé par un semis d'arbres sélectionnés, il est contraint, pour éviter l'érosion, de mettre à nu les versants, d'en modifier l'ensemble des pentes par des terrasses. Le système de terrasses n'est efficace que s'il couvre tout le versant des premières pentes jusqu'à l'aval ».

La place des arbres sera minutieusement adaptée. On contrôle la croissance de certaines essences de pleine terrasse comme *Faidherbia albida*, *Vitex doniana*, *Anogeissus leiocarpus*, *Acacia polyacantha*... D'autres servent de soutien aux murs ; dans le nord des monts Mandara, il s'agit de *Terminalia brownii* (chez les Podokwo et les Muktele), *Ziziphus mauritiana* (chez les Mofu et les Mafa) et, plus au sud, d'*Holarrhena floribunda* (chez les Bana et les Djimi). Traités en têtard bas à un ou plusieurs brins pour fournir des perches, on contrôle leur venue afin qu'ils ne gênent pas la croissance du mil. Un certain nombre d'essences arbustives sont exploitées au pied même des terrasses, comme *Grewia villosa*, le *sokwor* des Mofu et des Mafa. Recépé très bas par les femmes, son liber donne une sauce fortement mucilagineuse très commune (DONFACK et SEIGNOBOS, 1996).

Les murs des terrasses chez les Mafa de Magoumaz et de Ziver portent, pour les plus importants, des graminées comme *Cynodon dactylon* et *Digitaria* spp. qui serviront pour l'affouragement du bétail claustré pendant la saison des pluies. On y rencontre aussi une petite fougère, *Adiantum philipensis*, placée là, comme les graminées avec leur motte de terre, afin que leur système racinaire stolonifère tienne les pierres et surtout contrôle le suintement de l'eau. Sur le haut de la terrasse, le long du muret intérieur, on semait en lignes des éleusines qui tallent fortement.

La plupart des terrasses marquent une inclinaison faible, en contre pente vers le mur de la terrasse du haut pour forcer l'eau à percoler la terre de la terrasse dans son épaisseur. Les réseaux de terrasses qui, parfois, dépassent 200 m de

dénivelé ont rarement été conçus comme des ouvrages d'ensemble. Chaque exploitant a construit ses terrasses et les a raccrochées à celles de ses voisins sur des niveaux approchants. Les petits décrochements que l'on observe au moment des raccords ne nuisent pas à l'efficacité générale. Les terrasses ne sont pas, non plus, des ouvrages fixes. Au cours de sa vie, un paysan a pu changer certains de leurs linéaments. Mais, dans la mesure où il s'agit de touches souvent infimes avant chaque saison des pluies, les habitants des montagnes ont le sentiment d'un immobilisme des réseaux de terrasses et d'un héritage global des « ancêtres ».

Contrairement à une idée reçue, un réseau de terrasses peut être rapidement monté. Sur la route Maroua-Mokolo, après Mouhour, l'ensemble des terrasses a été dessiné et bâti dans les années de l'indépendance. Après un conflit (Ziver-Vouzad) en 1961 et 1962, un quartier de Ziver a été déplacé entre Mouhour et Mokolo. En quelques années, cette zone de plateau (« Ziver plaine ») a été couverte de terrasses (BOUTRAIS, 1973). Il en a été de même de toute la ligne de crête de Cuwok qui domine la plaine de Zamay, entre 1950 et 1975, et pour une majorité d'entre elles en moins de quinze ans, ce dont nous avons été témoin dans les années 1970 (SEIGNOBOS, 1997).

Le maintien de la fertilité est en partie assuré par des arbres de restitution agromomique comme *Acacia polyacantha* que l'on retrouve encore dans des vallées reculées (pays mada). Ils ont été peu à peu remplacés ou complétés aux XVII^e et XVIII^e siècles par *Faidherbia albida*, diffusé par les zébus achetés en plaine chez les Peuls (SEIGNOBOS, 1993a). Sous leurs houppiers, on retenait la litière avec des graminées mises en paillis et que l'on allait enfouir dans d'autres parties de la parcelle. Les montagnards épandaient systématiquement des cendres et de la poudrette de petit bétail.

Lors du 2^e sarclage a lieu l'enfouissement systématique des rudérales dans de petites buttes intercalées entre les pieds de mil. Avec le 3^e sarclage, désigné pour « enlever les feuilles de sorgho » (*ma gworey*), ce sont les basses feuilles de la tige qui sont soit enfouies, soit données au bétail claustré (taurillon acheté en plaine et élevé dans une étable spécifique pendant un à trois ans). Ce dépouillement des basses feuilles permettait aux sorghos de montagne d'aller jusqu'au bout de leur croissance. Ce sarclage est aussi celui du désenroulement des niébés sur les tiges de sorghos ou de petit mil, afin de concourir à une protection maximale du sol contre l'agression de la pluie. Le sol des terrasses est l'objet de soins constants de la part des montagnards. Les appellations en mofu, par exemple, en rendent compte comme d'une chose vivante. Le sol est la peau de la terre (*dlay ma dala*), comme on le dit pour la peau de l'homme (*dlay ma ndaw*), alors que celle concernant l'animal est différente. Soit à sec, soit après les pluies, le sol des terrasses n'est jamais travaillé profondément, cette technique étant réservée aux zones humides. Si l'érosion se manifeste, on parle de plaie (*mblek*) du sol. Pour y remédier, il faut alors le « panser », sans cela la fertilité peut partir et on dit du champ appauvri qu'il s'est enfui (*ley kamcila...*).

Dans cette agriculture intensive, les espaces sensibles à l'érosion, les bassins de réception des hauts talwegs, les parties jouxtant les torrents et surtout les lignes de piémont où convergent les eaux de ruissellement, vont être traités par le biais de cultures bien particulières. L'eau est utilisée pour les cultures, tout en dispersant et en disciplinant les plus gros flux après de fortes pluies. De micro-rizières

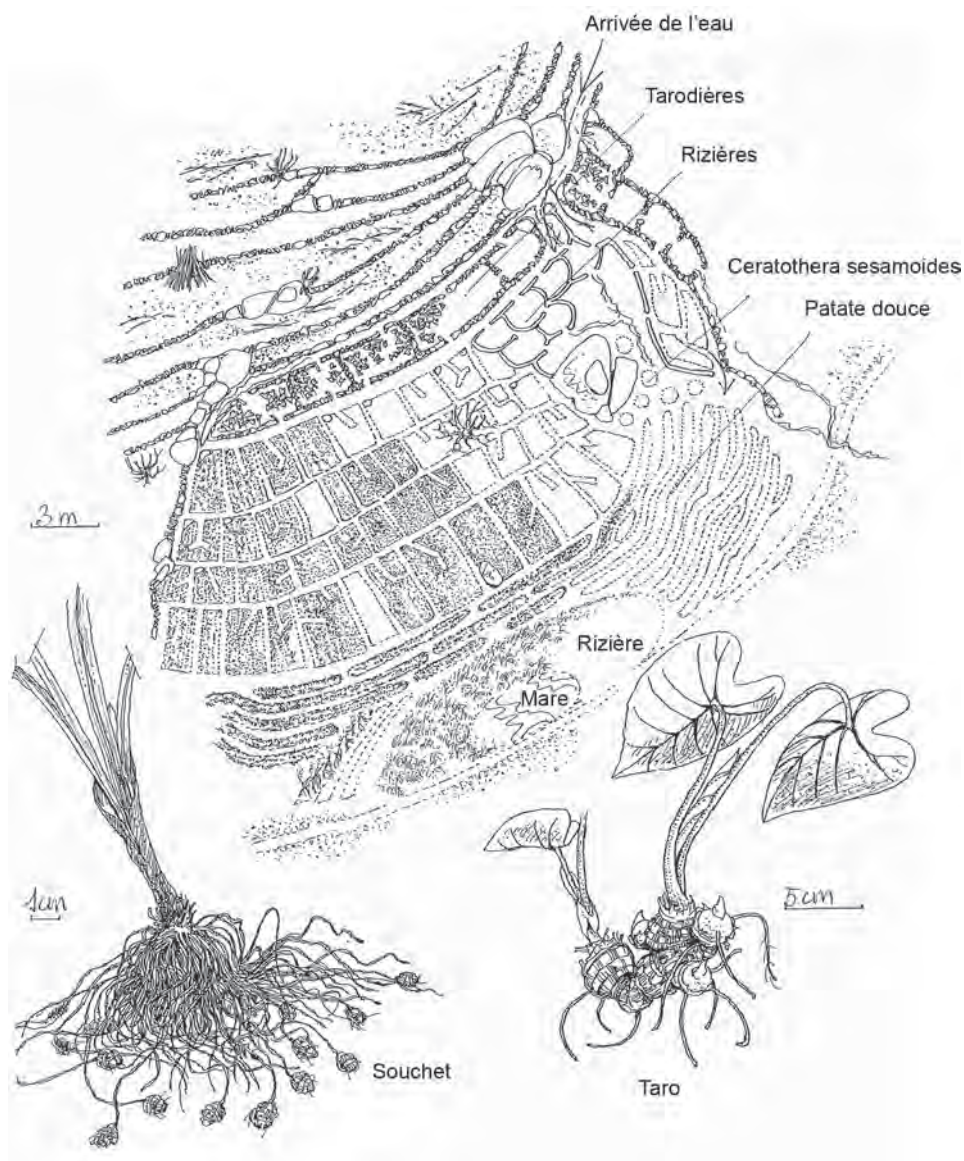


Figure 3
Aménagement d'un bas-fond au Nord de Mokolo (Monts Mandara, Cameroun).
D'après un dessin de Ch. Seignobos.

vont récupérer certains passages d'eau, tout en la contraignant à emprunter un compartimentage très serré de diguettes, parfois hautes de 50 cm, limitant ainsi les effets érosifs. Le taro est très présent chez les Mafa. On le cultive en général au pied de grandes plaques rocheuses, dans des endroits où l'eau sourd. Les Mafa créent alors un quadrillage de petits murets de pierres qui vont faire circuler l'eau dans cette tarodière (*giy mesler*) avec une entrée et une sortie de l'eau (HIOL-HIOL *et al.*, 1996).

Ce sont également des parcelles de souchet, *giy menda* (*Cyperus esculentus*). Pour ce minuscule tubercule qui aime la proximité de l'eau sans toutefois en supporter les excès, on construit des planches-billons selon des surfaces et des hauteurs variables. Ce gros travail est exécuté par les hommes, même s'il s'agit d'une culture exclusivement féminine. Les planches-billons disposées en quinconce obligent l'eau venant des massifs à se diluer dans un lacs de canaux, l'eau empruntant un parcours constamment en baïonnette. Les angles de ces grosses planches où l'eau vient buter peuvent être renforcés par des parements de pierres. Les planches ne sont pas obligatoirement individualisées, mais elles peuvent représenter des surfaces avec des rentrants de canaux, sorte de digitations dont le but est toujours de profiter du passage de l'eau, tout en annihilant les excès du ruissellement.

La culture du souchet, quatre à cinq variétés, constitue le plus important apport saccharifère pour les montagnards. Les femmes y épandent des fientes de poulet, poudrette et cendres afin d'empêcher la venue de déprédateurs ou les recouvrent de branches pour prévenir l'attaque de rongeurs et d'oiseaux.

La patate douce a intégré tardivement (1960) l'agrosystème montagnard dans la gestion de ses parties humides et sensibles à l'érosion. Les hauts billons longilignes sont mis à profit pour être combinés aux tarodières et aux billons plats des souchets. On y rencontre encore des billons circulaires fortement bombés pour le *Ceratotheca sesamoides* (*mejiger metexed*), dont la production de semence sera vendue aux maraîchers de la plaine.

Mais ce sont les aménagements des hauts talwegs qui présentent les systèmes antiérosifs les plus complexes ; celui de Way Ziver dans la cuvette sommitale du massif de Ziver semble en être le plus bel exemple. Les *way* (points d'eau) en pays mafa sont des mares, des sources ou encore des puits généralement entourés d'une pâture enclose de haies d'Euphorbiaceae. Un collecteur longe l'extérieur de la haie et reçoit l'eau à partir de réseaux de drains qui vont la capter sous les dernières terrasses du bas des pentes. Ces canaux-drains (*luray*) composent un système de planches (*var uray*) qui ne sont pas sans évoquer la disposition des planches de souchet. Simplement celles des *way* sont pérennes et portent les mêmes rotations culturales que celles de l'ensemble du massif. Dans certains canaux, en revanche, on peut cultiver le taro. Ainsi au cœur de la saison des pluies, l'eau sera canalisée vers le collecteur qui, ensuite, la conduit dans le torrent du talweg. L'eau pourra aller imbiber la pâture enclose parfois jusqu'à ce qu'elle devienne spongieuse, sans toutefois créer la moindre altération par érosion. L'eau dans le talweg est freinée par des lignes d'enrochements

disposées perpendiculairement au courant et par une végétation ripicole suffisamment dense et filtrante d'*Acacia ataxacantha* et de *Ziziphus mucronata*.

Bien que ces communautés montagnardes ne soient pas des sociétés de l'hydraulique, elles ont pu réaliser un certain nombre de cultures grâce à un relatif contrôle de l'eau, sur des espaces mesurés, mais essentiels quant au dispositif antiérosif du terroir. À la différence des terrasses, le but recherché et non induit semble bien avoir été une réelle volonté de bloquer l'érosion.

Dans les années 1940, ce que l'on craignait déjà en matière d'érosion pour les monts Mandara, c'était – à la différence de la plaine – un relâchement des densités de peuplement, « l'abandon des ouvrages d'art qui ont consolidé la terre sur les pentes et discipliné les eaux sauvages et torrentielles » (VAILLANT, 1948).

Lorsque l'émigration atteint certains seuils, elle contraint à l'abandon de terres et donc de terrasses en commençant par celles du haut, les plus étroites. Le processus d'abandon est largement décrit par BOUTRAIS (1973) qui l'analyse dans les premiers glissements d'habitat en plaine chez les Mafa de Moskota. Les terrasses abandonnées résistent plus ou moins bien aux passages du bétail. Elles s'effondrent et sont remplacées par des couloirs d'érosion à peine contrariés par une amorce d'emboisement des pentes. En 2009, les hommes valides sont dans les villes ou travaillent à façon en plaine. C'est aux femmes qu'incombe la responsabilité des terrasses. Or, elles ne sont pas des ayants droit sur ces terres, aussi n'exécuteront-elles qu'*a minima* la réfection des dégradations occasionnées par le petit bétail pendant la saison sèche.

Dans les années 1970 encore, tous les massifs ou presque étaient vivifiés ; en 2009, on constate de nombreux abandons et des « trous » dans ce tissu aménagé en continu. Chacun tend à se concentrer sur l'espace situé autour de sa ferme (*ay*). Le paysan mofu va accorder plus d'importance à son « champ de case » (*ar manbow*). Ainsi les terrasses, surtout celles de soutènement des *ay*, seront régulièrement entretenues. Peut-on alors associer cette nouvelle redistribution des exploitations à une logique d'organisation économique de type Von Thünen (LÉONARD et DUMAS, 2002), l'effort d'entretien étant centré sur les lieux le plus souvent fréquentés et travaillés ?

Des pratiques antiérosives de la plaine du Diamaré

Dans les piémonts et les plaines où l'espace était moins limité qu'en montagne, on relève des ébauches de systèmes antiérosifs. Mais, ici encore, ils ne sont que contingents à d'autres buts qui répondaient à des protections de parcelles contre les intrusions du bétail, ou servaient à marquer un espace approprié. Elles sont formées de haies dont la plupart, dans les piémonts des Mandara et la région

de Maroua, expriment des sortes d'archéophytes composés de *Commiphora africana*, *Acacia ataxacantha* et de différentes Euphorbiaceae, issus de systèmes défensifs encore présents au début du xx^e. Ils ont été démantelés et corrigés par des essences moins agressives comme les haies de *Jatropha curcas*. Dans ces anciens bocages défensifs, les lignes perpendiculaires à la pente peuvent encore prétendre à des effets antiérosifs.

Les paysans des plaines du Diamaré ont porté leurs efforts sur l'entretien de leurs vertisols (*karal*) au service d'une culture de contre-saison, les sorghos repiqués (*muskuwaari*). Depuis trois décennies, cette culture s'est substituée à celle du coton comme pivot de l'agrosystème aussi bien en vivrier qu'en spéculation.

Il existe une gamme de *karal* qui, chacun, réclame des traitements particuliers quant au brûlis, au sarclage, à l'écartement et à la profondeur des plants. Le besoin de cultiver ces sorghos dessaisonnés, culture réputée « sûre » en ce qu'elle n'est pas tributaire des pluies, a poussé les paysans à défricher toujours plus de vertisols jusqu'à investir des sols aux horizons faiblement argileux et surtout à récupérer des sols halomorphes « stériles », les *harde* (SEIGNOBOS, 1993b).

Il existe, ici encore, plusieurs types de *harde*. Ceux en marge des villages sont des terres stérilisées par le stationnement du bétail (*harde dabbaji*) avant son départ pour les pâturages. Ils sont facilement récupérables, alors que d'autres demandent plus d'investissement pour être à nouveau vivifiés. La reprise de ces sols halomorphes s'effectue à l'aide de carroyages de diguettes (*dingiji*) de 0,30 m de haut en moyenne et qui favorise une contention de l'eau de pluie. Elle devra s'infiltrer progressivement dans les horizons argileux, constituant ainsi une réserve pendant la saison sèche. On vient y verser, en dépit du manque de moyen de charroi, de la poudrette qui favorisera la venue d'un couvert graminéen dominé par les *Setaria* spp., souvent aidé par un ensemencement artificiel.

Pendant toute la saison des pluies, les *karal* portent une sorte de « jachère dérobée » qui sera brûlée avant le repiquage. Des trous d'eau de 2 à 3 m de diamètre (*okoloore*) sont aménagés à espaces réguliers sur l'ensemble des vertisols ; ils servent à entreposer les bottes de *muskuwaari* (sorgho tardif repiqué) et à verser de l'eau dans les trous des plants afin de réduire le stress hydrique.

En montagne comme dans les zones de *karal*, il s'agit pour les populations de protéger un potentiel jugé vital pour elles, même si pour les *muskuwaari*, il n'est devenu vital qu'après les années 1955 avec l'imposition du coton.

Les limites de la lutte antiérosive traditionnelle

Les exploitations montagnardes présentaient de bons rendements, mais des productivités faibles du travail. Aujourd'hui, ce constat est remis en cause par un changement au sein de la force de travail. La main-d'œuvre familiale,

appauvrie par l'émigration des jeunes, conduit à une féminisation du travail de la terre entraînant des changements, non seulement des rythmes de travail, mais aussi de types de cultures. Sur la montagne, le besoin en intrants et en disponibilité financière se fait également sentir au point que, dès la décennie 1990, le coton a été spontanément cultivé sur les terrasses de Zamay à Mokolo et de Koza à Djinglia. On entre dans une crise de la structure paysagère de la montagne qui ne sera pas sans conséquences sur l'érosion risquant même d'impliquer les piémonts des Mandara.

En plaine, le coût de la main-d'œuvre et l'impérieuse nécessité d'un repiquage rapide ont toujours constitué le goulot d'étranglement de la culture des sorghos repiqués. Le paysan a cru l'avoir résolu à partir de 2000-2001 par l'utilisation massive d'herbicides. La répétition de ces pratiques ne manque pas de transformer et d'appauvrir cette « jachère dérobée » de saison des pluies et suscite quelques inquiétudes chez les exploitants quant à la fertilité et l'avenir de leurs vertisols.

Ce sont les agrosystèmes qui intègrent les pratiques antiérosives soit de façon globale comme sur les Mandara septentrionaux, soit sur une famille de sols particuliers dans les plaines du Diamaré. Mais, en aucun cas, les techniques contre l'érosion sont plaquées sur un système agronomique, elles lui appartiennent, pourrait-on dire, de façon consubstantielle. En d'autres termes, il n'existe pas de pratiques antiérosives employées pour ce qu'elles représentent.

C'est la réponse à toutes les interrogations des développeurs depuis le début des années 1980 : pourquoi les populations capables d'exploits techniques pour combattre l'érosion dans leurs pays de départ, une fois sur les fronts pionniers de la Bénoué ne reproduisent-elles pas, sur ces nouveaux sites, leurs « bonnes habitudes de gestion conservatoire des sols » ?

Le maintien de la fertilité associé à un aménagement de terroirs, à une intensité de soins apportés à la terre et à une gestion optimale de la fumure ne suffit pas. L'argent se gagne ailleurs et des jeunes partent (LOULÉO, 1977). Aussi, en dépit d'adaptations remarquables par le passé, la logique de production évolue et elle induit des points de rupture remettant en cause la reproductivité de ces systèmes. À cela s'ajoutent des phénomènes de saturation foncière, sources de conflits rémanents.

Il est primordial pour les développeurs, si l'on veut augmenter la productivité, de procéder à une meilleure gestion de l'eau, mais aussi à une meilleure gestion des nutriments et de la matière organique. Ainsi, dans les propositions, désormais classiques, du développement au Nord-Cameroun, on retrouve la production de haies vives et de bandes d'arrêt enherbées. Elles favorisent l'infiltration par ralentissement des écoulements, tout en bloquant les processus de transport d'éléments solides. On peut améliorer la restitution organique en répandant dans les espaces des intertalus les résidus de taille restituant ainsi des nutriments.

La Sodecoton, seule à conduire un développement de masse, montrait que sur ses milliers d'hectares aménagés en 2008 par le projet DPGT (Développement paysannal et gestion de terroirs), la dominante des bandes enherbées était située

au sud de la Bénoué (75 %), les cordons pierreux au nord de la Bénoué jusqu'à Guider (15 %) et les ados, bourrelets renforcés d'*Andropogonées*, entre Kaélé et Mora (10 %) (ROOSE *et al.*, 1998). Parallèlement, on a multiplié les parcs de restitution agronomique volontaires de *Faidherbia albida* créés parfois *ex nihilo*, de *Prosopis africana* et de divers *Acacia*.

Les dernières propositions (BOLI et ROOSE, 2004) du développement dans le nord du Cameroun, concernent les SCV (Systèmes de culture sur couvert végétal). Ce labour biologique serait appelé à prendre le pas sur le labour mécanique promu plus d'un demi-siècle auparavant et désormais accusé d'avoir favorisé l'érosion et l'appauvrissement des sols.

Les SCV présentés comme un retour à des formes compréhensibles d'agriculture auraient sans doute été plus en conformité avec les agrosystèmes des années 1930. Toutefois, les paysans du nord du Cameroun ont fini par adhérer à l'agriculture qualifiée de productiviste. Cette agriculture les a fait vivre et, pour certains, prospérer ces dernières décennies. Elle a su créer ses propres critères de réussite basés sur l'idéal du « laboureur » avec ses bœufs d'attelage et tout le matériel afférent.

Les mots d'ordre des SCV vont à l'encontre de ceux de la précédente révolution technologique : ils visent la réduction du travail du sol et des risques d'érosion. En plus du maintien des résidus de récoltes, ils prônent la réintroduction de l'herbe sur le champ, les « mauvaises herbes » n'en sont plus et les légumineuses sont plébiscitées. Le sillon de la charrue fait place à une trouaison du mulch qui devrait s'accompagner d'une réduction des intrants. Le travail de la terre est confié à l'entomofaune et aux systèmes racinaires. Mais surtout, plantes de couverture et résidus de récoltes ont la charge d'enrayer à la fois l'érosion et la dégradation de la fertilité du sol cultivé.

Les SCV ne peuvent être la panacée, mais face à la démultiplication des crises, celle du système montagnard, celle du coton avec des prix d'achat toujours plus bas et des intrants toujours plus chers, celle de la dérégulation de l'élevage transhumant dans la violence, la configuration développementaliste semble se rallier à ce défi : produire une biomasse abondante accessible à tous. Les SCV, théoriquement partout applicables, ne semblent devoir être promus que dans les terroirs cotonniers. Ils ne s'adressent ni aux champs en terrasses, ni aux zones de vertisols, comme si les agrosystèmes concernés poursuivaient leur évolution singulière.

Conclusions

Les stratégies antiérosives relèvent de systèmes de cultures intensives, aussi celles nouvellement proposées incitent-elles également les paysans à s'orienter vers l'intensif. Or, si l'agriculture intensive nourrit, c'est l'agriculture extensive

qui rapporte et les paysans ne sauraient accepter d'affaiblir leur productivité par des travaux supplémentaires d'aménagement. Les SCV représentent un système qui intègre au maximum la lutte antiérosive, mais celui-ci n'a pas fait pour autant la démonstration aux paysans du nord du Cameroun de sa pérennisation et de sa supériorité dans les rendements (BOLI et ROOSE, 2004).

Bibliographie

- BOLI Z., ROOSE É., 2004** – « Effet du labour classique et du semis direct sous litière sur le fonctionnement de deux sols ferrugineux tropicaux sableux à Mbissiri, Nord-Cameroun ». In Roose É., De Noni G., Prat Ch., Ganry F., Bourgeon G. (éd.) : *Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone*, IRD Montpellier, *Bull. Réseau Érosion*, 23 : 431-437.
- BOUTRAIS J., 1973** – *La colonisation des plaines par les montagnards du nord du Cameroun (monts Mandara)*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 24, 277 p.
- BOUTRAIS J. et al., 1984** – *Le nord du Cameroun, des hommes, une région*. Paris, Orstom, 551 p.
- DONFACK P., SEIGNOBOS C., 1996** – « Des plantes indicatrices dans un agrosystème incluant la jachère : les exemples des Peuls et des Giziga du Nord-Cameroun » : 231-250. *Journ. d'Agric. Trad. et de Bota. Appl.*, 38, 296 p.
- DUMAS D., 1992** – *Les terrasses de cultures dans les monts Mandara*. Maîtrise de géographie, univ. de Strasbourg, 128 p.
- HALLAIRE A., 1991** – *Paysans montagnards du Nord-Cameroun : les monts Mandara*. Paris, Orstom, 253 p.
- HIOL-HIOL F., NDOUM MBEYO D., TCHALA ABINA F., 1996** – « Les techniques traditionnelles de CES dans les monts Mandara (Cameroun) ». In Reij C. et al. (éd.) : *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*, in CTA, CDCS, Karthala.
- HIOL-HIOL F., MIETTON M., 1997** – « Fonctionnement hydrologique et rendement agronomique des terrasses des monts Mandara (Nord-Cameroun) : des comparaisons à différentes échelles spatiales entre systèmes agraires traditionnels et améliorés ». In Bart F., Morin S., Salomon J.-N. (éd.) : *Les montagnes tropicales : identités, mutations, développement*, coll. Espaces Tropicaux, 16 : 323-354.
- LÉONARD M., DUMAS C., 2002** – Diversité et fonctionnalités des aménagements de versant : exemple des terrasses ardéchoises. *Bull. Réseau Érosion*, 21 : 182-195.
- LOULÉO J., 1997** – *Émigration des Kirdi des monts Mandara ; le cas des Mafa de Souledé*. Thèse doct. 3^e cycle, univ. de Yaoundé I, 164 p.
- MORIN S., 1998** – « Géomorphologie ». In Seignobos C., Iyebi Mandjek O. (éd.) : *Atlas de la province Extrême Nord-Cameroun*.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Sols FAO*, Rome, 70 : 420 p.
- ROOSE É., BOUTRAIS J., BOLI Z., 1998** – *Rapport d'évaluation fertilisation des sols du projet DPGT (Développement paysannal et gestion de terroirs) au Nord-Cameroun*. Montpellier, Orstom-Cirad, Montpellier, 72 p.
- SABIR M., ROOSE É., MERZOUK A., NOURI A., 1999** – Techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans deux terroirs du Rif occidental (Maroc). *Bull. Réseau Érosion*, Montpellier, 19 : 456-471.
- SEIGNOBOS C., 1993A** – « L'évolution des parcs arborés des monts Mandara (Nord-Cameroun) ». In : *Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest*, symposium, Ouagadougou, 25-27 octobre 1993, Igraf-CILSS-LTC.
- SEIGNOBOS C., 1993B** – « Hardé et Karal du Nord-Cameroun, leur perception par les populations agropastorales du Diamaré ». In Peltier R. (éd.) :

Les terres hardé, caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad, Cahiers Scientifiques du Cirad-Forêt, 11 : 9-28, 121 p., Nogent sur Marne.

SEIGNOBOS C., 1997 – « Maîtrise de l'eau et contrôle de l'érosion, l'exemple mafa (Nord-Cameroun) ». In Jungraithmayr H., Barreteau D., Seibert U. (éd.) : *L'homme et l'eau dans le bassin du lac Tchad* : 351-365.

SEIGNOBOS C., 1998 – « Pratiques antiérosives traditionnelles au Cameroun : l'élaboration des

terrasses des monts Mandara et la récupération des terres hardé ». *Orstom actualités*, 56, spécial érosion : 35-37, 41 p. et *Bull. Réseau Érosion*, 18 : 300-305.

SEIGNOBOS C., 2009 – *Les paysans du nord du Cameroun face aux SCV (système sous couverture végétale permanent)*. Rapport AFD-Bureau d'études Horus. Audit du 24 novembre au 6 décembre 2008, 31 p.

VAILLANT A., 1948 – *L'érosion du sol dans le massif du Mandara*. Douala, 15 p.

Création de champs cultivés et gestion de l'eau et de la fertilité des sols sur le plateau Dogon (Mali)

Drissa DIALLO

Introduction

Le plateau de Bandiagara-Hombori (PIRT, 1983), plus connu sous le nom de « Pays dogon » est une région agricole aride aux conditions morpho-pédologiques et climatiques difficiles. Malgré les traits physiques hostiles (falaises et affleurements rocheux), le plateau est habité depuis longtemps par les Dogons qui y ont développé, au long des siècles, un système agricole reposant sur la céréaliculture pluviale, le maraîchage de contre-saison et l'élevage. On note aujourd'hui que les pratiques agricoles sont ouvertes aux évolutions techniques et aux exigences du marché.

Le présent article, s'appuyant sur la littérature existante et des observations de terrain, vise la description des perceptions locales de l'érosion des sols, des stratégies et techniques agricoles et de gestion des eaux et de la fertilité sols.

Le milieu

Le plateau de Bandiagara (14° 34' N), situé dans la région de Mopti, est localisé entre le delta central du Niger à l'ouest et la plaine du Seno au sud-est. Le climat est de type sahélien avec une pluviosité annuelle très variable (300 à 700 mm),

principalement concentrée sur les mois de juillet et août. Le reste de l'année est sec avec une période fraîche (novembre à janvier) où la température moyenne est de 25° C et une période chaude présentant des pics de température souvent supérieurs à 45 °C, avec des vents violents (harmattan). La géologie du plateau de Bandiagara est marquée par un important dépôt gréseux datant du Primaire (grès de Bandiagara). Au Quaternaire, l'érosion attaque les reliefs et le grès est décapé partiellement. La falaise se forme à cette époque. Le plateau est relativement accidenté en fonction de la variété des faciès gréseux, des fractures et plissements laissés par l'évolution géodynamique. On peut observer de profonds ravins, de nombreuses buttes aux flancs escarpés, dominant de vastes surfaces subhorizontales couvertes de sable et d'affleurements de cuirasse. Au sud-est du plateau et de sa falaise, la plaine du Seno s'étend sur une centaine de kilomètres. Sa surface est faiblement ondulée, mais il existe des dunes (pouvant atteindre 30 m de haut) fixées par la végétation (photo).

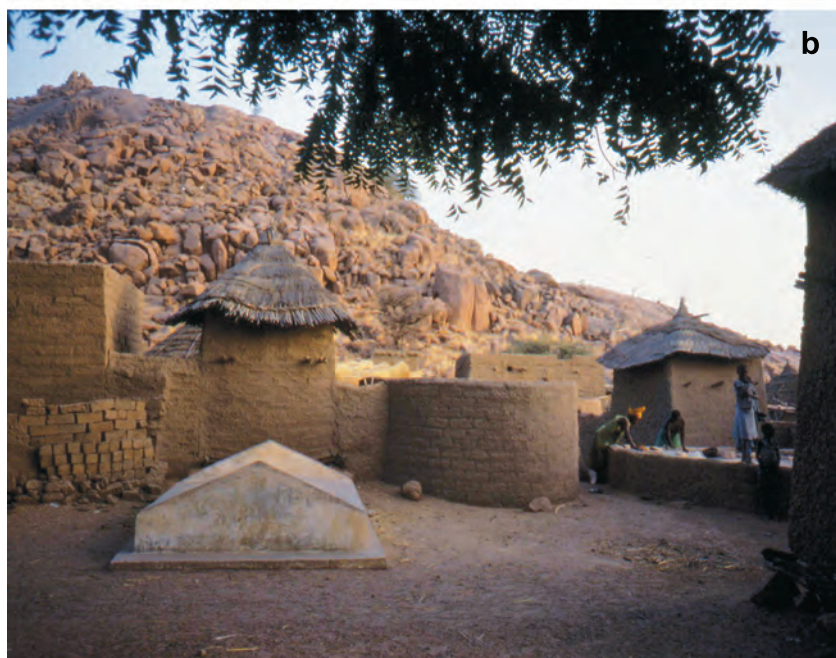


*Vue du pied de l'escarpement de Bandiagara, Mali.
Source :Wikipedia.*

Sur le plateau de Bandiagara, les affleurements rocheux constituant une nette discontinuité de la couverture pédologique occupent une surface estimée à 20 % (PIRT, 1980). Les sols observés sont issus de l'évolution pédologique de colluvions sableuses déposées sur grès et quartzite.

Parmi les unités sol-végétation décrites dans l'Atlas des ressources terrestres du Mali (PIRT, 1980), celles distinguées sur le plateau de Bandiagara sont :

- TR2 (30 %) où les sols dominants sont sableux, peu évolués, d'apport colluvial sur grès et quartzite, d'épaisseur voisine de 50 cm, présentant une charge graveleuse ;



a : paysage de plaine sableuse au pied de la falaise de Bandiagara.

© IRD/É. Roose

b : village dogon au pied d'une colline volcanique birrimienne du Mali.

© IRD/É. Roose

– PS3 (30 %), sols ferrugineux lessivés, assez épais, de texture sablo-limoneuse ;

– PL9 (20 %), sols ferrugineux lessivés à pseudogley, de texture limoneuse.

Le peuplement du plateau de Bandiagara au XIV^e siècle s'est réalisé par les Dogons, venus du Mandé (région sud-ouest du Mali), avec le souci de trouver un site refuge (THIBAUD, 2005). Le long confinement des Dogons sur le plateau est expliqué par l'insécurité qui régnait dans les plaines, en raison des guerres multiples nées de la constitution de grands empires ou de leur destruction (GALLAIS, 1994). Plus récemment, la géographie du plateau semble avoir favorisé la protection de la culture dogon à la frontière de l'empire théocratique peul du Macina fondé en 1818.

Les paysans cultivent principalement le mil (90 % de la SAU), un peu de sorgho, d'arachide, de fonio, en association avec le niébé. Les techniques culturales sont manuelles : le recours à la traction animale est réservé au transport du fumier, des récoltes et de la famille. Les paysans du plateau de Bandiagara et des régions voisines sont conscients de la fragilité de leurs sols et cela a été un obstacle majeur à la généralisation de la culture attelée qui avait été fixée dans les objectifs de l'opération Mil Mopti au cours des années 1970. Les rendements de l'agriculture pluviale restent faibles : pour le mil, ils varient de 350 à 950 kg/ha, une forte variabilité principalement expliquée par l'irrégularité des pluies. Les populations pratiquent le maraîchage de contre-saison qui concerne plusieurs cultures (échalote, tomate, gombo, etc.), mais l'échalote reste la plus importante par les superficies occupées et le poids économique.

Les apports de fumier de ferme (parcage du troupeau sur les champs ou transporté depuis un parc) et de compost sont ancrés dans les traditions. Concernant les engrais chimiques, les apports semblent rester rares et timides. Du fait de la saturation des terroirs, les jachères sont en recul.

Contrairement à la région deltaïque voisine, les potentialités pastorales du plateau de Bandiagara sont faibles, mais les agriculteurs tiennent à garder un cheptel minimum (de bovins, ovins et caprins) pouvant fournir de la nourriture et du fumier.

Érosion des sols : perception locale et ampleur mesurée

D'après des enquêtes réalisées à Dandoli (à 8 km de Bandiagara), 81 % des chefs d'exploitation agricole pensent que l'érosion observée est provoquée par le relief, alors que 19 % pensent que c'est une conséquence de la sécheresse et de la coupe des arbres (COULIBALY, 2007). Au cours de la même enquête, 85 %

des femmes interrogées attribuent l'érosion à la sécheresse et 15 % pensent que c'est une punition divine. Toutes les personnes enquêtées signalent la diminution des surfaces cultivables, l'ensablement des rivières et la transformation des pistes en ravines. Elles signalent par ailleurs, la faible productivité agricole, l'éclatement des familles et l'exode des jeunes.

Au cours de la saison pluvieuse de 2007 à Dandoli où il a été enregistré 645 mm et 30 événements pluvieux, 62,5 ha de cultures ont été décapés : 59 % des champs de sorgho, 33 % des parcelles de cultures maraîchères, 23 % des rizières et 14 % des champs de mil ont subi des dégâts d'érosion. Les zones de bas-fonds ont été particulièrement touchées par les crues des rivières. Le dépôt de sédiment est une dynamique affectant les bas-fonds où les semis sont souvent enterrés.

Techniques de gestion des eaux et des sols

Les techniques de gestion de l'eau et de la fertilité des sols sont largement pratiquées sur le plateau de Bandiagara depuis les temps reculés. Parmi elles, il faut citer les cordons pierreux, le zaï et les billons cloisonnés qui sont des techniques connues dans de nombreuses situations en zone soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Elles sont largement documentées (ROOSE, 1994 ; DIALLO et ROOSE, 2008).

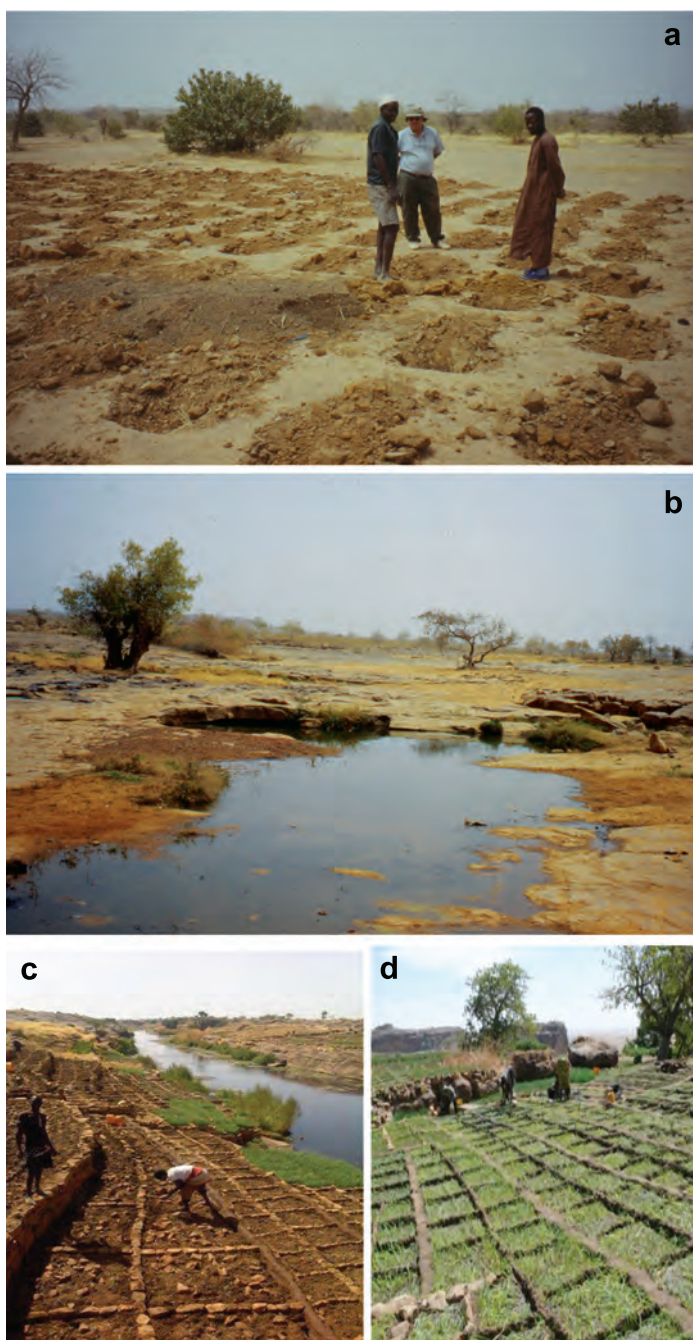
Au-delà, les paysans du plateau de Bandiagara partagent avec les paysans du Séno voisin, la pratique des « buttes organiques ». Les Dogons sont célèbres pour la création de sols sur des replats de grès.

Confection de buttes organiques en céréaliculture

Dans les champs de mil, des buttes sont formées à l'occasion du premier sarclage (21 jours après la levée). Il s'agit de buttes coniques recouvrant la biomasse des adventices arrachées. Elles sont disposées en quinconce entre les pieds de céréale, lesquels sont localisés sur les buttes antérieures. Au cours d'un deuxième sarclage, les adventices sont déposées sur les buttes. Cette pratique de butte permet de stocker des matières organiques dans les champs.

Apport et stabilisation de terre sur dalle gréseuse

La terre est transportée à partir des dépôts colluviaux importants, étalée sur la dalle gréseuse et maintenue entre des cordons pierreux soigneusement arrangés en nids d'abeille.



a : technique du zai sur les piedsmonts du pays dogon :
cuvettes, fumier et collecte du ruissellement sur une zone encroûtée. Pays dogon, Mali.

© IRD/É. Roose

b : création d'une mare collectant le ruissellement
sur une dalle gréseuse pour l'irrigation des oignons.

© IRD/É. Roose

c et d : création d'un sol sur une dalle gréseuse
et de microparcelles pour le maraichage irrigué : plateau de Bandiagara, Mali.

© D. Diallo

Il s'agit de création de sol, très généralement faite sur les sites offrant les meilleures ressources hydriques. Cet environnement créé est utilisé pour le maraîchage, mais aussi pour la céréaliculture.

En maraîchage, des planches sont formées en donnant des tailles qui varient selon le contexte : 30 cm x 30 cm à 2 m x 2 m. L'eau est apportée aux cultures avec une calebasse ou une gourde, à partir des eaux de rivières ou de puisards. L'utilisation de motopompe est notée ces dernières années, mais reste une pratique exceptionnelle.

Conclusions

Dans un contexte historique caractérisé par des conflits entre tribus, les Dogons se sont retirés dans les plateaux peu accessibles de Bandiagara. Ils ont développé sur les replats, présentant un recouvrement colluvial plus ou moins épais, des cultures de céréales associées à des légumineuses, la gestion de la biomasse disponible (adventices, fumier, feuilles d'arbres) et la création de zones maraîchères intensives, fumées et cloisonnées par des billons ou des petites planches hexagonales entourées de cailloux et des cordons de pierres. Pour irriguer ces petites surfaces, ils ont bloqué l'eau des ravines et des oueds par des diguettes de terre et transportent l'eau dans des calebasses stockant le volume d'eau nécessaire pour l'irrigation journalière d'un petit casier de 1 m². Il s'agit souvent de créer des sols agricoles et de les entretenir soigneusement par des techniques traditionnelles de GCES. Tant que la production est destinée à une faible population, ces techniques suffisent, mais elles doivent être complétées par des engrais minéraux et des moyens modernes, dès lors que les populations croissent exponentiellement dans les terroirs villageois.

Bibliographie

COULIBALY A., 2007 – *Amélioration du potentiel productif des sols à Dandoli (Bandiagara) par des techniques de DRS/CES*. Mémoire de maîtrise en vulgarisation agricole de l'IPR/Ifra de Katibougou, 51 p.

DIALLO D., ROOSE É., 2008 – « Gestion de l'eau et des sols sur toposéquences cuirassées en Afrique occidentale : limites des méthodes traditionnelles et perspectives ». In Roose É., Albergel J., De Noni

G., Sabir M., Laouina A. (éd.) : *Efficacité de la GCES en milieu aride*, Paris, AUF, EAC, IRD éditeurs : 92-96.

GALLAIS J., 1994 – *Les tropiques. Terres de risques et de violences*. Paris, A. Colin, 271 p.

KASSOGUÉ A., DOLO J., PONSIOEN T., 1990 – *Les techniques traditionnelles de conservation des eaux et des sols sur le plateau Dogon*. IIED, Dossier N° 23, 10 p.

PIRT, 1983 – *Les ressources terrestres du Mali (Atlas, rapport technique, annexes)*. New York, Kenner Printing Company.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO*, 70, 420 p.

ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2011 – *Gestion durable des eaux et des terres au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

THIBAUD B., 2005 – Le pays dogon au Mali : de l'enclavement à l'ouverture. *Espace Population Sociétés*, 1 : 45-56.

Techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols dégradés en régions semi-arides d'Afrique occidentale

Éric ROOSE

Robert ZOUGMORE

Leo STROOSNIJDER

Patrick DUGUÉ

Ibrahim BOUZOU-MOUSSA

Introduction : la réduction de la productivité des sols

La restauration de la productivité des sols et la réhabilitation du couvert végétal sont des enjeux vitaux pour les populations rurales de la zone soudano-sahélienne. En effet, suite à la pression démographique et socio-économique, à l'introduction de techniques peu durables de production, au surpâturage et à la surexploitation des ressources énergétiques (déforestation autour des villes et villages), on observe un raccourcissement du temps de jachère, la baisse des rendements des cultures malgré la fertilisation organo-minérale apportée, la dégradation des propriétés du sol liées à sa fertilité et la dénudation des terres dégradées (> 20 % des surfaces cultivables). Les causes proviennent, entre autres, du déséquilibre du bilan minéral (érosion sélective et exportations minérales non compensées par la fumure) et du bilan organique (érosion sélective et surtout minéralisation

des MO du sol accélérée par le labour) (ROOSE, 1981 ; PIERI, 1989 ; STROOSNIJDER, 1998 ; ROOSE et BARTHÈS, 2006 ; BILLAZ, 2012).

Il s'ensuit une réduction du taux de MO du sol, la dégradation de l'infiltration, une augmentation du ruissellement (STROOSNIJDER et HOOGLMOED, 1984), de l'érosion en nappe et du ravinement (ROOSE, 1994). Suite à l'augmentation rapide du coût des engrais minéraux, on a bien tenté de restituer au sol une partie de la biomasse sous forme d'enfouissement des résidus de culture, de compost ou de fumier, mais ces restitutions ne compensent qu'une faible partie des éléments exportés (30 % au max. des exportations par les récoltes et pertes par érosion, lixiviation et gazéification). On verra dans cet ouvrage les tentatives intéressantes de jachères courtes de légumineuses (Barthès *et al.* au Bénin ; Peltier au Congo-RDC ; Harmand au Nord-Cameroun ; Razafindrakoto à Madagascar). Depuis 60 ans, on a testé de nombreuses techniques de lutte antiérosive, de conservation de l'eau et des sols (CES) généralement mises au point en milieux tempérés européens ou américains (ROOSE, 1993), mais avec peu de succès : les analyses de HUDSON (1991) ont révélé l'échec de 75 % des projets à grande échelle. Ces échecs proviennent tant des techniques mal adaptées aux conditions tropicales (pluies très agressives, sols superficiels sablo-limoneux à structure fragile, pauvres en nutriments, acides, argile kaolinique à faible réserve en bases et en eau utile) qu'aux conditions socio-économiques ou culturelles des petits paysans africains qui répliquent « pourquoi consacrer tant de travail à conserver des sols qui sont déjà épuisés chimiquement et dégradés physiquement et biologiquement » ?

Dans ce chapitre, nous allons analyser les techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux semi-arides d'Afrique occidentale, techniques souvent abandonnées durant les années humides (1950-1970), puis redécouvertes et améliorées depuis les années 1990 (suite aux périodes sèches) (WRIGHT, 1982 ; CRITCHLEY *et al.*, 1992 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; ROOSE, 1994 ; MAZZUCATO et NIEMEIJER, 2000 ; ZOUGMORE *et al.*, 2003, 2004, 2008, 2009).

Le milieu

La zone soudano-sahélienne est encadrée au Nord par des zones sahéliennes arides exclusivement pastorales et au Sud par les zones tropicales agro-sylvo-pastorales semi-humides. Cette région de transition reçoit 350 à 800 mm de pluie en 4 à 6 mois chauds durant lesquels on observe souvent des périodes de sécheresse de 1 à 3 semaines et des problèmes de débuts tardifs et de fins précoces de saison pluvieuse rendant difficile le calage des cycles culturaux. Les averses sont souvent intenses et associées à des vents violents : en début de saison, les orages de 30 à 60 mm tombant sur les sols nus labourés peu

stables forment des croûtes de battance à la surface du sol entraînant une chute de la capacité d'infiltration (de plus de 60 mm/h à moins de 3-10 mm/heure) et le développement de ruissellement abondant pouvant atteindre 80 % des pluies malgré les pentes faibles (glacis de 1 à 3 %). La gestion de la couverture et de l'état de la surface du sol est donc très importante pour assurer un bilan hydrique harmonieux pour le développement des cultures et leur fructification. Contrairement au milieu méditerranéen voisin, la saison culturale a lieu en pleine saison chaude et l'ETP atteint 2 000 mm par an et plus de 150 mm par mois en période humide. Il est donc essentiel de développer des stratégies de capture et de stockage des pluies et du ruissellement pour faire face aux besoins hydriques des cultures (STROOSNIJDER et HOOGLMOED, 1984 ; ROOSE *et al.*, 1993).

Les paysages des savanes soudano-sahéliennes

Les zones granitiques et gréseuses donnent lieu à des collines cuirassées de sols gravillonnaires superficiels sur cuirasses, de longs glacis de sols ferrugineux sur cuirasses de plus en plus profonds et lessivés ou hydromorphes aboutissant à des vallées évasées aménagées en mares, d'où se répand tranquillement le faible drainage de ces grands paysages. Ces sols sont sablo-limoneux, pauvres en MO, acides, carencés en N et P, peu stables, battant et facilement érodibles mais assez faciles à travailler. Sur roches vertes riches en minéraux ferro-magnésiens, on observe des collines arrondies à pentes caillouteuses plus fortes et bas-fonds larges de sols bruns vertiques ou de vertisols beaucoup plus riches chimiquement, mais plus argileux (argiles gonflantes) et plus difficiles à gérer en saison des pluies. Le ruissellement passe de 2 % en milieu naturel protégé à plus de 30 % des pluies annuelles et plus de 70 % des grosses averses, en milieu cultivé sarclé. Même sur des pentes de 1 à 3 %, les pertes en terre sous culture conventionnelle (un labour et deux sarclages) atteignent 20 à 30 t/ha/an (ROOSE, 1994). Plus grave encore : le ruissellement étalé sur de faibles pentes entraîne de façon sélective les MO et les argiles + limons les plus riches vers les bas-fonds, accélérant ainsi la dégradation des sols cultivés. La végétation « naturelle » est une savane arbustive dans le Sud et des steppes dans le Nord entrecoupées de forêts sèches protégées et de forêts galeries le long des rivières. Cependant, cette végétation reflète les pratiques ancestrales de parcours et de feux de brousse qui favorisent la savane herbeuse. Les cultures vivrières principales sont des céréales (sorgho et un peu de maïs sur les terres sablo-argileuses, et le mil dans le Nord et sur terres sableuses ou gravillonnaires) et quelques légumineuses (arachide et niébé) et condiments. Les seules productions commercialisées sont le coton sur les meilleures terres du Sud, l'arachide, le niébé et les légumes dans les bas-fonds. Les familles paysannes ne sont généralement pas autosuffisantes en céréales : la vente des ruminants et des légumes constituent les principales sources de revenu. C'est une zone de contact entre les peuples d'éleveurs nomades (Peulh) et les agriculteurs sédentarisés depuis longtemps (Mossi, Senoufo, Bambara, Haoussa, etc.). La densité de population est très variable de moins de 30 à plus de 200 hab./km² en fonction des disponibilités en eau, de l'histoire et des zones urbaines. Traditionnellement, la terre appartient à la

communauté villageoise et aux familles fondatrices du village : un chef de terre issu de ces familles est responsable de la distribution des droits d'usage du sol, des parcours et des arbres entre les villageois. Le droit moderne, dans ces régions, fait qu'en dernier ressort la terre non aménagée appartient à l'État, mais l'administration intervient rarement dans la répartition du foncier, sauf en cas de conflits graves ou d'expropriation (routes, mines, etc.). Le fait que les zones pastorales et les résidus de culture constituent des ressources communes, entraîne des tensions entre les agriculteurs et les éleveurs de passage sur les champs récoltés, les jachères et les parcours. Par ailleurs, les codes forestiers stipulent que les arbres spontanés et même plantés dans les champs ne sont pas la propriété exclusive des usufruitiers de la terre : la valorisation du bois implique de payer des taxes d'abattage. L'ensemble de ces règles rend difficile la diffusion des techniques d'agroforesterie et d'aménagement des terres à l'échelle du bassin versant (HIEN 1995 ; KABORÉ, 2009).

Les techniques traditionnelles de gestion de l'eau

Face aux problèmes de ruissellement abondant provenant des collines surpâturées et des zones brûlées, tassées, encroûtées ou dénudées (*zipellé* au Burkina Faso, *zarma* au Niger), les paysans ont développé progressivement toute une gamme de structures susceptibles de ralentir le ruissellement, de capter les sédiments et les MO flottantes (fig. 1) (ROOSE, 1994 ; DUGUÉ *et al.*, 1993, 1994 ; TEMESGEN *et al.*, 2012).

Les alignements de pierres ou de touffes d'herbes, les fascines de piquets et de paille

Ce sont des obstacles perméables aux nappes ruisselantes, établis en courbes de niveau sur un seul rang. Ils ralentissent le ruissellement, l'étalent sur quelques mètres en amont du micro-barrage perméable, en même temps que les sédiments arrachés en amont et filtrent les résidus organiques flottants (pailles, fèces, graines et MO grossière du sol). Chaque alignement forme en amont une zone de 2 à 5 m, enrichie en eau, MO et en nutriments. En saison sèche, ces barrières piègent les limons et les sables emportés par l'érosion éolienne. Les termites sont attirées par ces MO., creusent des galeries et améliorent la capacité d'infiltration de cette zone. Il s'y développe alors quantité d'herbes et d'arbustes qui renforcent cette « ligne de défense » (ROOSE, 1994 ; MANDO *et al.*, 1999 ; ZOUGMORE *et al.*, 2009).

Le danger provient du colmatage de ces alignements et de l'eau qui trouve une issue et finit par creuser en aval une rigole par accélération du

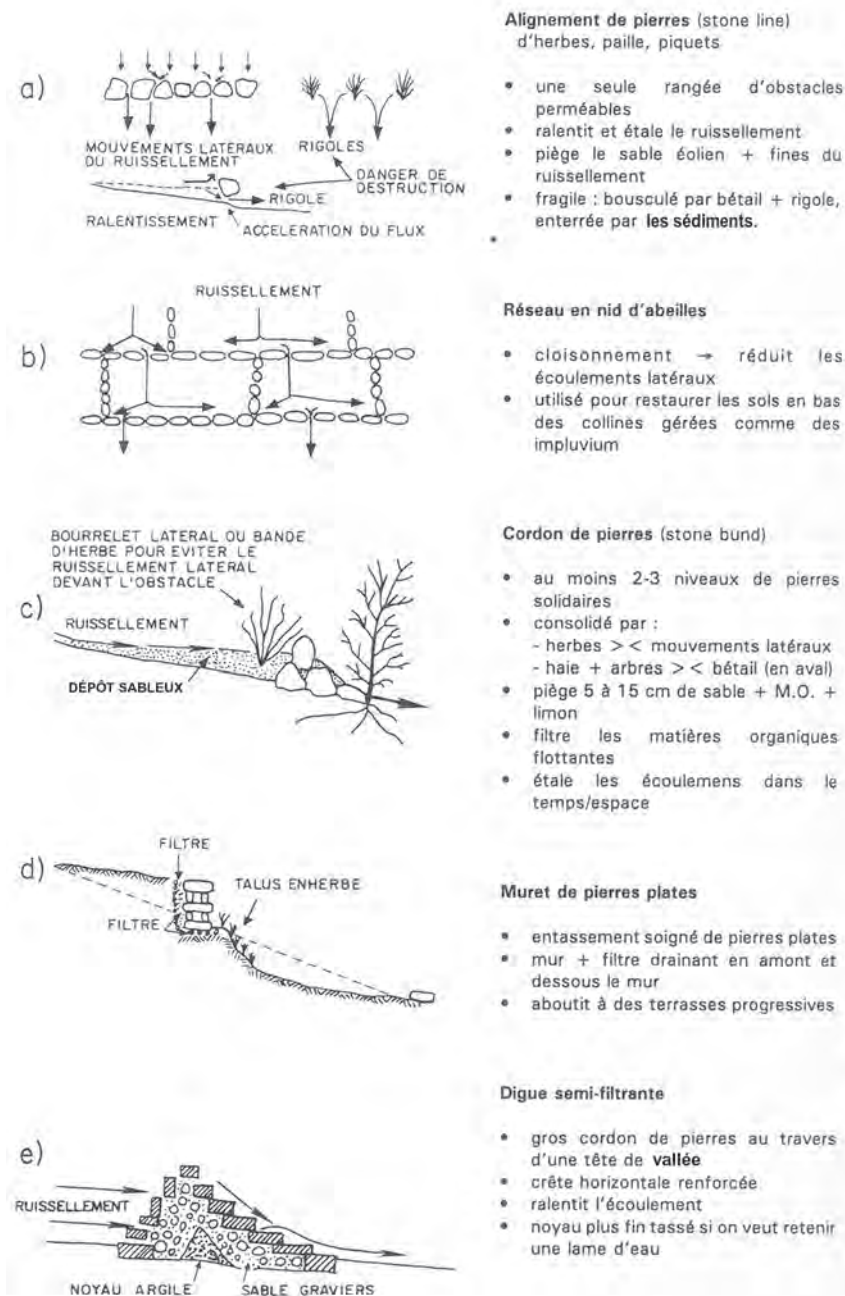


Figure 1
Exemples de micro-barrages perméables en milieu semi-aride.
Source : d'après ROOSE, 1994.

ruissellement localisé (effet venturi) capable de déplacer des gravillons. Ces alignements sont fragiles : d'un coup de sabots, les animaux qui divaguent peuvent déplacer une pierre et créer une brèche où l'eau accumulée s'en-gouffre (fig. 1a). De même, les piquets pourrissent et les touffes d'herbes évoluent au cours du temps : soumises au broutage répété en saison sèche, les bourgeons productifs s'écartent laissant un vide en leur centre par où les eaux s'échappent créant des mouvements latéraux dans la nappe de ruissellement accumulé en amont. La durée de vie de ces alignements est donc limitée si on néglige leur entretien, mais ils peuvent être au départ une véritable « ligne de défense » où s'accumulent les déchets de labour, des résidus de culture, des termitières et des pierres déterrées lors des labours : ils forment alors un véritable filtre biologiquement très actif (SPAAN, 2003). Pour lutter contre les mouvements latéraux de la nappe d'eau accumulée en amont, les Mossi ont développé un système de cloisons latérales donnant une structure en nid d'abeilles capable de piéger les MO qui circulent avec le ruissellement et de restaurer les sols en bas des collines (fig. 1b). On peut aussi colmater les brèches avec de grosses pierres, dès que les chemins d'eau se dessinent. Enfin, il est important de casser la croûte de battance ou de sédimentation qui bouche la surface des champs : un sarclo-buttage cloisonné réduit beaucoup les risques de concentration des eaux de ruissellement, de même qu'un filtre de paille posé à l'amont de la ligne de défense (ROOSE, 2004).

Les cordons de pierres en courbe de niveau

Ils sont composés de plusieurs niveaux de pierres disposées en courbe de niveau, généralement trois rangées sur les glacis de cette région (fig. 1c). Le premier étage formé de grosses pierres est « planté » dans le sol sur quelques centimètres et colmaté avec la terre de manière à accumuler en amont 10 à 15 cm de terre sableuse humifère filtrante pour améliorer la capacité de stockage de l'eau et renforcer l'horizon humifère. Le deuxième étage et le troisième rang à l'aval sont composés de pierres plus petites, ou de touffes d'herbes, qui répartissent les écoulements excédentaires, absorbent l'énergie cinétique du ruissellement et suppriment le risque de creusement des rigoles à l'aval lors des plus gros orages. Le travail du sol dans la bande cultivée (15 à 25 m de large perpendiculairement à la pente) et l'érosion en nappe et éolienne provoquent la formation rapide d'un talus qu'il faut stabiliser avec des herbes (*Andropogon* ou *Pennisetum*). L'aménagement d'un hectare en cordons de pierres (400 m linéaires) exige 30 à 60 jours de travail, plus le transport depuis la carrière (1 jour de camion) (DUGUÉ *et al.*, 1993 ; ROOSE, 1994). Ces cordons isohypses étalent le ruissellement en nappe et provoquent une amélioration de l'infiltration (baisse des crues et alimentation des nappes) et le dépôt des sables, des agrégats, des particules fines humifères et des flottants organiques. Le stockage d'eau est plus important que pour les alignements et les paysans considèrent qu'ils gardent en place la fertilité des sols et permettent une meilleure valorisation de la fumure.

Danger

Si la crête du cordon de pierres n'est pas strictement horizontale (cas des courbes isohypses lissées pour favoriser la culture attelée), la nappe se rassemble dans les points bas créant des rigoles évoluant en ravines qui drainent tout le versant. Si par contre on tente de suivre strictement les courbes de niveau (très difficile sur des pentes de 1 à 3 %), on aboutit à des largeurs de champs cultivés très variables (écart de dix mètres sur une pente de 2 % en cas de termitière), ce qui augmente le volume de pierres à déplacer et gêne beaucoup la mécanisation de la culture. Même dans ce cas, on observe la formation de chemins d'eau. En lissant les courbes de niveau, on peut traiter les chemins d'eau en renforçant ces zones par des grosses pierres, en aplanissant progressivement le champ par les techniques culturales, en améliorant la rugosité de la surface du sol (travail grossier, sarclages et buttage cloisonné), en semant des herbes de part et d'autre du cordon pour freiner le ruissellement, ou en cloisonnant le champ sur deux mètres avec des billons en terre (SERPANTIÉ et LAMACHÈRE, 1989). La dégradation des cordons de pierres par le bétail peut être réduite par la plantation d'herbes, d'arbustes et des arbres dans le cordon pour aboutir à un embocagement. Au cas où il manque de pierres ou de moyens de transport, on peut semer entre deux billons isohypses une bande d'herbes, de sorgho ou directement, une haie vive et des arbres pour obtenir le même effet (ROOSE, 1994). Dans les régions montagneuses, les paysans ramassent les pierres gênantes et les entassent à la limite des champs : si elles sont disposées en courbe de niveau, elles fonctionnent à la fois comme limite de champs et cordons de pierres. En Éthiopie et au Rwanda, les cordons de pierres peuvent atteindre plus d'un mètre de hauteur (ROOSE, 1992).

Les murettes en pierres sèches

Dans les collines où on peut disposer de bonnes pierres rectangulaires, on creuse une tranchée isohypse et on construit un mur en pierres sèches empilées soigneusement et calées par des cailloux, protégé en amont par un drain de gravillons pour dissiper la pression hydrostatique (ex. collines gréseuses autour de Bamako au Mali) (ROOSE, 1994). On aboutit rapidement à la formation de terrasses progressives par le rejet de la terre de la tranchée en amont, par érosion hydrique et surtout par érosion aratoire (labour versant vers l'aval). Pour réduire le déterrement du pied du mur lors des labours, il faut y planter des arbres fruitiers ou des fourrages permanents. Le coût de construction est beaucoup plus important que pour un cordon de pierres qui se monte progressivement avec les pierres de toutes tailles extraites lors du labour : en fonction de la pente et de la disponibilité en pierres, il faut compter 500 à plus de 1 000 jours de travail par hectare pour des murs de 1 mètre de haut sur des pentes moyennes de 20 %. Ce n'est donc rentable que si on dispose de moyens d'irrigation et d'un marché où écouler des produits valorisants.

Les digues semi-filtrantes

Il s'agit de gros cordons de pierres entassées sur un noyau de terre imperméable ($H = < 50$ cm) construits en courbe de niveau pour barrer une ravine ou une

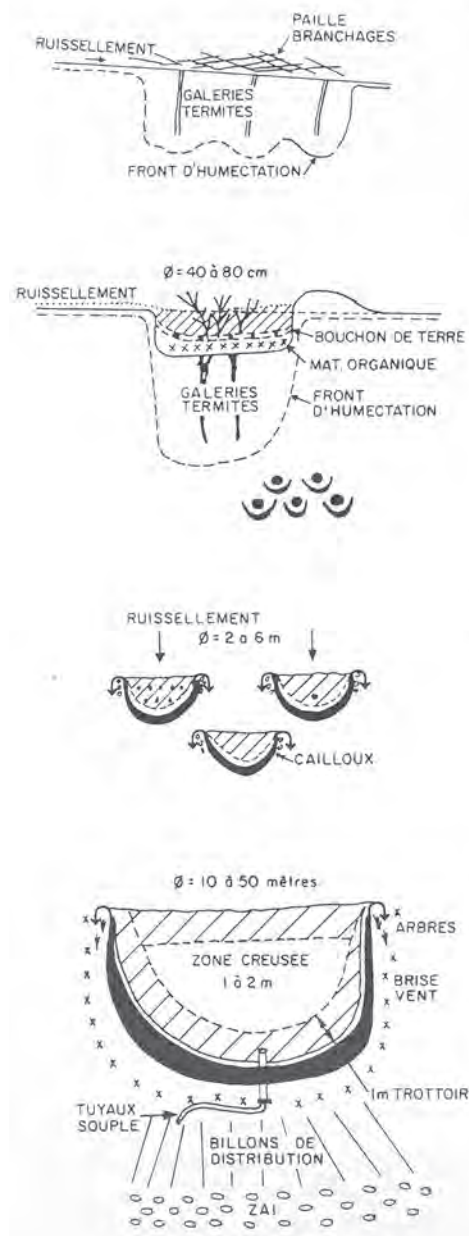
tête de vallée. Les plus gros ouvrages nécessitent l'utilisation de gabions. L'objectif premier de ce type d'ouvrage est de ralentir les crues dans les exutoires, tout en piégeant les sédiments enrichissant une petite surface qu'il sera ensuite possible de valoriser avec une culture hautement productive (riz, maïs, sorgho) même en année déficitaire (ROOSE, 1994). D'après ROCHETTE (p. 252), le rendement en sorgho est passé en moyenne de 0,6 t/ha en sec sur les versants non aménagés, à 1 t/ha sur bas-fonds non aménagés et 1,9 t/ha sur parcelles aménagées avec digue filtrante. Dans certaines situations, le stockage de quelques centaines de mètres cubes d'eau de ruissellement est possible tant que les sédiments ne sont pas arrivés en haut de l'ouvrage, ce qui permet l'abreuvement du bétail ou l'irrigation d'un petit jardin. Dans tous les cas, ces ouvrages ont un effet remarquable sur l'érosion ravinante et l'alimentation de la nappe.

Dangers

Si la crête de la digue n'est pas parfaitement horizontale ou la filtration est trop rapide au travers de la digue de grosses pierres, on risque d'observer le ruissellement emporter les pierres de crête ou creuser un renard sous la digue qui finira par former une brèche et une ravine. Pour l'éviter, il faut construire un filtre de gravier dans la cuvette de fondation et entre les grosses pierres du cœur de la digue. Normalement, les eaux retenues s'écoulent en 2-3 jours laissant un terrain détrempe en amont de la digue. Il arrive que le sorgho qui profite traditionnellement des fonds de vallée, souffre d'engorgement du sol, alors qu'il n'y a pas assez d'eau pour assurer le cycle complet du riz. Si on veut stocker de l'eau pour le bétail ou créer une rizière, il vaut mieux construire une digue imperméable en terre retenant suffisamment d'eau. Une diguette de 1 à 2 m de haut et de 100 à 200 m de long bâtie au travers d'un vallon exige 300 à 600 jours de travail et l'organisation d'un travail communautaire (15 hommes pendant 30 jours), alors que les bénéfices profitent à quelques familles (0,5 à 1 ha) : il faut donc trouver des compensations financières ou échanger des journées de travail avec les autres travailleurs. Le coût moyen pour une digue, qui consomme 100 à 500 m³ de pierres, varie de 1 000 à 2 000 €. Pour le même volume de pierres, on pourrait aménager en cordons 10 à 20 ha de versants appartenant à une vingtaine de familles, mais les cordons de pierres n'apportent pas la même sécurité de production en année déficitaire.

Les bandes enherbées isohypses

Ces bandes de 1 à 4 mètres de large réduisent le ruissellement de 40 à 60 % du témoin et l'érosion en nappe de 60 à 90 % grâce au ralentissement et l'étalement du ruissellement et au piégeage des MO, des agrégats et des sédiments sableux perméables. Elles orientent le travail du sol selon les courbes de niveau et produisent des herbes appréciées pour l'alimentation du bétail ou pour les toitures et divers produits artisanaux. Le risque de ces aménagements très simples, c'est la disparition de ces bandes enherbées lors des feux de brousse, de la mise en jachère et du fait du surpâturage, ainsi que le vieillissement des touffes d'herbe



Paillage (herbes + branchettes)

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

Zai (pitting + fumier + termites)

- cuvette de 50-80 cm Ø, 10-15 cm en profondeur, terre en aval en croissant
 - capte le ruissellement sur bassin 3/1
- concentration eau + M.O. + nutriments
 - rendement > 800 kg/ha sur sol épuisé
- action ++ des termites sur infiltration. Grâce aux galeries l'eau infiltrée est à l'abri de l'évaporation directe

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

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

Boulis = mare creusée au bas d'un glasis à la limite du parcours

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

Figure 2
Collecte et stockage du ruissellement sur versant semi-aride.
Source : d'après ROOSE, 1994.

au bout de 4 à 10 ans (ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1994). L'expérience montre que les paysans réduisent progressivement la largeur des bandes enherbées lors des labours à moins d'un mètre, ce qui nous ramène aux « lignes de défense » où se mêlent herbes et pierres arrachées lors du sarclage, arbustes et arbres utiles formant un filtre pour ralentir le ruissellement et piéger les MO et les sédiments grossiers.

Les haies vives arbustives

Elles devraient être constituées de 2 à 3 lignes d'arbustes plantés en quinconce, de préférence des légumineuses renforcées par un filtre de paille ou des émondes de taille en amont. Elles fonctionnent comme des micro-barrages perméables très efficaces (SPAAN, 2003 ; DIATTA *et al.* ; 2012 ; BOLI et ROOSE 1998 ; KÖNIG, 2015 ; NDAYIZIGIYE, 2015 ; DUCHAUFOUR *et al.*, 1996). Au bout de 4 à 10 ans se forme un talus de 50 à plus de 100 cm de haut stabilisé par la litière et les racines. La plupart des paysans optent pour une seule ligne d'arbres et d'arbustes qu'ils ont déjà du mal à entretenir lorsqu'ils arrivent à la taille adulte (le seul outil efficace, le sécateur à deux mains, n'est pas disponible, car trop onéreux). On distingue premièrement, la haie défensive ou d'enclosure interdisant l'accès des animaux. Dans ce cas, les arbustes ne doivent pas être fourragers : des euphorbes très résistantes, mais toxiques et peu productives (ex. *Euphorbia balsamifera* ou *Jatropha curcas* produisant de l'huile utilisable comme carburant [PRESSOIR, 2012]), des acacias, et autres plantes à épines. Deuxièmement, la haie mixte combine les arbustes précédents (remplacer parfois par des fils barbelés) et des arbres fourragers de plus de 2 m – des légumineuses (*Leucaena*, *Calliandra*, *Acacia*, *Cassia*) – et peut fournir du fourrage de qualité en saison sèche ou du paillage après le semis des céréales et autres cultures.

Tous ces aménagements perméables, en ralentissant les eaux de ruissellement, prolongent le temps de concentration de la crue au niveau du drainage, réduisent les débits de pointe (donc le transport des sédiments) plus que le volume ruisselé total. Ils n'améliorent l'infiltration que localement en amont des micro-barrages, à moins d'améliorer la rugosité du sol par les techniques culturales (labour grossier, billonnage cloisonné, gaufrage, cuvettes) (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1990).

Les techniques favorisant le stockage de l'eau et des nutriments

Le paillage d'herbes ou de branchettes

En région semi-aride, la biomasse disponible en fin de saison de saison sèche est très recherchée par les éleveurs et leur bétail (droit de vaine pâture) et par les agriculteurs (matériau de construction et bois combustible et seule source

d'énergie). Il arrive cependant que, très localement, les résidus de culture soient très peu broutés sur place par le bétail (grosse tiges de sorgho, par exemple au sud de Ouagadougou) et partiellement piétinés à la surface du sol. Au début de la campagne suivante, le paysan rabat la végétation encore dressée et sème directement sous cette litière à peine écartée d'un coup de houe (*dabila*). Au Yatenga, on peut observer des paysans pauvres, dépourvus de bétail, ramasser les branchettes de diverses espèces arbustives (*Guiera senegalensis*, *Piliostigma thoningii* ou *reticulatum* et des légumineuses) et les étaler à la surface de petits champs pour « fumer leur lopin de terre » (ROOSE *et al.*, 1993 ; LAHMAR et YACOUBA, 2012). LAHMAR et YACOUBA (2012) ont décrit comment deux espèces dont les feuilles sont peu appréciées, *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum*, sont gérées par les agriculteurs pour fournir un paillage localisé et du bois de feu, une fois les feuilles libérées. Ces branchettes ne sont pas hachées, ni éclatées comme le BRF : elles attirent les termites qui vont les consommer, ouvrir des galeries dans la croûte du sol et enfouir des MO susceptibles d'être restituées progressivement aux cultures. Cette litière absorbe l'énergie de la battance des pluies et du ruissellement, améliore et stabilise l'infiltration, piège des sédiments éoliens et hydriques et fournit pas mal de carbone et de nutriments au sol. Au Niger, certains arbustes sont traités comme des micro-jachères qui poussent en saison sèche, puis rasés au moment de la plantation, les branchettes étant étalées sur le terrain semé en céréale (mil). Trois semaines plus tard, lors du sarclage, les feuilles se sont détachées des tiges séchées qui sont progressivement récupérées pour la cuisine. On observe qu'autour de ces buissons, la croissance des cultures est meilleure qu'à plus de 3 mètres des touffes (LOUPPE, 1991 ; WEZEL et BÖCKER, 1999). Plus rarement, certains paysans peuvent récolter des pailles d'herbes de brousse non consommées par le bétail et l'épandre sur de petits espaces « séchants » dont ils souhaitent améliorer la fertilité. Notons que dans tous les cas observés en région soudano-sahélienne, il s'agit d'une litière peu épaisse (1 à 3 cm) qui tente de couvrir et nourrir le sol en début de saison des pluies plutôt que les paillis épais (5 à 15 cm) observés au Rwanda et Burundi sous caféiers pour maintenir l'évaporation réduite en saison sèche. De plus en Afrique soudano-sahélienne, il y a une forte concurrence entre les différents usages de ces biomasses (fourrages, matériaux de construction, combustible, couverture du sol, etc.) (voir Dugué *et al.* chap. 30 dans cet ouvrage).

Les cuvettes (Zaï = tassa = towalen, pitting, microcatchment)

Pour restaurer durablement la productivité des cultures dans ces zones semi-arides, il ne suffit pas de freiner localement la vitesse du ruissellement et d'étaler en nappe le ruissellement : il faut encore concentrer le peu d'eau et de nutriments disponibles au pied des touffes de céréales.

Au Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso), le zaï est une technique traditionnelle de récupération des terres dégradées (zipellé, terres encroûtées, tassées, blanchies par la battance, véritables déserts, alors qu'il pleut 400 à 800 mm ; ganagani,



a : Djengo = gauffrage du sol sableux des champs de case avec enfouissement de fumier.
Arbre à palabre devant la concession, habitat dispersé Mossi, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

b : Zipelle = sol dégradé par la culture sur le glacis : restauration comportant des cordons
de pierres, des apports de poudrette (1 à 3 t/ha/an) et les cuvettes de zai.

Gourga, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

sol similaire au Niger) (ROOSE *et al.*, 1993). Aujourd'hui, tous les sols de la région sont concernés à l'exception des dunes et des vertisols : les sols gravillonnaires des sommets de glacis, les sols ferrugineux limono-sableux de mi-pente et les sols alluvionnaires de bas de pente (MARCHALL, 1986). On peut aussi observer leur réussite au pays dogon (towalen au Mali), au Niger (tassa ou taksa en haoussa dans la vallée de Keita), au Tchad et leur échec dans la zone soudanienne plus humide du Nord-Cameroun (WRIGHT, 1982 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO, 2004 ; DROUX, 2008).

D'après BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO (2004), cette technique traditionnelle trouverait ses origines dans l'agriculture nabatéenne du Proche-Orient et aurait été introduite au Sahel par les pèlerins musulmans. Les Mossi se seraient inspirés de la pratique du towalen développée sur le plateau dogon. Elle est décrite en détail dans la figure 3 (ROOSE *et al.*, 1993). Le zaï consiste à préparer très tôt, en début de saison sèche, une terre dégradée, encroûtée et durcie en creusant à la pioche tous les 80 à 120 cm en quinconce des cuvettes de 20 à 40 cm de diamètre (en fonction de l'aridité), de 10 à 20 cm de profondeur, en rejetant la terre vers l'aval en croissant pour mieux stocker le ruissellement. La surface non travaillée du champ, qui sert d'impluvium, représente 5 à 10 fois la surface travaillée (WRIGHT, 1982). Pendant la saison sèche, ces micro-bassins piègent des sables, des limons et des matières organiques emportés par le vent du désert (harmattan). Avant les premières pluies, les paysans y enfouissent une ou deux poignées de poudrette (soit 1 à 3 t/ha de déjections animales des parcs exposées au soleil et réduites en poudre par le piétinement du bétail), du fumier, du compost ou, à défaut, des cendres mélangées à des pailles ou des branchettes et des feuilles. Les termites (Trinervitermes ou d'autres), attirés par les MO, creusent des galeries au fond des cuvettes et les transforment en entonnoirs créant ainsi des poches humides en profondeur, à l'abri de l'évaporation rapide : ces réserves d'eau permettent aux jeunes cultures de tenir trois semaines de sécheresse (ROOSE *et al.*, 1993). Après un orage, la famille sème dans chaque poquet une douzaine de graines de sorgho sur les terres lourdes ou une vingtaine de graines de mil sur les sols sableux ou gravillonnaires : en levant ensemble, ces petites graines soulèvent la croûte de sédimentation qui se forme au fond des cuvettes lors des premiers orages. Trois semaines plus tard ont lieu le démaillage à 3–4 plants vigoureux et le sarclage des cuvettes (surface réduite à 20 % du champ). S'il en a les moyens, le paysan complète la fumure organique par un apport minéral localisé au poquet (N et surtout P) qui sera largement amorti par l'augmentation de la production en grains (KABORÉ, 1995, 2005 ; ZOUGMORE *et al.*, 2008). Ces techniques de préparation du sol dégradé permettent de produire dès la première année de 0,5 à 1,6 t/ha de grains et de 2 à 4 t/ha de pailles appréciées pour le bétail, l'artisanat et divers usages ménagers. L'année suivante, soit les fermiers creusent de nouvelles cuvettes entre les précédentes et ajoutent des MO, soit s'ils manquent de fumier, ils arrachent à la houe la souche de sorgho et la posent sur la surface encroûtée où elle sera consommée par les termites. Ensuite, ils grattent le fond des anciennes cuvettes et y sèment directement une céréale ou le niébé (haricot noir) (SOMÉ *et al.*, 2004). Il semble que

Décembre à avril

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

Avril à juin

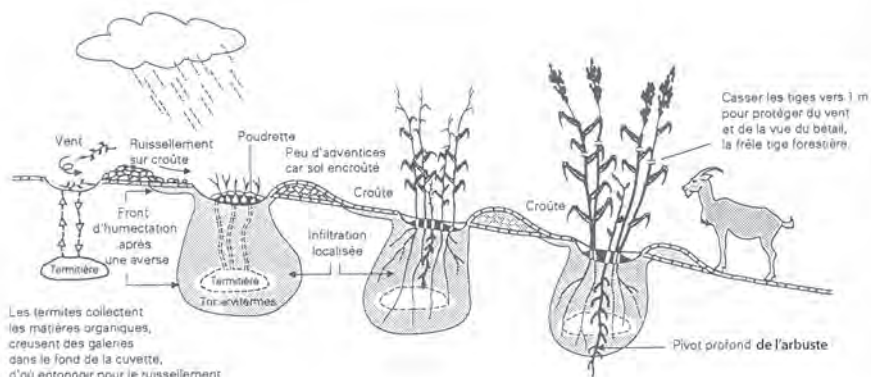
- Après la première pluie, apport de Z poignée de poudrette (= 3 t/ha).
- Les termites y creusent des galeries enrobées d'excréments.
- Semis en poquet à la deuxième pluie.
- Eau infiltrée, stockée en profondeur à l'abri de l'évaporation directe.

Juin-juillet

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

Novembre

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



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

Figure 3
Le zai : méthode traditionnelle de restauration des sols.
Source : d'après ROOSE, 1994.

ce système de production intensif n'accélère pas la dégradation de ces terres pauvres. Au contraire, au bout de cinq ans, toute la surface a été remuée par la houe et les termites. D'après les paysans de Gourga (Yatenga), ce système présente l'avantage de conserver la MO et la fumure dans la cuvette alors que dans les champs labourés voisins, le ruissellement les emporte en grande partie dès les premiers gros orages. De plus, le développement de jeunes arbres est favorisé par cette technique, car les fèces des animaux contiennent souvent des graines de ligneux. Mais sur des sols sableux du Niger, BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO (2004) et FATONDI *et al.* (2009) ont mis en évidence des pertes d'eau drainant sous les cuvettes, ce qui peut entraîner des fuites d'azote et des pertes de rendement du mil.

BOLI et ROOSE (1998) ont aussi constaté qu'en zone soudanienne, le rendement en maïs fut réduit sous zaï par lessivage de l'azote durant les semaines les plus pluvieuses au Nord-Cameroun (Mbissiri).

Effets sur le sol

Après deux années d'application continue du zaï sur un sol ferrugineux peu profond et un sol brun eutrophe, ROOSE *et al.* (1993) n'ont pas constaté de changement significatif de la fertilité des sols, à part l'augmentation des particules fines qui peut être attribuée à l'activité des termites. Par contre quelques années plus tard, FATONDI *et al.* (2009) observent des modifications du pH et du complexe absorbant du sol sableux, mais pas dans le sol argileux. ROOSE *et al.* (1993) concluent que la réhabilitation de la couverture végétale et de la productivité des cultures serait plus rapide que la modification des propriétés du sol.

Le zaï semble une technique appropriée pour réduire les effets de sécheresse liés à l'espacement des pluies. ROOSE *et al.* (1993) suggèrent que grâce au stockage de l'eau en profondeur, le zaï tamponne l'effet d'un épisode déficitaire de 2 à 3 semaines si la capacité en eau du sol est suffisante. Sur des sols sableux ou peu épais sur cuirasse, le zaï serait moins efficace, à moins de forts apports de matières organiques.

Effets sur les cultures et la biodiversité

Les cuvettes seules et leur effet sur l'alimentation en eau des cultures ne suffisent pas à relever suffisamment la production en céréale (ROOSE *et al.*, 1993 ; KABORÉ, 1995 ; FATONDI *et al.*, 2009). L'apport de matières organiques est primordial pour relever la capacité de stockage en eau et en nutriments, ainsi que les activités biologiques. En Afrique cependant, le fumier est généralement limité en quantité (une exploitation produit rarement plus de 7 à 8 m³ de fumier composté) et en qualité (il s'agit généralement de déjections animales exposées au soleil et réduites en poudre par le piétinement des animaux au parc de nuit). De plus les sols étant carencés en azote et surtout en phosphore assimilable, les fourrages et les fumiers le seront aussi. Il est donc recommandé d'apporter un complément minéral aux cultures (urée, phosphates de chaux) qui permettent de valoriser au

mieux ces apports localisés en eau (ROOSE, 1994). Les apports minéraux utilisés seuls sont mal valorisés surtout dans les sols acides à toxicité aluminique ou à faible capacité de rétention en eau et en nutriments (BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO, 2004). ZOUGMORE *et al.* (2003) arrivent aux mêmes conclusions sur des demi-lunes et des zaï. La levée de la contrainte hydrique dans les sols ferrugineux tropicaux dévoile l'autre contrainte majeure de l'acidité et de la déficience en nutriments dans ces sols tropicaux. On observe sur les parcelles traitées en zaï que les cuvettes piègent les graines transportées par le vent, par le ruissellement et par les paysans (fumier). ROOSE *et al.* (1999) ont compté sur les tas de poudrette les graines de 22 espèces d'herbacées et une douzaine de légumineuses arbustives consommées par le bétail.

La technique du zaï a souvent été décrite comme une simple technique culturale comparable au billonnage cloisonné. En réalité, c'est une technique complexe faisant appel à de nombreux processus : capture des eaux de ruissellement sur des zones encroûtées (rôle des micro-barrages et des cuvettes), concentration de l'eau disponible et des ressources en MO et en nutriments, capture des sédiments véhiculés par l'eau et le vent, travail du sol localisé, infiltration et stockage de l'eau en profondeur, alimentation locale des nappes phréatiques, enracinement profond, renouvellement des nutriments par les pluies et le ruissellement, stimulation ou optimisation de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses (arbustes et niébé associés aux céréales), remontées de particules fines par les termites et enfouissement des MO grossières, réduction du ruissellement et des pertes de suspensions riches en MO et en nutriments, tout ceci concourant à la réhabilitation d'un système agro-sylvo-pastoral. Cette technique permet d'accroître la surface cultivée par récupération de sols dégradés et optimise l'investissement en intrants et en travail. Il permet de réinvestir dans des terres protégées du ruissellement, mais exige des cultures intensives et des arbres pour réduire les risques de pertes par drainage (DIALLO *et al.*, 2008).

Même en l'absence de termites, la technique du zaï améliore la décomposition des matières organiques, la libération des nutriments et l'efficacité des engrais (FATONDJI *et al.*, 2009). Il reste cependant des problèmes de synchronisation entre la demande de nutriments des cultures et leur libération par la minéralisation des MO. Dans les sols sableux (au Cameroun comme au Niger), on observe parfois des pertes d'azote par drainage profond, lorsque l'enracinement des plantes n'est pas encore assez développé pour absorber l'azote minéral libéré par les engrais minéraux ou le fumier bien décomposé (BOLI et ROOSE, 1998 au Nord-Cameroun ; FATONDJI *et al.*, 2009 au Niger). De même, ROOSE *et al.* (1993) constatent que sur des sols sableux ou peu épais sur cuirasse, le zaï est moins efficace, à moins de forts apports de matières organiques. De plus, ils ont montré que le zaï n'est pas approprié aux zones sahéliennes recevant moins de 300 mm (déficit hydrique trop fréquent), ni aux zones soudaniennes recevant plus de 800 mm de pluies, car le drainage de l'excès d'eau capté par les cuvettes entraîne alors le lessivage de l'azote et des bases (ex. de Mbissiri au Nord-Cameroun). Le zaï ne doit donc pas être considéré comme une technique pour tous les sols dégradés de l'ensemble des zones de savane (ROOSE *et al.*, 1993).

Une diversité de pratiques

La technique du zaï décrite ici (fig. 3) connaît de nombreuses variantes : presque chaque paysan a sa propre recette adaptée à l'environnement de son exploitation.

Le zai forestier⁸

Certains paysans préservent durant le sarclage les jeunes pousses d'arbustes fourragers légumineuses tous les cinq poquets de sorgho. Pour protéger ces jeunes arbustes des dents des chèvres en saison sèche, l'agriculteur coupe les tiges de sorgho au-dessus du niveau des yeux de ce prédateur pour qu'il n'aperçoive pas les frêles tiges des arbustes au milieu des milliers de tiges de sorgho. Ces plants forestiers prospèrent rapidement au milieu des céréales, recolonisent sans frais ces zones désertifiées et participent au maintien de la fertilité des sols. On pourrait croire que l'exportation de 1 à 1,5 t/ha de graines de céréales et de 2 à 4 t/ha/an de paille accélérerait la dégradation de la fertilité du sol. En réalité, l'enquête auprès des paysans de Gourga au Yatenga montre qu'au bout de 35 ans d'exploitation, des champs aménagés en zaï et régulièrement entretenus continuent à produire plus que la moyenne régionale grâce aux apports de poudrette, aux remontées par les termites et les arbustes, aux apports par le ruissellement, les pluies et le vent.

Le zaï mécanisé

Pour réduire les temps de travaux (300 heures/ha à la houe et au pic), ROOSE *et al.* (1993) ont testé l'usage d'une dent tractée par un bœuf pour fendre le sol en courbe de niveau tous les mètres et en oblique pour créer un damier en losange. Aux intersections, on creuse manuellement la cuvette, ce qui permet de gagner 200 heures de travail. BARRO *et al.* (2005) ont validé en milieu paysan la mécanisation du zaï par la traction asine d'une dent (IR 12) portée sur un porte outil (Kassine) : réduction des temps de travaux (40 heures/ha), augmentation des rendements de 400 kg en culture manuelle à 800 kg/ha/an en culture à traction asine et 1 200 kg par adjonction d'une minidose d'engrais NPK, augmentation de production des pailles de 5,5 t/ha en zaï manuel à 8,5 t/ha/an en zaï mécanisé avec complément minéraux.

Le djengo

Il s'agit aussi de cuvettes (plus petites et plus denses que pour le zaï), mais creusées au début de la saison des pluies en sol humide (plus tard que le zaï) sur des sols sableux. Le sol étant moins compact, le travail est réalisé à l'aide d'une houe à long manche (appelée djengo) au lieu d'une houe courte à manche recourbé (boamboara) qui oblige à travailler « courbé en deux ». L'investissement en travail est bien moindre que pour le zaï (105 heures, soit 21 HJ/ha). Les cuvettes sont creusées sur un sol nu houé manuellement ou sur un sol déjà

8. ROOSE *et al.*, 1993, 1999.

couvert de jeunes adventices : leur densité atteint 40 000/ha, leur diamètre 22 à 27 cm et leur profondeur 8 cm et l'apport de MO est d'environ 7 à 8 t/ha (50 % d'humidité). Le temps de l'aménagement varie de 15 à 25 jours/ha et le rendement (0,93 t de grain et 2,3 t/ha de paille) est à peine plus élevé qu'après un semis direct (0,9 t de grain et 1,8 t/ha de paille) (HIEN *et al.*, 2012).

Les demi-lunes

Il s'agit de capter le ruissellement à l'intérieur de diguettes en terre de 30 à 50 cm de hauteur en forme de croissant de lune de 2 à 6 m de diamètre, alignées le long des courbes de niveau et implantées en quinconce tous les 4 à 10 m. À l'intérieur des demi-lunes sont semées des céréales (mil ou sorgho), ou plantés des arbres adaptés aux zones semi-arides (200 à 500 mm). Comme pour le zaï, la capture du ruissellement sur 10 à 20 m² permet de doubler l'eau infiltrée et de résister à des périodes de sécheresse de 2 ou 3 semaines. Cependant, en période de fortes pluies, il y a un risque d'engorgement en particulier pour le mil et les légumineuses associées. Par ailleurs, la maîtrise de l'alimentation hydrique fait apparaître la seconde contrainte, l'acidification du sol et les carences en nutriments. Seul un apport complémentaire de fumier, de phosphate calcique naturel broyé et d'engrais minéraux permet d'améliorer le pH, le taux de MO, d'azote, de phosphore assimilable et les bases de l'horizon superficiel du sol, ce qui entraîne l'augmentation significative des rendements en grain (1,6 t/ha) et pailles (4,2 t/ha), même sur sol ferrugineux gravillonnaire superficiel (Desbos *in* ROCHETTE, 1989) (ZOUGMORE *et al.*, 2003 ; 2004).

Les cuvettes fruitières

C'est un cas particulier de demi-lunes de petite taille (2-4 m de diamètre) adaptées à la plantation d'arbres fruitiers et à leur besoin en eau. Elles drainent quelquefois le ruissellement qui se développe sur les pistes, dans les zones habitées ou au bas de versants rocheux. Généralement, ces cuvettes reçoivent chaque année du fumier bien décomposé et des compléments minéraux favorisant la production de fruits et de feuilles fourragères.

Les mares

Cette technique traditionnelle de stockage de l'eau de ruissellement (fig. 2) repose comme pour le zaï sur le captage du ruissellement sur les glacis (DUGUÉ, 1986 ; ROOSE, 1994). Les mares (boulis en mooré) sont creusées dans le glacis à la limite du parcours (glacis gravillonnaire) et du bloc de champs (glacis sablo-limoneux). Certains paysans mossi ont creusé progressivement des trous d'eau qu'ils agrandissent en bassin/mare de 1 à 2 m de profondeur, et avec la terre extraite, ils ont construit une digue en forme de croissant s'étirant sur 5 à 15 m au travers du glacis. Dès les premières pluies, le ruissellement provenant des parcours sur les sommets des collines accumule plusieurs dizaines de mètres cubes d'eau pour alimenter le bétail (qui perdra moins de poids en fin de saison sèche à se déplacer jusqu'au point d'eau dans les bas-fonds ou vers les retenues collinaires). Ces



a : structure de capture et redistribution du ruissellement sur un versant cultivé : Gourga, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRDIÉ. Roose

b : fosse à compost irriguée par le ruissellement du champ : Boukere, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRDIÉ. Roose

boulis peuvent aussi irriguer un petit jardin à la raie ou au zaï qui, bien fumé, pourra produire deux cultures, du maïs précoce et des pastèques tardives. Cet aménagement améliore surtout la sécurité alimentaire au moment de la soudure. Il exige beaucoup de travail, mais peut s'exécuter progressivement grâce à l'entraide entre voisins. Des améliorations des boulis traditionnels sont envisageables soit pour réduire le temps de travail, soit pour augmenter le volume d'eau stocké. On peut réduire le travail de creusage en plaçant le boulis en tête de ravine, là où



a : « Bouli », mare creusée manuellement pour capter le ruissellement issu des collines, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

b : jardin irrigué en aval d'un bouli : Sabouna, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

se rassemble beaucoup de ruissellement avant que les transports solides soient trop importants. Cette option permet du même coup de stabiliser la ravine en réduisant ses débits de pointe (ROOSE, 1994). Pour éviter que l'érosion comble cette mare, il faut aménager le glacis pour retenir les sédiments sans trop réduire le volume ruisselé (cordons de pierres). Une autre solution consiste à récupérer les sédiments frais dès que les eaux baissent, pour en mouler des briques de terre crue qui sècheront au soleil. Pour éviter les maladies contagieuses du bétail, il ne faut pas permettre aux animaux de pénétrer dans la mare et y déposer leurs déjections : il faut aménager en aval un abreuvoir et un filtre (fût de 200 litres rempli de lits alternés de sable et de charbon de bois). Pour accroître le volume d'eau stockée au cours d'une année, il convient à la fois d'augmenter la capacité du bassin (recours à un engin de travaux publics ou simplement un tracteur avec une sous-soleuse subventionnée par un projet) et son étanchéité. Le ministère de l'Agriculture du Burkina Faso a lancé en 2012 un programme de construction de bassins pour l'irrigation de complément du maïs de saison des pluies.

Les limites de ces techniques

Aucune de ces techniques n'apporte de solution miracle aux problèmes posés par la sécheresse, par les carences en nutriments et par les disettes/famines dans la zone soudano-sahélienne, mais leur association permet d'améliorer considérablement la situation des populations.

Du point de vue hydrique

Les micro-barrages perméables (cordons, haies, bandes enherbées, etc.) améliorent localement l'infiltration, mais surtout réduisent la vitesse du ruissellement et sa charge solide, donc l'érosion. Par contre, les cuvettes captent une bonne partie du ruissellement ($20\,000 \text{ cuvettes/ha} \times 0,4 \times 0,3 \times 0,2 = 480 \text{ m}^3/\text{ha} = 48 \text{ mm}$) qui mouille une tache profonde de 1 mètre, ce qui permet aux cultures semées précocement de résister pendant 3 semaines à une forte ETP. Sur les sols superficiels sur cuirasse, gravillonnaires ou sableux, une partie de cette eau s'infiltre en profondeur et nourrit la nappe : ceci a été observé dans les puits de nombreux villages mossi. En réalité, l'association des deux approches permet de réduire les risques d'inondation lors des plus gros orages. « Mais ni les cordons, ni le zaï ne font pleuvoir ! » conclut un paysan plein de sagesse. Ces techniques atténuent les effets des périodes déficitaires, mais ne résolvent pas tous les problèmes posés par la fréquence des longues périodes sèches. ROOSE *et al.* (1993) ont démontré qu'au-delà de 800 mm de pluie annuelle moyenne, le zaï entraîne une augmentation du drainage et le lessivage des nutriments solubles, en particulier l'azote. En dessous de 300 mm/an, la durée du cycle de croissance des cultures est supérieure

à la durée de la saison des pluies, donc pas de production de graine un an sur 2 ou 3. Il y a quand même une large bande soudano-sahélienne depuis le Sénégal jusqu'en Éthiopie et même à Madagascar où cette technique traditionnelle améliorée pourrait augmenter la production de biomasse.

Du point de vue de la restauration de la productivité des sols

Une fois réduits les déficits hydriques, apparaissent les carences en nutriments et en MO : les rendements en pailles et en grains sont à peine améliorés. Toutes les expérimentations montrent que les apports en fumier, compost (et autre biomasses à faible C/N) sont une priorité pour améliorer la stabilité structurale du sol et la disponibilité en eau et en nutriments des cultures. Par contre, les enfouissements de paille et litière grossière entraînent une « faim d'azote ». Cependant, les modélisations et les expérimentations ont montré qu'à l'échelle d'une exploitation agricole, la biomasse disponible, d'autant plus faible que le climat est aride, ne couvre que 10 à 30 % des besoins en nutriments des surfaces cultivées. Pour valoriser les apports d'eau et de fumier, il faut donc investir raisonnablement dans des compléments minéraux, en particulier N et P. L'azote peut être fourni par des cultures de légumineuses fourragères ou alimentaires, mais l'apport de phosphate de chaux reste incontournable pour optimiser la production (ROOSE, 1994 ; KABORÉ, 1995 ; ZOUGMORE *et al.*, 2004 ; MANDO *et al.*, 1999 ; ZOUGMORE *et al.*, 2008). Là où les cuvettes augmentent la production de 1 à 4 q/ha, le fumier rapporte 6 à 10 q/ha et les compléments minéraux 12 à 16 q/ha, ce qui permet de nourrir 5 à 6 personnes au maximum, mais ne dégage pas de compléments pour nourrir les populations urbanisées, constituer des stocks pour financer les frais de scolarité, de santé, et entretenir des relations sociales. L'amélioration localisée de la disponibilité en eau et nutriments encourage la plantation/régénération d'arbres (par les graines ou les racines) bien choisis pour recycler les nutriments entraînés par les eaux de drainage sous les racines des cultures annuelles (parcs et haies vives) : elle permet le retour à un système agro-sylvo-pastoral plus durable. Sur les sols acides (sableux, ferrugineux tropicaux, ferrallitiques lessivés), la baisse du pH est préoccupante dès lors qu'on dépasse la limite inférieure de $\text{pH} < 4.8$ où l'aluminium échangeable devient toxique et s'oppose à la réalisation d'une production acceptable. Là aussi l'apport de fumier ou, à défaut, de biomasse disponible (branchettes et feuillages arbustifs en paillage, litière, mulch de résidus de culture), de cendres du foyer ou de chaux ou dolomie broyées, peuvent maintenir le pH au-dessus du seuil dangereux. Sur des sols trop riches en calcaire libre où le phosphore et divers oligoéléments risquent de devenir indisponibles pour les cultures, le paillage augmente le lessivage des bases, mais aussi de l'azote du sol.

Du point de vue économique

Le coût des aménagements CES et du zaï est énorme en jours de travail (ROOSE, 1994 ; DE GRAAFF et STROOSNIJDER, 1995 ; BODNAR, 2005). Par exemple pour le zaï, il faut compter 60 jours de rude labeur, rien que pour creuser les cuvettes,

auxquels il faut encore ajouter le temps pour fabriquer et transporter le fumier (3 à 7 t/ha selon les auteurs) et la collecte et le transport des matériaux (pierres, herbes, arbres) et la construction des lignes de défense (400 à 1 000 m/ha en fonction de la pente). L'installation de cordons de pierres ou de bandes enherbées ne s'est pas avérée rentable, bien qu'elle assure une légère augmentation de production de sorgho (SERPANTIÉ et LAMACHÈRE, 1989). Par contre, les bénéfices furent substantiels sur les parcelles de Saria (Burkina Faso) lorsqu'on a ajouté du compost, de l'azote et des phosphates de chaux aux champs aménagés avec des cordons de pierres ou des bandes enherbées (ZOUGMORE *et al.*, 2008). La mécanisation des travaux et la location de charrettes peuvent réduire de moitié les temps de travaux (ROOSE *et al.*, 1993 ; BARRO *et al.*, 2005). Leur diffusion rapide exige une formation, des démonstrations effectuées chez les paysans avec l'aide des ONG ou des services de diffusion et temporairement, des visites ou échanges avec des paysans « innovateurs », des encouragements économiques (location de camions, vente de charrettes, nourriture, pépinières et petit outillage) selon la motivation et la pauvreté des candidats (ROCHETTE, 1989 ; CRITCHLEY *et al.*, 1992).

Du point de vue de la biodiversité

La capture des graines diverses qui circulent dans ces paysages avec le vent et le ruissellement en amont des lignes de défense ou dans les cuvettes et l'apport en surface de biomasse ou de poudrette créent les circonstances favorables au développement d'une vingtaine d'espèces d'adventices et d'une douzaine d'arbustes, légumineuses ou non (ROOSE *et al.*, 1999). Une gestion intelligente de cette biodiversité permet de restaurer en quelques années de gestion sélective un système agro-sylvo-pastoral pour exploiter au mieux les ressources locales. L'apport de fumier ou de compost permet aussi de réintroduire des activités microbiennes indispensables pour minéraliser la biomasse et restituer des nutriments minéraux assimilables par les cultures. Les litières et MO fermentées amènent aussi le développement des vers de terre et autres « ingénieurs du sol » qui améliorent ce recyclage des nutriments, la stabilité de la structure et autres propriétés physiques du sol (ROOSE, 1976 ; BLANCHART et JOUQUET, 2013, chap. 23).

Conclusions

D'après ROOSE *et al.* (2011), les sols dégradés étant instables à l'eau et pauvres en nutriments et en MO, la restauration de leur productivité passe par la mise en œuvre de techniques complexes comprenant : 1) la capture et la gestion des eaux de ruissellement en fonction de l'aridité du milieu, 2) le travail du sol

localisé et stabilisé par des MO, 3) la revitalisation biologique de l'horizon superficiel (fumier/compost), 4) la nutrition équilibrée des plantes en fonction de leurs besoins, 5) la correction de l'acidité du sol (pH entre 5 et 7) : apport de MO et phosphate, 6) le choix de cultures associées à des légumineuses et à des arbres non envahissants.

Ces six règles permettent de restaurer rapidement et durablement une production végétale supérieure à celle des terres environnantes fraîchement défrichées. Mais cela a un coût : beaucoup de travail, l'association de l'élevage et des arbres pour augmenter la production de biomasse du terroir (donc des coûts supplémentaires en travail pour la plantation et le gardiennage permanent du bétail), l'amélioration de la production de fumier, l'investissement raisonné dans des compléments minéraux, en particulier des phosphates de chaux (ROOSE *et al.*, 2011).

La fumure organique associée à des compléments minéraux donne les meilleures productions en fonction des pluies disponibles : elles sont souvent plus rentables que les aménagements de CES, mais ceux-ci sont indispensables pour garder au champ l'eau, les sols et la fumure investie.

L'amélioration de ces techniques traditionnelles passe par l'augmentation de la production de biomasse et de fumier, la couverture du sol, l'association réelle entre les cultures, les légumineuses, l'élevage et les arbres, l'utilisation raisonnée de compléments minéraux et l'amélioration des techniques culturales (semis en ligne et sarclage mécanisé) et le développement de production fourragère.

Les principales difficultés rencontrées concernent la gestion des déplacements des troupeaux des parcours à l'abreuvoir ou au parc de nuit, la régénération des parcours et le respect des plantations d'arbres, la faiblesse des moyens matériels et financiers des exploitations, le respect des zones mises en défens et l'entretien des aménagements physiques et biologiques. L'aménagement du terroir par quartiers (versants exploités par quelques dizaines de paysans) permet d'optimiser les aménagements réalisés sur les segments fonctionnels du paysage : sommets secs, versants à fort ruissellement, excès d'eau dans les vallons et les bas-fonds. Aux techniques encore perfectibles, il faut aussi adjoindre des innovations organisationnelles et politiques d'appuis aux paysans pour qu'ils puissent les mettre en œuvre à grande échelle.

Bibliographie

BARRO A., ZOUGMORE R., TAONDA S., 2005 – Mécanisation de la technique du zaï en zone semi-aride. *Cahiers Agricultures*, 14 : 549-559.

BILLAZ R., 2012 – « La lutte contre les aléas climatiques au Burkina Faso : acquis et défis de l'agroécologie dans la Région Nord ». In Dia A.,

Duponnois R. (éd.) : *La grande muraille verte : capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*, Marseille, IRD Éditions : 265-317.

BODNAR F., 2005 – *Monitoring for impact. Evaluating 20 years of SWC in southern Mali*. Doct. Thesis, Wageningen Univ., 219 p.

- BOLI Z., ROOSE É., 1998** – Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. *Advances in Geocology*, Reiskirchen, 31 : 395-401.
- BOUZOU-MOUSSA I., DAN LAMSO N., 2004** – Le « tassa » : une technique de CES bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glaciés des régions semi-arides (Niger). *Revue de Géographie Alpine*, 92 : 61-70.
- CRITCHLEY W., REIJ C., TURNER S., 1992** – *Soil & water conservation in sub Saharan Africa. Towards sustainable production by the rural poor*. Amsterdam, Free University, Ifad/CDCS, 110 p.
- DESBOS R., MOUNKAILA A., AKOTÉY A., DJIBO H., DERIAZ D., MONIMART M., 1989** – « Demi-lunes, barrages seuils, agroforesterie à Ourihamiza, Tahoua, Niger ». In Rochette R. (éd.) : *Le Sahel en lutte contre la désertification*, GTZ et Cills éditeurs : 33-52.
- DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 2008** – « Influence of no-tillage on soil conservation, carbon sequestration and yield of intensive rotation maize-cotton: research on sandy Alfisols of Cameroon & Mali ». In Goddard T., Zoebish M., Gan Y., Ellis W., Watson A., Sombatpanit S. (eds) : *No-till farming systems*, Waswac, special Publ N° 3 : 383-392.
- DIATTA M., FAYE E., GROUZIS M., PEREZ P., 2012** – « Rôle des haies vives antiérosives sur la gestion de l'eau, du sol et des rendements des cultures du Centre-Sud arachidier du Sénégal ». In Roose É., De Noni G., Duchaufour H. (éd.) : *LAE et restauration de la productivité des sols et la protection contre les pluies cycloniques*, CDROM édité par IRD Montpellier et AUF Paris, 14 p.
- DROUX D., 2008** – *Réhabilitation des sols dégradés des zones sèches sahéliennes avec la technique du zaï. État des connaissances, perception et pratiques paysannes dans le nord du Burkina Faso*. Mémoire master II, univ. Paris XII, 63 p.
- DUCHAUFOUR H., GUIZOL P., BIZIMANA M., PELTIER R., POUILLLOUX C., 1996** – Avantages et inconvénients de la haie mixte *Calliandra-Setaria* comme dispositif CES en milieu rural burundais. *Bull. Réseau Érosion Orstom*, 16 : 16 p.
- DUGUÉ P., 1986** – *L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village. Perspective de développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche*. Montpellier, Cirad/DSA, coll. Systèmes Agraires, 6, et Cahier Recherche Développement, 14 : 59-67.
- DUGUÉ P., ROOSE É., RODRIGUEZ L., 1993** – L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la productivité agricole au Yatenga (Burkina Faso). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 385-402.
- DUGUÉ P., RODRIGUEZ L., OUOBA B., SAWADOGO I., 1994** – *Techniques d'amélioration de la production agricole en zone soudano-sahélienne : manuel à l'usage des techniciens du développement rural, élaboré au Yatenga, Burkina Faso*. Montpellier, Cirad-SAR, 209 p.
- FATONDI D., MARTIUS C., ZOUGMORE R., VLEK P., BIELDERS C., KOALA S., 2009** – Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zaï technique in the Sahel. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 85 : 225-239.
- GRAAFF J. DE, STROOSNIDER L., 1995** – Évaluation économique des mesures de CES au Sahel. *Bull. Réseau Érosion*, 15 : 254-265.
- HIEN F. G., 1995** – *La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel. Une étude de l'effet des mesures de CES au Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Agric. Univ., The Netherlands, 223 p.
- HIEN E., KABORÉ W., MASSE D., DUGUÉ P., 2012** – « Apports organiques et pratiques de conservation de l'eau comme clés de la restauration de la productivité des sols dégradés dans la zone semi-aride du Burkina Faso ». In Roose É., Duchaufour H., De Noni G. (éd.) : *Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*, CDrom, Marseille, IRD Éditions, 420 p.
- HUDSON N., 1991** – Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin*, 64, 65 p.
- KABORÉ V., 1995** – *Amélioration de la production végétale des sols dégradés (zipellés) du Burkina Faso par la technique du zaï*. Thèse doct., Epfel n° 1302, Lausanne Suisse, 201 p.
- KABORÉ W., 2005** – *Pratiques d'utilisation de la fumure organique dans les systèmes de culture et viabilité de l'agrosystème : cas du zaï au Burkina Faso*. Thèse de Master Science, Cnearc, Montpellier, 96 p.
- KABORÉ R., 2009** – *Dispositifs locaux de régulation, conflits fonciers et logiques d'acteurs dans le cadre d'un projet d'aménagement et de gestion des*

ressources (centre-nord du Burkina Faso). Institut de hautes études internationales et du développement, 332 p.

KÖNIG D., 2015 – « Effets de l'agroforesterie, la fertilisation et les haies vives sur les risques d'érosion et de ruissellement et sur la productivité d'un sol acide (ultisol) du Rwanda ». In Roose É. (éd.) : *La restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Marseille, IRD Éditions.

LAHMAR R., YACOUBA H., 2012 – « Zaï et potentiel de l'association cultures annuelles-arbustes natifs ». In Dia A., Duponnois R. (éd.) : *La grande muraille verte*, Marseille, IRD Éditions, 493 p. : 203-223.

LAL R., 2008 – Soils and sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 28 : 57-64.

LAMACHÈRE J. M., SERPANTIÉ G., 1990 – « Valorisation agricole des eaux de ruissellement et LAE sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne (Bidi, Burkina Faso) ». In « Utilisation rationnelle de l'eau de petits BV en zones arides », Journées scientifiques Aupelf, Ouagadougou, BKF.

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

MANDO A., BRUSSAARD L., STROOSNIJDER L., 1999 – Termite and mulch-mediated rehabilitation on crusted soil in West Africa. *Restoration Ecology*, 7 (1) : 33-41.

MARCHALL J. Y., 1986 – Vingt ans de LAE au Burkina Faso. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 173-180.

MAZZUCATO V., NIEMEIJER D., 2000 – *Rethinking SWC in a changing society: a case study in Eastern Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Agric. Univ., 380 p.

NDAYIZIGIYE F., 2015 – « Haies vives de légumineuses arbustives et fumures pour la restauration de la productivité des sols acides au Rwanda ». In Roose É. (éd.) : « *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Marseille, IRD Éditions.

PIERI C., 1989 – *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherches et de développement au sud du Sahara*. Cirad Montpellier et Min. Coop. et Dév., 444 p.

PRESSOIR G., 2012 – « Potentiel du *Jatropha gurka* pour le développement économique, le reboisement et l'aménagement de bassins versants en Haïti ». In Roose É., De Noni G., Duchaufour H. (éd.) : *Lutte antiérosive et restauration de la productivité des sols et la protection contre les pluies cycloniques*, CDRom édité par IRD Montpellier et AUF Paris, 434 p.

REIJ C., 2005 – « Investing in Africa's drylands: impact on agriculture, environment and poverty reduction ». In Ruben R., De Steenhuisen B. (eds) : *Rural development in sub-Saharan Africa: policy perspective for sustainable resources management and poverty reduction*, KIT, Bulletin, 370 : 21-30.

ROCHETTE R., 1989 – *Le Sahel en lutte contre la désertification : leçons d'expériences*. Ouvrage collectif GTZ, Cills, 592 p.

ROOSE É., BERTRAND R., 1971 – Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion en Afrique de l'Ouest. *L'agronomie Tropicale*, 26 (11) : 1270-1283.

ROOSE É., 1976 – *Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical*. Abidjan, Rapport Orstom, 56 p.

ROOSE É., 1992 – « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols ». In Le Floch E., Grouzis M., Cornet A., Bille J. C. (éd.) : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.

ROOSE É., 1993 – Innovations dans la conservation et la restauration des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 147-155.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES). *Bull. FAO des sols*, 70, 420 p.

ROOSE É., BERTRAND R., 1971 – Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion en Afrique de l'Ouest. *L'agronomie Tropicale*, 26 (11) : 1270-1283.

ROOSE É., KABORÉ V., GUÉNAT C. L., 1993 – Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 159-173.

ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1996 – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.

- ROOSE É., KABORÉ V., GUÉNAT C., 1999** – Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13 : 343-355.
- ROOSE É., BARTHÈS B., 2006** – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamic*, Advances in soil Science, CRC, Boca Raton, FL USA : 55-72.
- ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2010** – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Montpellier, IRD Éditions, 343 p.
- ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011** – Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (3) : 1-12.
- SAWADOGO H., ZOMBRE P., BOCK L., LACROIX D., 2008** – Évolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir des photos aériennes. *Revue Télédétection*, 8 (1) : 59-73.
- SERPANTIÉ G., LAMACHÈRE J. M., 1989** – *Aménagement des pentes cultivées soudano-sahéliennes grâce à des réseaux de micro-barrages isohypses filtrants*. Isco 6, Addis Abeba, Éthiopie, 10 p.
- SOMÉ D., ZOMBRÉ P., ZOMBRÉ G., MAXAULEY H., 2004** – Impact de la technique du zaï sur la production de niébé et sur l'évolution des caractéristiques chimiques des sols dégradés (*zipellés*) du Burkina Faso. *Sécheresse*, 15 (3) : 8 p.
- SPAAN P., 2003** – *Consuming the savings: water conservation in a vegetation barrier system at the Central Plateau in Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Univ., 207 p.
- STROOSNIJDER L., 1998** – Quantification of nutrient erosion. *Geokodynamik*, 18 : 215-229.
- STROOSNIJDER L., HOOGMOED B., 1984** – Crust formation on sandy soils in the Sahel. II. Tillage and its effect on the water balance. *Soil & Tillage Research*, 4 : 321-337.
- TEMESGEN B., STERK G., TEMESGEN M., ABDULKADIR A., STROOSNIJDER L., 2012** – Rainwater harvesting & management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa: a review. *Physics & Chemistry of the earth*, 48 : 139-151.
- WEZEL A., BÖCKER R., 1999** – Mulching with branches of an indigenous shrub (*Guiera senegalensis*) and yield of millet in semi-arid Niger. *Soil Till. Res.*, 50 : 341-344.
- WRIGTH P., 1982** – *La gestion des eaux de ruissellement*. Oxfam-ORD Yatenga (BKF), projet agroforestier, Ouagadougou, 25 p.
- ZOUGMORE R., ZIDA Z., KAMBOU N., 2003** – Role of nutrient amendments in the success of half-moon SWC practice in semi-arid Burkina Faso. *Soil Till. Res.*, 71 : 143-149.
- ZOUGMORE R., OUATTARA K., MANDO A., OUATTARA B., 2004** – Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse*, 15 (1) : 41-48.
- ZOUGMORE R., MANDO O., STROOSNIJDER L., OUEDRAOGO E., 2008** – « Rentabilité économique de la combinaison des mesures de CES avec la gestion des nutriments en zone semi-aride du Burkina Faso ». In Roose É., Albergel J., De Noni G., Laouina A., Sabir M. (éd.) : *Efficacité de la GCES en zones semi-arides*, Éditions AUF-EAC, IRD, 425 p. : 126-134.
- ZOUGMORE R., MANDO A., STROOSNIJDER L., 2009** – Soil nutrient and sediment loss as affected by erosion barriers and nutrient source in semi-arid Burkina Faso. *Arid Land Research and Management*, 23 : 85-101.

Habilitation agricole de tufs volcaniques indurés au Mexique

Le cas des *tepetates* de l'altiplano central

Christian PRAT
 Jorge D. ETCHEVERS
 Aurelio BÁEZ
 Juan F. Gallardo
 Juliana PADILLA

Problématique

L'axe transvolcanique mexicain qui traverse d'est en ouest le centre du pays, est constitué de chaînes de volcans encadrant des vallées. Les sols y sont donc d'origine volcanique. Le climat tempéré sub-humide à humide (600 à 1 100 mm an⁻¹) présente une saison sèche marquée d'octobre à mai. Au niveau des piedmonts, les sols possèdent un ou plusieurs horizons indurés plus ou moins proches de la surface. Ces matériaux indurés sont appelés localement *tepetates*, qui est un terme nahuatl qui signifie « lit de pierres » (SIMÉON, 1887). Ils ont des propriétés de fragipan (dur à l'état sec, friable à l'état humide), et sont classés comme des Regosols (Eutric Regosols, FAO ; Lithic Ustorthents, USDA). L'origine de ces matériaux est liée au volcanisme éruptif de type phréatomagmatique qui se traduit par l'émission de coulées de boue (*lahar*, *surge*) capables de recouvrir des surfaces de plusieurs dizaines, voire même de milliers de kilomètres carrés (CAS et WRIGHT, 1988). Ces dépôts peuvent être ou non remaniés, puis recouverts de cendres éoliennes qui à la longue, vont former un

sol très fertile contrairement aux coulées qui elles, vont se consolider et s'indurer. Ces processus éruptifs peuvent se répéter en l'espace de quelques heures, de mois, d'années ou de milliers d'années. Le résultat est une succession de dépôts de tufs indurés et de cendres non consolidées, plus ou moins altérées, formant parfois un paléosol. Dans le cas de la Sierra Nevada située entre Mexico et Puebla, WERNER *et al.* (1978) ont pu établir que la dizaine de séries décrites datent de - 40 000 ans pour la plus ancienne à - 10 000 ans pour la plus récente.

L'étude approfondie de l'origine et de la nature de l'induration de ces tufs montre qu'elle est due principalement à des processus géologiques auxquels peuvent se rajouter parfois des dynamiques pédologiques (HIDALGO *et al.*, 1992 ; ETCHEVERS *et al.*, 2004 ; SEDOV *et al.*, 2003). Ainsi, la présence de carbonates de certains niveaux est attribuée à un climat plus chaud et humide il y a 8 000 à 10 000 ans, qui a permis leur dissolution, transport et recristallisation (QUANTIN, 1992). Il reste que l'induration n'ayant pas de causes actuelles, il n'y a donc pas de risque qu'elle réapparaisse après le défonçage de ces horizons.

Sous l'effet des pluies et de la mauvaise gestion des terres par l'homme, les sols couvrant les *tepetates* peuvent être érodés et même disparaître au point de laisser affleurer ces matériaux indurés. Les surfaces concernées sont considérables, puisqu'elles couvriraient au moins 30 700 km² au Mexique (ZEBROWSKI, 1992). Pour certains États comme celui de Tlaxcala (WERNER *et al.*, 1988), c'est même près de la moitié de leur superficie qui est érodée ! Or ces horizons indurés, de par leur genèse, sont pratiquement stériles tant sur le plan physique que chimique et biologique (ETCHEVERS *et al.*, 1998). De plus, leur compacité bloque la circulation des gaz et de l'eau. Il est donc impossible de les cultiver en l'état. Les conséquences socio-économiques sont d'autant plus importantes que ces affleurements sont localisés sur les piedmonts des reliefs (SERVENAY et PRAT, 2003) qui correspondent aux zones cultivées par les petits paysans plus ou moins marginalisés (PRAT *et al.*, 1997 ; ZAPATA MARTELO *et al.*, 2006). D'autre part, les secteurs situés en aval de ces terrains quasi imperméables souffrent d'inondations récurrentes lors d'événements pluvieux importants (BOUVIER et ROSSEL, 1995).

Au delà d'un usage dans la construction sous forme de blocs, les *tepetates* ont d'abord et avant tout, fait l'objet d'aménagement en vue de leur donner un usage agricole et ce, dès l'époque précolombienne, preuve que la mauvaise gestion des sols n'est pas une affaire récente (WERNER *et al.*, 1988 ; NAVARRO et PRAT, 1996) ! Pour créer un sol nouveau à partir de ces matériaux durs, il faut d'abord rompre les blocs. Dans les premiers temps, cela fut fait à la main à l'aide de pics, puis à partir des années 1960, avec des tracteurs puis des bulldozers. Le travail de défonçage devint alors plus rapide, plus profond, mais aussi bien plus érosif qu'autrefois quand le travail est fait sans précaution. Après une courte période d'assouplissement, les programmes de mise en culture des *tepetates*, cofinancés par les gouvernements locaux, ont repris à partir des années 2010. Ils s'appuient sur les résultats de recherches menées au cours de ces trente dernières années, notamment celles réalisées dans le cadre de coopérations

européo-mexicaines (Étude des sols volcaniques indurés de Mexico et de Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole, 1988-1992. Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine, 1992-1996. Revolso-Alternative agriculture for a sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in Mexico and Chile, 2001-2006). Ces travaux, au-delà de la compréhension des origines et caractéristiques des *tepetates*, ont permis de définir les conditions nécessaires à la conversion de ces matériaux indurés stériles en sols fertiles et productifs dans le cadre d'une approche durable, compatible avec les intérêts et les capacités techniques et économiques des petits paysans concernés tant au Mexique que dans d'autres pays latino-américains (PRAT *et al.*, 2012).

Les tepetates, des matériaux inertes, compacts et stériles

Les *tepetates*, de par leur origine phréato-magmatique et leur mode de dépôt, présentent des propriétés bio-physico-chimiques ayant de nombreux traits communs, même si on peut noter une certaine variabilité pour chacune d'entre elles. Il n'y a donc pas un *tepetate*, mais des *tepetates*, chacun ayant des caractéristiques propres sur un fond commun. La première caractéristique commune est naturellement la compacité et la dureté qui peuvent être extrêmement élevées dans le cas de *tepetates* carbonatés (tabl. 1). La force de pénétration en sec est de l'ordre de 20 kg.cm⁻². La porosité est faible, et ce d'autant plus, qu'elle est constituée principalement de bulles occluses (HIDALGO *et al.*, 1992) et que la macroporosité est inférieure à 5 %. Il n'est donc pas surprenant que la conductivité hydraulique ne dépasse pas quelques millimètres par heure (PRAT *et al.*, 2003). Cette compacité constitue donc la principale limitation physique. Le premier enjeu de la mise en culture des *tepetates* est donc la création d'une porosité qui fait défaut au matériau initial afin de permettre à l'eau, aux gaz et aux racines de circuler facilement et de permettre les interactions et les échanges indispensables à la vie d'un sol.

Tableau 1
Valeurs minima, moyennes et maxima des caractéristiques physiques des tepetates.

	Argile	Limon	Sable	Densité réelle	Densité apparente	Porosité totale
	%	%	%			%
Valeurs min.	25,1	12,8	21,7	2,3	1,2	32
Valeurs moy.	35,6	21,2	43,2	2,4	1,5	50
Valeurs max.	42,0	41,8	60,4	3,0	1,6	64

Source : PENÄ et ZEBROWSKI, 1992.

En ce qui concerne les propriétés liées à la fertilité minérale et organique (tabl. 2), on observe un pH eau alcalin, une teneur en C, N et P pratiquement nulle, mais une forte CEC liée à la présence d'argile de type 2:1 et un pourcentage de saturation en bases élevé. La fertilité des *tepetates* est donc extrêmement limitée (ETCHEVERS *et al.*, 1998). C'est le deuxième enjeu de la conversion de ces matériaux en sol.

Tableau 2
Caractéristiques physico-chimiques des tepetates.

	pH	pH	C	N	P	CEC	Bases échangeables				S/T	FeO ₂
	eau	KCl		total	assim.		Ca	Mg	Na	K		libre
			%	%	Ppm	-----	mg/100 gr de sol ----				%	%
Tepetates	7,3-8,0	6,3-7,0	0,08-0,15	0,01-0,02	3≤	17-25	6,7-15	4,5-7	0,4-1	0,6-2	58-80	1
Tepetates carbonatés	8,9	7,4	0,36	0,07	3≤	41	45,3	11,9	3,9	3,4	100	3

Sources : PENÄ et ZEBROWSKI, 1992 ; ETCHEVERS *et al.*, 1992a.

Enfin, la vie dans les *tepetates* est également très pauvre, tant en nombre d'espèces qu'en population. FERRERA-CERRATO (1992) a ainsi dénombré $2,2 \times 10^4$ de bactéries, $1,2 \times 10^4$ d'actinomycètes et $0,7 \times 10^2$ de champignons par centimètre cube de sol. C'est le troisième enjeu de la récupération des *tepetates* : permettre le développement de micro-organismes, aussi diversifiés que nombreux.

Le défonçage mécanique des tepetates

Le défonçage mécanique se fait avec un bulldozer, type D6 ou D7 de Caterpillar, équipé de 3 dents espacées de 50 cm. Le plus efficace est d'effectuer un passage croisé à une profondeur effective de 30-40 cm. Il faut compter 1 à 2 jours de travail par hectare. Dans la mesure où il s'agit de terrains localisés sur des piedmonts, il est indispensable d'effectuer également des travaux de terrassements (terrasse, talus, évacuation des eaux, contrôle des chemins d'accès) visant à réduire l'érosion hydrique et à faciliter le travail du paysan. Afin de stabiliser les bords, il faut planter des espèces pérennes, telles que figuiers de barbarie, agaves, arbres fruitiers. De plus, ces plantes fourniront des produits commercialisables au bout de quelques années.

Après le passage du bulldozer qui globalement crée des blocs de plusieurs dizaines de centimètres cubes, il faut ensuite faire un passage croisé de disques avec un tracteur afin de réduire cette taille d'un facteur 10 à 100. Il est à noter que paradoxalement, un défonçage plus profond permettant de créer une réserve hydrique plus élevée entraîne des surcoûts et un trop grand émiettement des fragments à cause des plus nombreux passages du bulldozer.



*a : tepetate, matériaux volcaniques indurés décapés par l'érosion.
b : défonçage au bulldozer D6, puis affinage au tracteur de l'horizon induré.
c : champ réhabilité et aplani un mois après le semis d'orge
et de vesce, San Miguel, Tlaxpan, Mexique.*

© IRD/Ch. Prat

Il en va de même, en cas de trop nombreux passages de disques, ou bien de passage à une vitesse trop élevée afin de ne pas transformer les blocs en particules de la taille de limons (tabl. 3). Or cette granulométrie, sous l'effet des premières pluies, favorise la formation d'une croûte de battance de plusieurs centimètres d'épaisseur, rendant la surface du sol imperméable. L'eau ne pouvant plus pénétrer le sol génère une érosion en nappe très importante et réduit d'autant l'infiltration et donc la recharge de la nouvelle réserve hydrique (LAUFFER *et al.*, 1997 ; QUANTIN *et al.*, 1998) avec pour conséquence, la baisse de rendement de la culture installée (PRAT *et al.*, 1997).

Tableau 3
Granulométrie du tepetate en fonction de son mode de préparation initiale et après trois ans de mise en culture.

	Argile 2 µm	Limon 2-50 µm	Sable fin 50-200 µm	Sable grossier 200-2 000 µm
	----- /g/100g -----			
Référence	24	37	21	15
Travail profond (50 cm)	26	43	18	11
Passage trop rapide de disque	30	36	19	12
Apport de fumier (50 t/ha) et travail à 40 cm de profondeur	25	33	17	22

Le respect des recommandations énoncées conduit à un accroissement de la porosité des *tepetates*, ce qui augmente la capacité de captation de l'eau de 5 à 6 fois par rapport à celle de *tepetates* à l'état naturel. Le ruissellement diminuant d'autant, les pertes de sols liées à l'érosion en nappe, ainsi que les risques d'inondation en aval sont alors fortement réduits (tabl. 4)(PRAT *et al.*, 2003).

Tableau 4
Caractéristiques physiques d'un tepetate avant et après défonçage,
San Miguel Tlaixpan, Edomex.

Caractéristiques physico-hydriques	Avant défonçage	Après défonçage
Dureté	Friable humide Dur en sec	Meuble
Densité apparente	1,45	1,10
Porosité totale	≤ 45 %	55 %
Point de flétrissement permanent	22 %	19 %
Capacité au champ	32 %	32 %
Saturation	41 %	48 %
Vitesse infiltration (double anneau)	3 mm/h	15-20 mm/h

Source : PRAT *et al.*, 2003.

La gestion de la matière organique des tepetates, ou, comment passer d'un substrat minéral fragmenté à un sol grumeleux

Le travail mécanique des *tepetates* permet de passer de blocs à des fragments aux bords anguleux plus petits. Toutefois, il ne s'agit pas encore d'agrégats. Or ce sont les agrégats, association de fragments minéraux et de matières organiques, qui constituent une des bases de la fertilité des sols.

BÁEZ *et al.* (2007a) ont sélectionné une centaine de parcelles de *tepetates* cultivées en fonction de leur date de mise en culture (0 à 100 ans) et des pratiques culturales. Une séparation visuelle entre agrégats et fragments a été faite sur des échantillons prélevés entre 0-20 cm de profondeur. Un tamisage a permis de sélectionner 5 classes granulométriques (50,3-22,2/22,1-11,3/11,2-6,30/6,29-4,25/4,24-3,36 mm) sur lesquelles a été mesuré le C organique. Il ressort que le pourcentage d'agrégats augmente d'une part, avec le temps de mise en culture des *tepetates* (fig. 1) et d'autre part, avec le type de pratique culturale qui incorpore le plus de matières organiques (fig. 2).

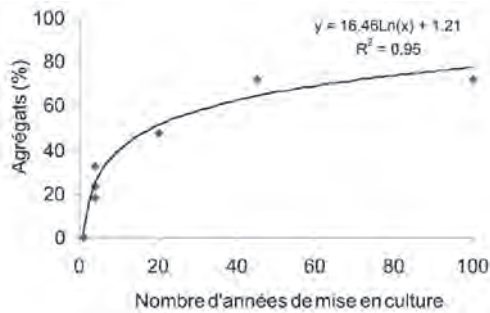


Figure 1

Relation entre formation d'agrégats et temps de mise en culture de tepetates.

Source : BÁEZ *et al.*, 2007a.

Que ce soit en plantations expérimentales d'arbres fruitiers, de cultures fourragères (VELÁZQUEZ *et al.*, 2001) ou vivrières de plein champ (BÁEZ *et al.*, 2002, COVALEDA *et al.*, 2011), l'accumulation de C dans un *tepetate* récemment cultivé est immédiate et n'atteint une limite qu'au bout d'une vingtaine d'années. La quantité de carbone organique stocké dans les 20 premiers centimètres du sol peut atteindre des valeurs considérables en 3 à 5 ans, puisque BÁEZ *et al.* (2002) a mesuré 90 Mg.ha⁻¹ de C. Sachant que l'on part pratiquement d'une teneur en C proche de 0, on voit l'intérêt de la mise en culture des *tepetates* dans le cadre du réchauffement climatique et de la séquestration du carbone.

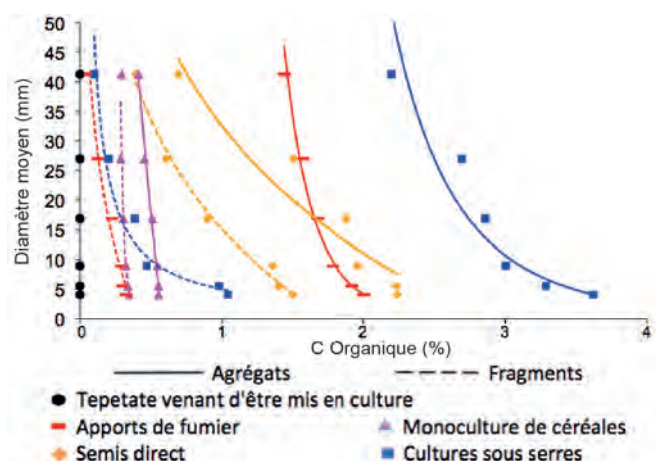


Figure 2

Teneur en C organique de fragments et agrégats de tepetates cultivés de 3 à 5 ans selon différents traitements agronomiques.

Source : BÂEZ et al., 2007a.

La gestion de la fertilité des tepetates, ou, comment passer d'un substrat minéral stérile à un sol fertile chimiquement

Comme il vient d'être précédemment mentionné, les *tepetates* sont pratiquement dépourvus en matières organiques, mais aussi en azote (N), ce qui est normal puisqu'il s'agit de matériaux géologiques, compacts et abiotiques, et non de sol. Il n'y a donc pas d'autres alternatives que d'effectuer des apports sous forme d'engrais minéraux dans un premier temps au moins. Même dans le cas d'apport massif de fumier et de compost, la minéralisation d'engrais organiques prenant du temps et leurs teneurs en éléments fertilisants étant faibles, il est indispensable, tout du moins les premières années de mise en culture, d'ajouter un apport minéral complémentaire au début du cycle agricole afin d'aider le démarrage des cultures (BÂEZ *et al.*, 2007b). Il faut noter que les apports de résidus de culture restent insuffisants, au moins en ce qui concerne N, pour couvrir les besoins des cultures suivantes. Ainsi, les résidus de culture de maïs issus de différents mode de pratiques agronomiques en milieu non irrigué génèrent entre 8 et 27 kg/ha N, alors que les besoins de cette même culture selon ces mêmes pratiques varient entre 33 et 84 kg/ha (PÉREZ-OLVERA *et al.*, 2000).

Les doses optimales (40 t.MS/ha/an) de fumier pour améliorer la structure du sol (*via* formation d'agrégats) et la fertilité (*via* N) sont incompatibles avec la réalité pratique, technique et économique des petits paysans mexicains. Il est

donc plus réaliste de viser des apports réduits (12 t.MS.ha/an) de fumier/compost mis aux pieds des plantes associés à des engrais verts (*Medicago polymorpha*, *Vesce...*) et aux résidus de cultures, afin d'en enfouir la plus grande quantité possible. L'augmentation des teneurs en C dans les sols est immédiate et atteint en quelques années des valeurs significatives si ces recommandations sont suivies (NAVARRO, 1998 ; BÁEZ *et al.*, 2002 ; COVALEDA *et al.*, 2009).

Les teneurs en phosphore total (130 mg P.kg⁻¹) des *tepetates* non cultivés sont très largement inférieures à celles que l'on trouve normalement dans les sols cultivés (450 à 1 100 mg P.kg⁻¹ selon HAVLIN *et al.*, 2004). Quant au P organique et assimilable, ils sont présents à l'état de traces (ETCHEVERS *et al.*, 1992b ; COVALEDA *et al.*, 2009). Ces très faibles teneurs s'expliquent par le nombre réduit de minéraux contenant des phosphates dans les *tepetates*. Une gestion des apports et des pratiques culturales adéquates permettent d'obtenir une évolution rapide des teneurs en phosphore du nouveau sol créé. Ainsi, l'application de fertilisants minéraux phosphatés (superphosphate triple, 100 unités. ha⁻¹, 3 applications sous forme de granulés) a un effet positif immédiat sur le P assimilable. L'apport de résidus organiques (culture, fumier) améliore la disponibilité de cet élément sous sa forme assimilable (ÁLVAREZ *et al.*, 2000 ; BÁEZ *et al.*, 2002). En l'espace de 20 ans, on observe ainsi une progression linéaire de la teneur en P assimilable où, en valeurs moyennes, on passe de pratiquement 0 à 4,5 mg P.kg⁻¹. D'autre part, les *tepetates* présentent une capacité à adsorber rapidement le P appliqué. Ainsi en 24 heures, il peut en fixer 60 % dans le cas des *tepetates* non cultivés, et 56 % dans le cas de *tepetates* cultivés depuis 5 ans. Ces taux indiquent aussi qu'une partie importante du P n'est pas immédiatement utilisé par les plantes l'année de l'application de ces apports, mais qu'il reste toutefois sous une forme disponible pour être utilisé par les cultures l'année suivante. En conséquence, afin de remédier à ce déficit nutritif, il est recommandé de réaliser des applications annuelles de phosphates comprises entre 40 et 80 kg.P.ha⁻¹ en fonction de l'âge de mise en culture des *tepetates* concernés, des pratiques agronomiques menées et de la culture prévue (ETCHEVERS *et al.*, 1992b).

Contrairement au P et à N, les *tepetates* sont bien pourvus en potassium (K) (tabl. 2). En effet, ce K est principalement issu de la dégradation de minéraux potassiques qui le composent (HIDALGO *et al.*, 1992). La capacité tampon mesurée par ETCHEVERS *et al.* (1992a), indique qu'une grande partie du K échangeable peut être extrait et devenir soluble, ce qui explique sa disponibilité et sa teneur. Les concentrations en K soluble dans l'eau dans les *tepetates* travaillés est d'environ 0,35 meq.100 gr⁻¹ de sol, alors que celle des *tepetates* non cultivés depuis plusieurs années est supérieure (0,50 meq.100 gr⁻¹ de sol) à cette valeur. Il en va de même avec les teneurs en K assimilable pour des *tepetates* cultivés depuis 30 ans (0,90 meq.100 gr⁻¹ de sol), par rapport à celle des *tepetates* non cultivés (1,20 à 1,63 meq.100 gr⁻¹ de sol). Ces différences s'expliquent par les faibles, voire même l'absence totale d'apports de fertilisants potassiques par les paysans puisque dans les systèmes traditionnels, les demandes des cultures en K ne dépassent jamais

le K disponible dans les sols (HAVLIN *et al.*, 2004). Toutefois, la baisse de teneur indique qu'il faut compenser les pertes par un faible apport de K (ETCHEVERS *et al.*, 1992b).

ETCHEVERS *et al.* (1998) ont montré que les *tepetates* apportent les autres éléments minéraux dont les plantes ont besoin pour leur développement. COVALEDA *et al.* (2009) ont mesuré sur parcelles récemment défoncées et cultivées, ainsi que sur des parcelles cultivées depuis 20 ans, que les teneurs en Ca^{2+} restaient constantes et que celles en Mg^{2+} et Na^+ échangeables étaient divisées par deux en passant respectivement de 12 à 6 cmol.kg^{-1} et de 1,4 à 0,7 cmol.kg^{-1} . La saturation en bases diminue donc au bout de quelques années, de 100 % à 90 %. Ceci se traduit par une baisse du pH d'une unité : on passe de 7,5 à 6,5 en 20 ans (BAUMANN et WERNER, 1997).

La gestion de la vie dans les *tepetates*, ou, comment passer d'un substrat minéral abiotique à un sol vivant

Contrairement aux *tepetates* à l'état naturel, les sols sont des ensembles vivants. La mise en culture des *tepetates* et le développement de la vie, en particulier micro-biologique, dans ces nouveaux sols, constituent le troisième enjeu.

Les bactéries, actinomycètes et champignons sont présents dans les *tepetates* au niveau des fentes et des quelques racines des rares plantes qui poussent de façon sporadique sur ces matériaux. Leur nombre et variété sont dans ces conditions très limités (tabl. 5). Toutefois, le simple fait de fracturer les *tepetates* fait doubler les populations, et deux mois plus tard, les valeurs initiales sont triplées. C'est toutefois l'apport de matières organiques sous forme de compost qui conduit réellement à l'explosion de ces populations, les amenant à des valeurs proches de celles du sol en place recouvrant le *tepetate* étudié (ÁLVAREZ-SOLÍS *et al.*, 1992).

Tableau 5

Évolution des populations de bactéries, actinomycètes et champignons dans un *tepetate* non cultivé et cultivé selon différents traitements, et d'un sol de référence.

	Bactéries	Actinomycètes	Champignons
Avant défonçage	$2,2 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$0,007 \times 10^4$
Après défonçage	$6,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$	$0,013 \times 10^4$
+ 2 mois + pluies	$9,9 \times 10^4$	$3,5 \times 10^4$	$0,017 \times 10^4$
+ compost	250×10^4	$14,0 \times 10^4$	$0,065 \times 10^4$
Sol référence (Phaeozem)	$4\,600 \times 10^4$	$21,0 \times 10^4$	$0,400 \times 10^4$

Source : ÁLVAREZ-SOLÍS *et al.*, 1992.

L'importance des micro-organismes réside dans leur activité métabolique qui permet de fixer le N et de le minéraliser durant la transformation des matières organiques en humus stable. Dans la mesure où durant les premières années de mise en culture des *tepetates*, la quantité de matières organiques est faible, il existe une compétition entre micro-organismes et cultures pour utiliser le peu de N disponible qui se fait au détriment des plantes (FERRERA-CERRATO *et al.*, 1997). Cette faim de N est également une des raisons qui explique la recommandation d'apporter en début de culture du N minéral afin d'éviter cette compétition. D'autre part, les racines, les exudats (VELÁZQUEZ *et al.*, 2001), et les champignons mycorhiziens produisent notamment de la glomaline (BÁEZ *et al.*, 2010). Or, sur les 90 Mg.ha⁻¹ de C des premiers 20 cm du sol, 13,5 Mg.ha⁻¹, c'est-à-dire 15 % du C, proviennent de la glomaline. De plus, cette glycoprotéine en agissant comme une colle entre les particules augmente considérablement le nombre d'agrégats du sol (BÁEZ *et al.*, 2010). C'est dire l'importance des micro-organismes dans la séquestration du C. Enfin, la culture du maïs au cours de la première année de mise en culture des *tepetates* ne produit pas de grains, alors que la production de matière verte est relativement bonne. Bien qu'il n'y ait pas d'études sur le sujet, il est probable que c'est l'absence de micro-organismes inféodés au maïs qui est responsable de cette situation.

Les *tepetates* cultivés : de nouveaux sols productifs mais qui ont un coût

Les enquêtes de terrain auprès de petits paysans et les expérimentations à différentes échelles (depuis le laboratoire au plein champ) menées depuis plus de 20 ans ont permis d'aboutir à l'élaboration de recommandations agronomiques pour les petits paysans en agriculture pluviale, recommandations qui permettent d'obtenir de très bons rendements dès la première année de mise en culture.

Comme il a déjà été signalé, le maïs et les haricots sont à proscrire en début de mise en culture des *tepetates*. Les céréales à petits grains (blé, orge.), associées à une légumineuse (vesce, luzerne type *Medicago polymorpha*), avec une fertilisation minérale 80-60-0 dont l'apport sera fractionné en trois, est une des meilleures alternatives puisque l'on a pu obtenir 18 t.MS.ha⁻¹ de fourrage frais et plus de 3,0 t.MS.ha⁻¹ d'orge, sans irrigation, soit 20 % de mieux que les rendements régionaux moyens ! En seconde année de culture, le maïs en monoculture ne dépasse pas les 2,0 t.MS.ha⁻¹ (ce qui correspond à la moyenne régionale), alors que l'association traditionnelle maïs-fève-haricot donne des rendements en maïs de 2,2 t.MS.ha⁻¹ auxquels il faut ajouter ceux des fèves (excellents) et des haricots (moyens) ! Les années suivantes, les rendements continuent d'augmenter (+ 10 % en 3^e année) pour atteindre 3,5 t.MS.ha⁻¹ de

maïs avec une fertilisation plus importante de 120-60-0 (NAVARRO, 1998). Il faut noter que les résultats sont toujours meilleurs dans le cas des parcelles ayant reçu ou recevant régulièrement des composts et/ou les résidus de culture sont de plus réincorporés dans le nouveau sol (BÁEZ *et al.*, 2007b).

En 2013, le défonçage des *tepetates* au bulldozer (Caterpillar D6, 3 dents), effectué selon nos recommandations, coûte environ 650 € ha⁻¹ pour 1 à 2 jours de travail. Les passages d'un tracteur ensuite reviennent à 80 € ha⁻¹ pour 4 heures de travail. Le coût total dépasse donc les 700 € ha⁻¹. Si ce travail était effectué à la main, c'est-à-dire avec des pioches, le coût serait beaucoup plus élevé, puisqu'il atteindrait pratiquement le double, mais donnerait du travail à des dizaines de personnes. Or, dans ces milieux marginalisés, avoir un emploi, même temporaire et pénible, représente une aide financière importante pour les populations locales. Dans ces zones où c'est l'agriculture pluviale qui prédomine, la production ne dépasse pas les 2 à 3 t ha⁻¹ de maïs, d'orge ou de blé. Début 2013, cela revient à obtenir entre 450 à 700 € ha⁻¹ pour le maïs, de 500 à 750 € ha⁻¹ pour le blé et 350 à 550 € ha⁻¹ environ pour l'orge. À ces sommes, il faut encore soustraire les coûts de la culture elle-même. Si l'on compare les bénéfices de ces cultures aux coûts de préparation des *tepetates*, on voit qu'il faut attendre pratiquement 10 ans de retour sur investissements. Même avec des cultures à très fortes valeurs ajoutées comme les arbres fruitiers et les fleurs, il faut attendre au moins 5 ans. Ces sommes et l'immobilisation de capital sont incompatibles avec les ressources dont peuvent disposer les petits paysans mexicains de ces régions. Ainsi, dans tous les cas, une aide extérieure est indispensable si l'on veut convertir ces matériaux en champs agricoles productifs.

Conclusions

Il est donc possible de transformer les *tepetates*, tufs volcaniques compacts, stériles en un sol nouveau, fertile, vivant et très productif. Il faut pour cela d'abord apporter des engrais minéraux, puis augmenter et gérer les matières organiques dont l'impact sur la physique, la chimie et la biologie du sol est considérable. Même si les coûts des travaux de mise en culture et terrassement peuvent être récupérés au bout d'une décennie, l'investissement initial est hors de portée du petit paysan mexicain concerné. Seule une aide de l'État, sous forme de prêt d'engins de terrassement par exemple, peut permettre la réalisation effective de ces travaux. La capacité de ces nouveaux sols à adsorber d'énormes quantités de C en très peu de temps devrait permettre d'obtenir des financements dans le cadre de la capture du C afin de lutter contre le réchauffement climatique, lesquels financements devraient être utilisés pour payer les engins permettant de transformer les *tepetates* en sol.

Bibliographie

- ÁLVAREZ-SOLÍS J. D., FERRERA-CERRATO R., ZEBROWSKI C., 1992 – « Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de los tepetates ». In Zebrowski et al. (eds) : *1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra*, 10, N° esp. : 419-424.
- ÁLVAREZ D. J., FERRERA C. R., ETCHEVERS BARRA J. D., 2000 – Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34 : 523-532.
- BÁEZ PÉREZ A., ETCHEVERS BARRA J. D., HIDALGO MORENO C., PRAT C., ORDAZ CHAPARRO V., NÚÑEZ ESCOBAR R., 2002 – Organic C and Olsen-P in cultivated tepetates of Mexico. *Agrociencia*, 36 (6) : 643-653.
- BÁEZ PÉREZ A., ETCHEVERS BARRA J. D., PRAT C., HIDALGO MORENO C., 2007A – Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Río Texcoco basin, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (3) : 487-497.
- BÁEZ PÉREZ A., ETCHEVERS BARRA J. D., PRAT C., MÁRQUEZ RAMOS A., ASCENCIO ZAPATA E., 2007B – « Manejo agronómico de los tepetates del eje neovolcánico de México ». In Gallardo L. J. F. (ed.) : *Captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*, Red Pocaiba y Red IFQA, Salamanca, España : 69-84.
- BÁEZ PÉREZ A., GONZÁLEZ CHÁVEZ M. C. Á., ETCHEVERS BARRA J. D., PRAT C., HIDALGO MORENO C., 2010 – Glomalin and carbon sequestration in cultivated tepetates. *Agrociencia*, 44 (5) : 517-539.
- BAUMANN J., WERNER G., 1997 – « Nutrient supply of reclaimed indurated volcanic ash soils and evaluation of productivity with the QUEFTS-Model ». In Zebrowski et al. (eds) : *3º Symp. intern. suelos volc. endurecidos, 12/1996, Quito, Ecuador*, Orstom-UE-PUCE-UCE : 194-201.
- BOUVIER C., ROSSEL F., 1995 – « Modélisation des crues sur le bassin de Chalco-San Marcos (110 km²) : résultats et applications ». In Le Barbé L., Servat E. (éd.) : *Régionalisation en hydrologie : application au développement*, 8^e Journées Hydro. Orstom, 1992/09/22-23, Paris, France : 253-267.
- CAS R. A., WRIGHT J. V., 1988 – *Volcanic successions. Modern and ancient. A geological approach to processes, products and successions*. London, GB, Unwin Hyman Inc., 528 p.
- COVALEDA S., PAJARES S., GALLARDO J. F., PADILLA J., BÁEZ A., ETCHEVERS J. D., 2009 – Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the Mexican transvolcanic belt. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 129 : 422-427.
- COVALEDA S., GALLARDO J. F., GARCÍA-OLIVA F., KIRCHMANN H., PRAT C., BRAVO M., ETCHEVERS J. D., 2011 – Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil Use and Management*, 27 (2) : 186-194.
- ETCHEVERS BARRA J. D., LÓPEZ R., ZEBROWSKI C., PEÑA D., 1992A – « Características químicas de tepetates de referencias de los estados de México y de Tlaxcala, México ». In Zebrowski et al. (eds) : *1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra*, num. esp., 10 : 171-177.
- ETCHEVERS BARRA J. D., ZEBROWSKI C., HIDALGO MORENO C., QUANTIN P., 1992B – « Fertilidad de los tepetates II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala ». In Zebrowski et al. (eds) : *1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra*, num. esp., 10 : 385-391.
- ETCHEVERS BARRA J. D., PÉREZ OLIVERA M. A., BRITO H. V., VARGAS M. I., LÓPEZ U. N., 1998 – « La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala ». In Navarro Garza et al. (eds) : *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*, Mexico, Orstom-CP : 17-36.
- ETCHEVERS BARRA J. D., HIDALGO MORENO C., PRAT C., QUANTIN P., 2004 – « Tepetates of Mexico ». In Lal R. (ed.) : *Encyclopedia of soil science*, New York, USA, Marcel Dekker, Inc : 1745-1748.
- FERRERA-CERRATO R., 1992 – « Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginados ». In Zebrowski et al. (eds) : *1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra*, num. esp., 10 : 408-418.

- FERRERA-CERRATO R., ORTIZ A. C., DELGADILLO J. M., SANTAMARÍA S. R., 1997 – « Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos ». In Zebrowski et al. (eds) : 3º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, 12/1996, Quito, Ecuador, Orstom-UE-PUCE-UE : 225-237.
- HAVLIN J. L., TISDALE S. L., NELSON W. L., BEATON J. D., 2004 – *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th Edition. Prentice Hall, USA, 528 p.
- HIDALGO M. C., QUANTIN P., ZEBROWSKI C., 1992 – « La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación ». In Zebrowski et al. (eds) : 1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num esp., 10 : 192-201.
- LAUFFER M., LEROUX Y., PRAT C., JANEAU J.-L., 1997 – « Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México) ». In Zebrowski et al. (eds) : 3º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Quito, Ecuador, Orstom-UE-PUCE-UE, 12/1996 : 443-456.
- NAVARRO GARZA H., 1998 – « Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos ». In Navarro Garza et al. (eds) : *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*, Orstom-CP : 37-59.
- NAVARRO GARZA H., PRAT C., 1996 – « Habilitación agrícola de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos y estériles) de los valles de México y de Tlaxcala ». In Bovin P. (ed.) : *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*, Mexico, Economía, Cemca-Orstom : 253-291.
- PEÑA D., ZEBROWSKI C., 1992 – *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de Mexico y Tlaxcala (Mexico)*. Orstom-Paris, CP-Montecillo, J. Liebig Univ.-Giessen, UAT-Tlaxcala, 98 p.
- PÉREZ OLIVERA M. A., ETCHEVERS BARRA J. D., NAVARRO GARZA H., NÚÑEZ ESCOBAR R., 2000 – Contribution of previous crop residues to the nitrogen pool in tepetates. *Agrociencia*, 34 : 115-125.
- PRAT C., LY B.-T., LEPIGEON I., FAUGÈRE G., ALEXANDRE J. L., 1996 – « Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano ». In Zebrowski et al. (eds) : 3º Simp. intern. suelos volcánicos endurecidos, 12/1996, Quito, Ecuador, Orstom-UE-PUCE-UE : 482-491.
- PRAT C., BÁEZ PÉREZ A., MÁRQUEZ RAMOS A., 1997 – « Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetates t3, Texcoco, Mexico ». In Zebrowski et al. (eds) : 3º Simp. intern. suelos volcánicos endurecidos, 12/1996, Quito, Ecuador, Orstom-UE-PUCE-UE : 371-383.
- PRAT C., ORDAZ CHAPARRO V. M., RUGAMA URRUTIA J. A., 2003 – Impact of mechanical fragmentation and agronomical management on the structure of tepetate. *Terra*, 21 (1) : 109-116.
- PRAT C., DE NONI G., ETCHEVERS B. J., BÁEZA, HIDALGO C., TRUJILLO G., 2012 – « Réhabilitation des sols volcaniques indurés d'Équateur et du Mexique : comportements avant et après mise en culture ». In Roose É., Duchaufour H., De Noni G., (éd.) : *Lutte antiérosive : réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*, Actes colloque Haïti 2011, IRD-AUF Édition, Marseille, 23 p.
- QUANTIN P., 1992 – « L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique latine : processus géologiques et pédologiques ». In Zebrowski et al. (eds) : 1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num. esp., 10 : 24-33.
- QUANTIN P., PRAT C., ZEBROWSKI C., 1998 – « Chap. 8 - Soil restoration and conservation: the tepetates -indurated volcanic soils- in Mexico ». In Harper D., Brown T. (eds) : *The sustainable management of tropical catchment*, Chichester, GB, John Wiley & Sons Ltd : 109-119.
- SEDOV S. N., SOLLEIRO-REBOLLEDO E., GAMACASTRO J. E., 2003 – Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena*, 54 : 495-513.
- SERVENAY A., PRAT C., 2003 – Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma*, 117 (3-4) : 367-375.
- SIMÉON R., 1887 – *Diccionario de la lengua Nahuatl o mexicana. Siglo XXI*. México, D.F.
- VELÁZQUEZ RODRIGUEZ A., FLORES ROMÁN D., ACEVEDO SANDOVAL O., 2001 – Aggregate formation in tepetate by effect of plant species. *Agrociencia*, 35 (3) : 311-320.
- WERNER G., AEPPLI H., MIEHLICH G., SCHÖNHALS E., 1978 – *Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores*. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fund. alemana para la invest. cient., Tlaxcala, Mexico, 95 p.

WERNER G., MIEHLICH G., LÜCKOFF A., MOLL W., 1988 – *Die böden des staates Tlaxcala im zentralen hochland von Mexiko. Untersuchungen über ihre entwicklung, verbreitung, erosion und nutzung unter dem einfluss 3000-Jährigen ackerbaus.* Stuttgart, Germany, 198 p.

ZAPATA MARTELO E., GUTIÉRREZ GARZA B., FLORES HERNÁNDEZ A., 2006 – *Caminar por los*

tepetates. La vision de las mujeres de Hueyotlipán, Tlaxcala, México, Colpos-Cederu, Montecillo, Edomex, 313 p.

ZEBROWSKI C., 1992 – « Los suelos endurecidos en America Latina ». In Zebrowski *et al.* (eds) : *1° Simp. intern. suelos volc. endurecidos*, Mexico, Mexique, 10/1991, *Terra*, num. esp., 10 : 15-23.

Restauration de sols volcaniques dégradés de l'altiplano mexicain par plantation d'agaves, d'herbes et d'arbres

Christian PRAT

Alejandro MARTÍNEZ PALACIOS

Eduardo RÍOS PATRÓN

Introduction

L'État du Michoacán, localisé à 150 km à l'est de Mexico est un des États du Mexique particulièrement touchés par la dégradation de ses sols : 55 % des sols y seraient dégradés, dont 27 % à cause d'érosion hydrique (SEMARNAT et COLPOS, 2003). Situé juste en amont de la ville de Morelia, capitale de l'État du Michoacán, le bassin versant du lac de Cointzio couvre plus de 650 km² et est situé en plein cœur de l'altiplano. Il est à ce titre très représentatif des conditions humaines et environnementales qui existent dans cette partie du Mexique, une des plus peuplées du pays. Des travaux menés au début des années 2000 (MENDOZA *et al.*, 2010) montrent que l'érosion et la dégradation des sols sont généralisées sur l'ensemble du bassin versant du lac de Cuitzeo (4 000 km²) dont fait partie celui de Cointzio. La cartographie des indicateurs de dégradation des sols menée sur l'ensemble du bassin de Cointzio (ALCALA *et al.*, 2012) montre que les zones les plus érodées se localisent sur les piedmonts, souvent en amont et à proximité des villages. Elles correspondent le plus souvent à la réserve foncière de terres de l'*ejido*⁹ et dont l'usage est libre aux membres de la

9. *Ejido* : terme désignant les communautés rurales à qui l'État a attribué des terres des latifundios suite à la révolution de 1910. Ces terres sont la propriété de la communauté et mises à disposition de ses membres.

communauté. Ces terres étaient déjà souvent dégradées au moment de la réforme agraire menée dans les années 1940 et ne représentaient pas alors des enjeux économiques contrairement à aujourd'hui.

Ces zones érodées ont aussi des impacts régionaux. Les sols décapés et les ravines peu perméables (BRAVO *et al.*, 2009), génèrent à chaque pluie un ruissellement, qui peut provoquer des inondations en aval. De plus, ces crues transportent les sédiments accumulés en fond de ravines et dans les rivières, et se retrouvent très rapidement dans le lac de barrage de Cointzio (EVRARD *et al.*, 2010). Il faut alors arrêter le prélèvement d'eau afin de ne pas boucher les filtres de la station de traitement, car c'est près de 20 % des besoins en eau potable de la ville de Morelia qui sont ainsi couverts. Des quartiers de la ville se retrouvent alors sans eau pendant plusieurs heures.

C'est dans ce cadre que le programme européen Desire (2007-2012) et « Bassin versant Lerma-Chapala » de la Semarnat ont étudié la dégradation du milieu afin de proposer des alternatives pour réduire les causes et processus conduisant à l'érosion des sols et récupérer les parties dégradées du bassin versant de Cointzio. Ce travail a été mené dans le sous-bassin versant représentatif « Potrerillos-El Calabozo », de façon participative avec l'ensemble des parties prenantes locales : habitants des communautés concernées, autorités et organisations locales, régionales, nationales et scientifiques.

Le milieu : le sous bassin versant « Potrerillos-El Calabozo »

Au sein du bassin endoréique du lac de Cuitzeo (4 000 km²), celui de « Potrerillos-El Calabozo » situé à 20 km à l'est de Morelia, capitale de l'État du Michoacán, et à une dizaine de kilomètres du lac de barrage de Cointzio, couvre 40 km² (fig. 1). Son relief marqué va de 3 500 m à 2 200 m, depuis le haut des volcans éteints couverts de forêts mixtes pins-chênes jusqu'à la plaine irriguée et intensément cultivée. Entre ces deux secteurs, c'est la zone de piedmont qui prédomine avec des usages liés aux sols et aux climats : Andosols et Cambisols andiques sous forêts et pâturages en haut de piedmont, Acrisols associés localement à des Cambisols andiques sous forêts très dégradés, matorrals, agriculture pluviale d'autosubsistance reposant sur le système d'une année cultivée et l'autre en jachère pâturée. Le climat est de type tempéré subhumide à saison sèche marquée et à pluies d'été, avec des températures journalières variant de 7° en janvier à 17 °C en juin. Les gelées sont fréquentes entre octobre et mars. Le climat est plus humide sur les hauteurs (type C(w1)(w) selon Köppen modifié par García) avec près de 1 200 mm an⁻¹ qu'en piedmont et en plaine (type C(w2)(w)) avec 800 mm/an et où la saison sèche est beaucoup plus marquée (6 mois d'octobre-mai/3 mois de février-avril).

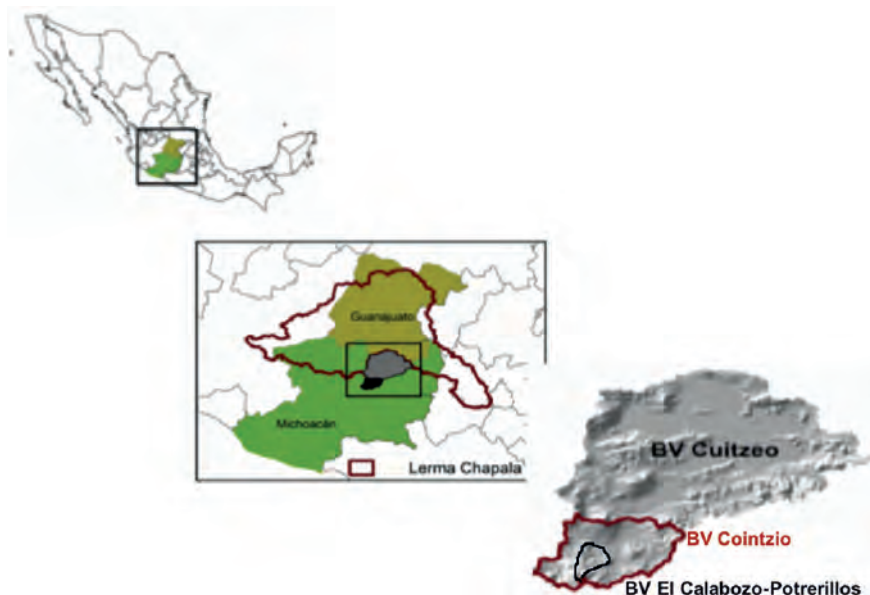


Figure 1

Localisation du bassin versant Lerma-Chapala, qui inclut celui de Cuitzeo, celui de Cointzio au sud et celui de El Calabozo-Potrerillos.

Si l'érosion qui touche les Andosols et les Cambisols andiques est limitée et de type diffus (PRAT *et al.*, 2011), donc peu visible, il en va tout autrement dans le cas des Acrisols. Ces sols, formés à partir de l'altération de coulées ou de tufs de basalte andésitique, laissent affleurer ces roches en cas d'érosion extrême sous forme de ravines, voire même de ravins profonds de plusieurs dizaines de mètres. Bien que très altérés, ces matériaux restent durs et difficiles à pénétrer par les racines des plantes. Dans le cas des Acrisols décapés de leur horizon supérieur fertile, ce sont les horizons B et même (C) qui affleurent et qui sont pratiquement stériles : pas d'azote ni de carbone, taux d'argile extrêmement élevé (> 60 %), très compact, CEC très faible, activité biologique pratiquement nulle. Ces conditions extrêmes, encore aggravées par six mois sans pluies, expliquent les difficultés d'installation et de croissance de la végétation naturelle. Quant à la production agricole, elle est impossible selon les techniques traditionnelles. Les sols les plus érodés (classés comme Lithosols), pratiquement sans végétation, jouent le rôle d'impluvium. Leur compacité empêche l'eau de s'infiltrer et favorise leur concentration, provoquant de profondes ravines au niveau des ruptures de pente. Ces profondes balafres marquent le paysage de façon spectaculaire. Ces zones érodées distribuées en tâches dans le paysage couvrent près de 10 % de la zone étudiée et sont localisées principalement sur la partie basse des piedmonts, souvent à proximité des villages (SERVENAY et PRAT, 2003).

Le sous-bassin « Potrerillos-El Calabozo » est occupé par 10 communautés rurales, reliées entre elles par une route et qui sont situées dans les limites de

la ville de Morelia, sauf une qui dépend de la ville d'Acuitzio del canje. Le village de Potrerillos est au centre de ce bassin (101° 40' 19" O ; 19° 29' 49" N, 2 260 m). Ces communautés comptent de 50 à 600 habitants. 10 % de la population est analphabète contre 30 % au niveau national. Les revenus économiques tournent autour du salaire minimum (MICAS, 2004). Seuls 10 à 20 % de ces revenus sont issus de l'agriculture. Les envois d'argent des membres de la famille émigrés aux USA, du travail en ville et les programmes sociaux d'aide constituent les sources principales de revenus. Il ne s'agit donc pas de communautés marginalisées et d'extrême pauvreté, mais simplement de communautés en situation précaire, très représentatives des communautés rurales de l'altiplano mexicain (GRUFFAT et PRAT, 2007).

Après avoir étudié, mesuré, analysé les causes, processus, dynamiques et ampleurs des différents phénomènes en jeu, de l'échelle du champ à celui des bassins versants (de 6 km² à 650 km²) pendant plusieurs années (REVOLSO, 2002 ; STREAMS, 2010 ; DESIRE, 2012), des options et propositions ont été élaborées dans le cadre de travaux participatifs associant les communautés rurales du bassin de Potrerillos-El Calabozo. Plusieurs d'entre elles sont relativement classiques (labour minimum, contrôle des ravines, gestion du bétail, production fourragère, pratiques agricoles, etc.). Toutes ont été faites de façon holistique, c'est-à-dire en étant complémentaires les unes avec les autres, tant à l'échelle de l'espace, du temps, des sexes, de la santé, des ressources économiques disponibles et si possible, des institutions, des pouvoirs politiques et administratifs (AVILA *et al.*, 2009). Si ces propositions ont été testées et utilisées par nombre de paysans, elles concernent des champs en cours de dégradation, mais pas les zones les plus dégradées. De plus, elles impliquent un investissement humain, technique et financier important, difficile à mettre en œuvre localement. Finalement, une proposition a émergé de l'équipe des chercheurs qui a été très rapidement acceptée et même plébiscitée par tous : l'agave-foresterie.

La place de l'agave au Mexique et la production du mezcal

La famille des Agavae s'étend du Canada au Paraguay, depuis le niveau de la mer jusqu'à 3 500 m d'altitude, en milieu aride à semi-humide et sur tous types de sols, même pauvres. C'est au Mexique que l'on compte le plus d'espèces (217 espèces sur les 288 recensées en Amérique) dont 55 % endémiques (GARCÍA-MENDOZA et GALVÁN, 1995). Cette biodiversité pourrait être liée à l'action de l'homme qui au cours des derniers millénaires, aurait sélectionné des lignées d'agaves en fonction de ses intérêts : construction, clôture, médicinal, hygiène (saponine), vestimentaire (fibres), utilitaire (cordes, protection) et bien sûr

alimentaire (homme, bétail) (COLUNGA-GARCÍA-MARÍN *et al.*, 2007 ; GARCÍA-HERRERA *et al.*, 2010). C'est également le cas de l'association agave (utilisée comme barrière antiérosive) et maïs/haricot/courgette (production alimentaire) qui a été attestée à maintes reprises au Mexique (ALIPHAT et WERNER, 1994). La forme alimentaire des agaves la plus connue dans le monde est probablement l'alcool qui en est tiré, connu sous les noms de mezcal et de tequila (qui est une variante du mezcal). De fait, ces deux alcools constituent des enjeux économiques de plusieurs milliards d'euros par an. Bien que les agaves soient indissociables de la société mexicaine, tant hier qu'aujourd'hui, cela ne signifie pas pour autant que leur gestion soit menée de façon durable en respectant les sols, ni que nous sachions tout de leur mode de culture : de nouvelles voies restent à explorer.

Sur les 162 000 ha où l'agave est collecté, seuls 10 % sont cultivés. Or, comme pour la tequila, la demande de mezcal a explosé ces dernières années. La cueillette des agaves sauvages s'est donc accrue d'autant, entraînant parfois leur disparition dans certains secteurs du Mexique (MARTÍNEZ *et al.*, 2009). Une des alternatives à cette situation est la conversion de terres cultivées ou non à la culture d'agaves. Cela peut se faire soit en suivant le modèle industriel mis en place pour la tequila avec toutes les conséquences négatives pour l'environnement et les communautés que cela implique, soit de façon durable, par l'implantation d'agaves, d'arbres et d'herbes.

Afin d'ajouter une plus-value à ce produit d'exception, des producteurs de mezcal ont obtenu la dénomination d'origine (D.O.) de leur produit en 1994. Malheureusement, seules quelques régions du Mexique étaient concernées. Les 11 000 producteurs du Michoacán exclus de cette D.O. ont finalement réussi fin 2012 à étendre le territoire certifié à une vingtaine de municipalités, dont celles du bassin versant de Cointzio. Or, l'obtention de cette norme permet de multiplier de 2 à 4 fois le prix de vente d'une bouteille de mezcal par rapport à une autre non certifiée. Les revenus tirés de ces activités seront extrêmement élevés. Ni les agriculteurs ni leurs enfants n'auront intérêt à abandonner leurs communautés en allant émigrer. Ils auront alors le temps et les moyens économiques de bien gérer et de protéger leur environnement.

L'agave-foresterie : une proposition nouvelle de développement durable

Le but principal de l'agave-foresterie est de parvenir à la réhabilitation durable des terres, tout en générant des revenus élevés pour les agriculteurs. Cela leur permettra à terme de réduire le nombre de bovins et la pratique du pâturage incontrôlé, principales causes de l'érosion des sols dans cette région. Les sols seront également protégés par les arbres et plantes annuelles, ainsi que par la

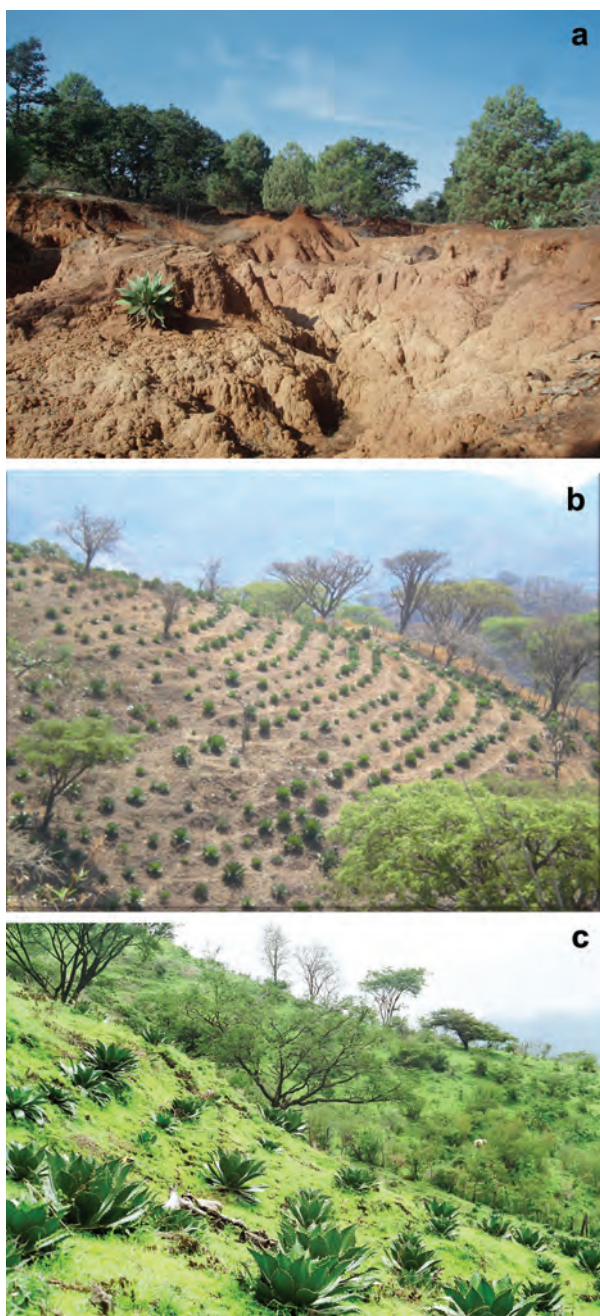
litière qui se formera au cours des années. On passera progressivement d'un sol érodé stérile à un sol productif qui aura capturé beaucoup de carbone et accru la disponibilité en eau. L'augmentation de la biodiversité se fera par la plantation d'espèces locales comme l'*Agave inaequidens*, d'arbres tels que le cerisier noir du Mexique (*Prunus seronita*, var. *capuli*), des pins (*Pinus cembroides*, *Pinus michoacana*, *Pinus maximartinezii*), l'aubépine du Mexique (*Crataegus mexicana*), le chérimolier (*Annona cherimola.*), le néflier du Japon (*Eriobotrya japonica*) et d'herbacées telles que l'œillet d'Inde (*Tagetes erecta*), l'ansérine ou thé du Mexique (*Chenopodium ambrosioides*), le tournesol (*Helianthus annuus*), l'amarante (*Amaranthus leucospermus*), la camomille (*Chamaemelum nobile*). Ces associations végétales sont efficaces pour contrôler leurs ravageurs et maladies. Ces plantes constituent également des ressources à des fins médicinales, alimentaires et fourragères. Elles sont donc un complément économique à la production d'agaves au cours des premières années de plantation. Ce sont les femmes qui s'occupent de ces plantes, alors que la culture, la récolte et la transformation des agaves en mezcal sont des activités masculines.

Les termes techniques de l'agave-foresterie à El Calabozo-Potreriillos

Le bassin versant de El Calabozo-Potreriillos est caractérisé par la présence de *Agave inaequidens*, un des agaves endémiques de la région qui ne pousse qu'entre 1 500 et 2 000 m d'altitude, avec une pluviosité annuelle variant de 700 à 1 200 mm répartie sur 6 mois, de mai-juin à octobre. Contrairement à la plupart des agaves, *Agave inaequidens* se reproduit à partir de graines portées par une hampe florale de plusieurs mètres de haut qui apparaît à la maturité de la plante et qui signe son arrêt de mort entre 7 et 14 ans, en fonction des conditions du milieu. Il pousse aussi bien au soleil avec ses feuilles dressées vers le haut qu'à l'ombre avec les feuilles ouvertes et avachies sur le sol.

Dans le cadre du programme Desire (SCHWILCH *et al.*, 2012) associé à celui de la Semarnat « Manejo micro-cuencas » (2008), une proposition de récupération de sols dégradés par agave-foresterie a été élaborée en concertation avec des communautés paysannes du bassin versant de El Calabozo-Potreriillos, puis mise en application depuis 2010 selon le schéma décrit ci-dessous (MARTÍNEZ *et al.*, 2010). Ce plan est en partie basé sur celui mis en place avec la communauté de Titzio, à 2 heures du site d'étude, par A. Martínéz-Palacios en 2002 (MARTÍNEZ *et al.*, 2009), mais avec une autre variété d'agaves endémiques (*A. cupreata*) que celle utilisée ici (*A. inaequidens*). En 2010, les premiers litres de mezcal ont commencé à couler à Titzio.

Les graines ont été récoltées sur quelques plantes situées dans des secteurs éloignés les uns des autres et géolocalisées précisément. Lors des prochains prélèvements, on pourra ainsi choisir d'autres sites, ce qui permettra de maintenir la diversité génétique des souches, même si en fait, la diversité génétique des graines est très élevée naturellement. Chaque agave produit plus de 80 000 graines. Semées sous serre, plus de 90 % des graines ont germé. Au bout de 3 mois, les



a : le même champ érodé avant réhabilitation, b : 4 ans après réhabilitation, c : 7 ans après sa plantation.

[photos a et b] © A. Martinez

[photo c] © IRD/C. Prat

plantules ont été transplantées avec plus de 90 % de survie. Les semences d'une plante permettent donc de couvrir plus de 25 ha de plantations dans le cadre d'une plantation d'agave-foresterie avec contrôle de l'érosion des sols.

La serre de 10 x 5 m a été construite grâce à l'aide financière de la Semarnat sur un terrain prêté par la communauté et pourvu d'eau. Elle est gérée par la communauté dont deux membres sont responsables des plants. Parallèlement au semis des agaves, des arbres font aussi l'objet de semis. Les plants ont été disposés à l'ombre d'un filet à mailles denses, arrosés et fertilisés (17-17-17) régulièrement pendant 7 mois. En début de saison des pluies, les plantations dans les champs ont été effectuées. Les agaves ayant un système racinaire peu développé, un trou fait à la pioche de 30 x 30 cm est suffisant, alors que pour les arbres il doit être de 50 x 50 cm. Plutôt que d'ajouter des fertilisants de synthèse, vite minéralisés, l'idéal est d'ajouter une poignée de compost à ce nouveau sol totalement dépourvu d'éléments fertiles au moment de la plantation.

Le schéma de plantation a deux objectifs : 1/ récupérer les sols et les rendre productifs ; 2/ contrôler l'érosion hydrique. Dans le premier cas, l'agave-foresterie permet de cultiver des agaves pour faire du mezcal et obtenir des produits issus des arbres et des annuelles. Les agaves sont plantés tous les 1,5 x 1,2 m,



Figure 2

Schéma de plantation des agaves, des arbres et des lignes antiérosives d'agaves.

soit 2 218 plantes ha^{-1} avec des arbres tous les 6 x 6 m, soit 545 arbres. ha^{-1} . Dans le second cas, on installe un système antiérosif d'agaves densément plantés en courbes de niveau, qui ne seront pas récoltés. Les agaves sont plantés en quinconce tous les 0,2 m sur 3 lignes espacées de 0,5 m (fig. 2).

Il aura fallu une semaine avec 30 jours.hommes $^{-1}$ pour planter un hectare, du fait de la difficulté de creuser des trous à la pioche dans le tuf volcanique induré affleurant et moitié moins de temps quand il s'agit d'Acrisols dégradés. Pour contrôler les ravines, des petits ouvrages en pierres sèches (≤ 3 m de haut) ont été installés dans la zone de plantation. Celle-ci a été mise en défens *via* une clôture de fil de fer barbelé afin d'empêcher que le bétail élevé de façon extensive ne vienne détruire les plantations, non pas tant en mangeant les jeunes plants qui sont déjà pourvus d'épines, mais en les piétinant. L'idéal est de maintenir cette interdiction au moins les 3 premières années.

Un bilan économique extrêmement positif

Les récoltes concernant les arbres et herbacées seront faites chaque année, mais pour les agaves elle n'a lieu qu'une seule fois au bout de 7 à 14 ans. Quelques mois auparavant, la hampe florale doit être coupée. Les feuilles sont coupées et laissées sur le terrain. À la récolte, 2 hommes travaillant à temps partiel pendant 3 semaines peuvent produire 300 l de mezcal à partir de 20-25 cœurs de plantes de 60-70 kg chacun. Un litre en D.O. est vendu autour de 20 €, contre moins de 5 € pour un mezcal non référencé. Ainsi, pour une densité moyenne de 1 200 plantes ha^{-1} , le producteur peut espérer obtenir 30 000 € ha^{-1} , soit 3 000 €. $\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ au bout de 10 ans ! Ce chiffre est à rapporter aux 350 €. $\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ obtenus pour le maïs pluvial avec un investissement, du temps et des risques agroclimatiques conséquents, contrairement à la culture durable d'agaves locaux.

Il est également important d'inclure dans ce bilan les bénéfices obtenus par la vente de plants d'agaves issus des serres communautaires (0,50 € le plant, et 200 000 plants produits chaque année), des plantes médicinales récoltées, et des fourrages éconómisés grâce à l'usage des feuillages des arbres complantés avec les agaves.

On voit donc immédiatement l'immense écart qui sépare les revenus issus de la culture de rente d'agaves à mezcal, de celle de cultures vivrières et on comprend également l'intérêt et l'enthousiasme des petits paysans, suscités par nos propositions !

Conclusions : une expérience participative prometteuse

L'étude du milieu naturel et humain, des expériences et des programmes de recherche menés au préalable dans la région, le travail d'échanges entre paysans, autorités, institutions, scientifiques, ainsi que des financements sur le moyen

terme ont permis de faire un bilan de la situation et d'élaborer des propositions de développement durable qui satisfont l'ensemble des partenaires, et en premier lieu les paysans. Contrairement à la majorité des projets, il ne s'agit pas d'améliorer sensiblement les ressources des paysans, mais bien de leur permettre de ne plus avoir à quitter leurs terres, ni eux ni leurs enfants. Le futur étant chez eux, ils se donneront alors les moyens de préserver et de restaurer leur environnement. L'agave-foresterie est un des moyens de le faire et est garant de durabilité et de biodiversité.

Ce programme de réhabilitation des terres dégradées par agave-foresterie, commencé en 2010, va se poursuivre au cours de la prochaine décennie. Des recherches sont menées comme le suivi de l'impact réel de ces aménagements et plantations sur la récupération du milieu, et en particulier des sols (fertilité, capture du carbone), l'étude de l'impact sur les sucres des plantes en fonction de leur position vis-à-vis de l'ombrage (plein soleil vs ombre), les problèmes de gouvernance des communautés dès que la production de mezcal, et donc de l'arrivée de la richesse économique, débutera. Le risque de vouloir transformer l'agave-foresterie en exploitation industrielle d'agaves n'est pas non plus à exclure. Le démon de l'argent l'emportera-t-il sur le développement durable ? L'avenir nous le dira !

Bibliographie

ALCALA DE JESUS M., RAMOS GONZALEZ J. J., MEDINA OROZCO L. E., RAMOS RAMIREZ A. G., PRAT CH., GONZALEZ CORTES J. C., SANTIZ GOMEZ R. E., 2012 – Indicadores de degradación en suelos de la cuenca de Cointzio, Michoacán. Mar del Plata, Argentina, 19 CLCS, 16-20/04/2012.

ALIPHAT FERNÁNDEZ M., WERNER G., 1994 – « The tepetate of the Central Mexican highlands: prehispanic and modern impact of agriculture and water management ». 15th world congress of soil science, Acapulco, México, 12-16/07/94. AISSS, Inegi, CNA : 528-540.

ÁVILA P., TRIPP M., PRAT C., 2009 – *Legislation and urban-environmental policies in the Cointzio sub-watershed of Cuitzeo. WB1 Desire (Desertification mitigation and remediation land-A global approach for local solutions)*. Morelia, Mich., Mexico, 20 p.

BRAVO ESPINOSA M., MENDOZA M. E., MEDINA OROZCO L., PRAT C., GARCIA OLIVA F., LOPEZ GRANADOS E., 2009 – Runoff, soil loss, and nutrient depletion under traditional and alternative cropping

systems in the transmexican volcanic belt, central Mexico. *Land Degradation and Development*, 20 (6) : 640-653.

COLUNGA-GARCÍA MARÍN P., EGUIARTE L., LARQUÉ A., ZIZUMBO-VILLARREAL D. (EDS), 2007 – *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*. Mexico, Cicy-Conacyt-Conabio-Semarnat, 402 p.

DESIRE, 2012 – Desertification mitigation and remediation land- A global approach for local solutions – UE6, Integrated project, Contract N° 037046. www.desire-project.eu

EVRAUD O., NÉMERY J., GRATIOT N., DUVERT C., AYRAULT S., LEFÈVRE L., POULENARD J., PRAT C., BONTÉ P., ESTEVES M., 2010 – Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology*, 124 (1-2) : 42-54.

GARCÍA-HERRERA E. J., MÉNDEZ-GALLEGOS S. D. J., TALAVERA-MAGAÑA D., 2010 – El genero *Agave* spp. en México: principales usos de

importancia socioeconómica y agroecológica. VIII Symposium-Taller Nacional Producción y Aprovechamiento del Nopal. *Revista Salud Pública y Nutrición* : 109-129.

GARCÍA-MENDOZA A., GALVÁN R., 1995 – Riqueza de las familias Agavaceae y Nolinaceae en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 56 : 7-24.

GRUFFAT D., PRAT C., 2007 – « Estudio socioeconómico de las comunidades campesinas de la Reunión y del Pedregal (Mun. Huiramba) ». Simposio Acciones y resultados para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, Morelia, Mich. México, 04/10/2007.

ILLSLEY GRANICH C., RIVERA G., TLACOTEMPA A., MORALES P., GARCÍA J., GÓMEZ T., MARTÍNEZ J. M., MARCIAL J., CASTRO F., CALZADA M., MANCILLA S., GARCÍA P., CASARRUBIAS L., HERNÁNDEZ F., FLORES J., 2004 – *Manual de manejo campesino de magueyes mezcaleros silvestres*. México, GEA A.C., Conabio, 125 p.

MARTÍNEZ-PALACIOS A., CHÁVEZ MENDOZA S., GÓMEZ SIERRA M., SIERRA YXTA M., CÁRDENAS NAVARRO R., 2009 – « Management and Conservation of *Agave cupreata* (Agavaceae) ». First International Conference on Sustainable Cities (Ed.), Morelia, Michoacán, México, 26-29/10/2009, 11 p.

MARTÍNEZ-PALACIOS A., PRAT C., RÍOS PATRÓN E., 2010 – *Propuestas del uso del Agave para la recuperación de terrenos degradados en las comunidades campesinas de la subcuenca « El Calabozo-Potrerrillos »*, Cuenca de Cointzio, Mich. México, UMSNH, IRD, Semarnat, Morelia, Mich. 16 p.

MENDOZA M. E., BOCCO G., LÓPEZ-GRANADOS E., BRAVO ESPINOZA M., 2010 – Hydrological implications of land use and landcover change: Spatial analytical approach at regional scale in the closed basin of the Cuitzeo Lake, Michoacan, Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 21 (2) : 197-214.

MICAS-MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS, 2004 – *Elaboración de diagnóstico y plan de manejo de los recursos naturales en la microcuenca « El calabozo »*, Municipios de Morelia, Huiramba y Acuitzio del Canje, Michoacán. México, Chapingo, Edomex, 300 p.

PRAT C., MEDINA-OROZCO L. E., CARLON T., MENDOZA M., ETCHEVERS J., PATRON E. R., ALCALA M., BRAVO-ESPINOSA M., GRATIOT N., NEMERY J., 2011 – « Estudio multiescala de la erosión de suelos en la cuenca de Cointzio ». In Guerrero A. *et al.* (eds) : 36 CNCS, 21-25/11/2011, Campeche, México : 696-701.

REVOLSO, 2002 – Alternative agriculture for a sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in Mexico and Chile. Contrat UE/U.J.L. Giessen: ICA4-CT-2001-10052. Inco-dev (int. coop. with developing countries) 1998-2002. Final report of the coordination. Giessen, Germany, 62 p.

SCHWILCH G., HESSEL R., VERZANDVOORT S. (EDS), 2012 – *Desire for greener land: options for sustainable land management in drylands*. Université de Bern, Alterra, Isric-World Soil Information, CTA, 282 p.

SEMARNAT, COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2003 – *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1: 250,000*. México, Memoria Nacional 2001-2002.

SEMARNAT, 2008 – Desarrollo y ordenamiento ambiental por cuencas y ecosistemas, Lerma-Chapala. Manejo de microcuencas. Caso Michoacán.

SERVENAY A., PRAT C., 2003 – Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma*, 117 (3-4) : 367-375 .

STREAMS-SEDIMENT TRANSPORT AND EROSION ACROSS MOUNTAINS, 2010 – Projet ANR Blanc 06-1 139157.

Restauration des basses terrasses dévastées par les torrents dans le Haut Atlas (Maroc)

Éric ROOSE

Mohamed SABIR

Problématique

Dans les montagnes du Haut Atlas, les terres cultivables sont rares ($< 5\%$) et sont limitées à quelques replats sur les versants, les colluvions de bas de pente (généralement transformées en gradins irrigués) et les alluvions formant les basses terrasses le long des torrents : le reste des versants est soumis au parcours extensif et couvert par quelques forêts dégradées (genévriers, chênes verts, cèdres, pins, thuyas) (ROOSE *et al.*, 2010).

C'est en circulant dans ces montagnes à la recherche de techniques traditionnelles de GCES que nous avons remarqué dans les vallées des oueds la fréquence de casiers successifs remplis de cailloux, envahis de graminées fourragères, labourés et semés de céréales et légumineuses et finalement envahis ou plantés d'arbres forestiers (*Populus alba et nigra*), fourragers (*Fraxinus excelsior*, noyers) ou fruitiers (cerisiers, pommiers, noyers) (ROOSE et SABIR, 2004).

Des mesures sur parcelles d'érosion de 150 m² ont montré que le ruissellement en nappe est faible sur les versants (CHEGGOUR *et al.*, 2006). Lors des plus fortes averses, le ruissellement s'organise en ravineaux sur les versants raides, puis en torrent dans les hautes vallées drainant la fonte des neiges et enfin en oueds larges dans la plaine semi-aride. Lors des averses exceptionnelles, tous les 30 à 50 ans, les torrents débordent du lit mineur, inondent les basses terrasses, renversent les murettes, arrachent la terre et la végétation et abandonnent ces

parcelles dénudées, recouvertes de bancs de sable, de graviers et de gros cailloux (parfois de $> 1 \text{ m}^3$) et de résidus organiques (délaisés de crue). Les eaux, très claires en saison sèche, prennent la couleur des sédiments arrachés aux versants voisins (marnes rouges) et à certaines époques coulent noires, chargées des terres de parc accumulées par le bétail pâtureant sur les montagnes et des rendzines noires couvrant les versants calcaires. Aussitôt que les crues ont cessé, les travaux commencent pour récupérer ces terres caillouteuses, mais fertiles et bien irriguées toute l'année (SABIR, 2002 ; Roose *et al.*, 2010).

Les aménagements de restauration de ces terres décapées

Les paysans commencent par accumuler de grosses pierres prélevées sur le futur champ et dans le lit de la rivière pour former la base d'une solide murette pour isoler la basse terrasse du lit mineur de l'oued (fig. 1). Une fois la terrasse encadrée entre le mur de protection des berges et celui du lit mineur, sont érigés des cordons de pierres perméables ou des épis perpendiculaires : les parcelles sont organisées pour capter une partie des crues du torrent (diguette ou haies vives d'arbustes, tamarix), pour répandre cette eau chargée de sédiments (sables, terre et MO) et pour évacuer l'excédent d'eau vers le casier suivant, puis vers l'oued en aval. Progressivement, les murettes sont renforcées et surélevées à mesure que le dispositif piège les sédiments circulant avec l'eau des crues de l'oued. Au début, les casiers restent nus et minéraux, formés de sédiments de plus en plus fins apportés par les crues. Puis se développe un pâturage d'herbes sauvages (graminées) et semées (orge et vesce-avoine) plus ou moins enrichies

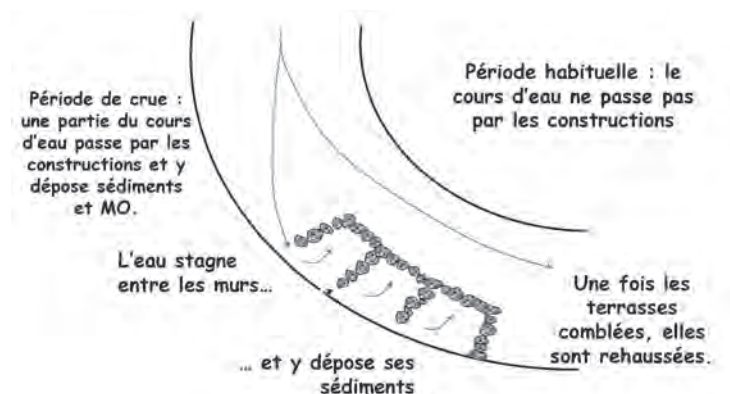
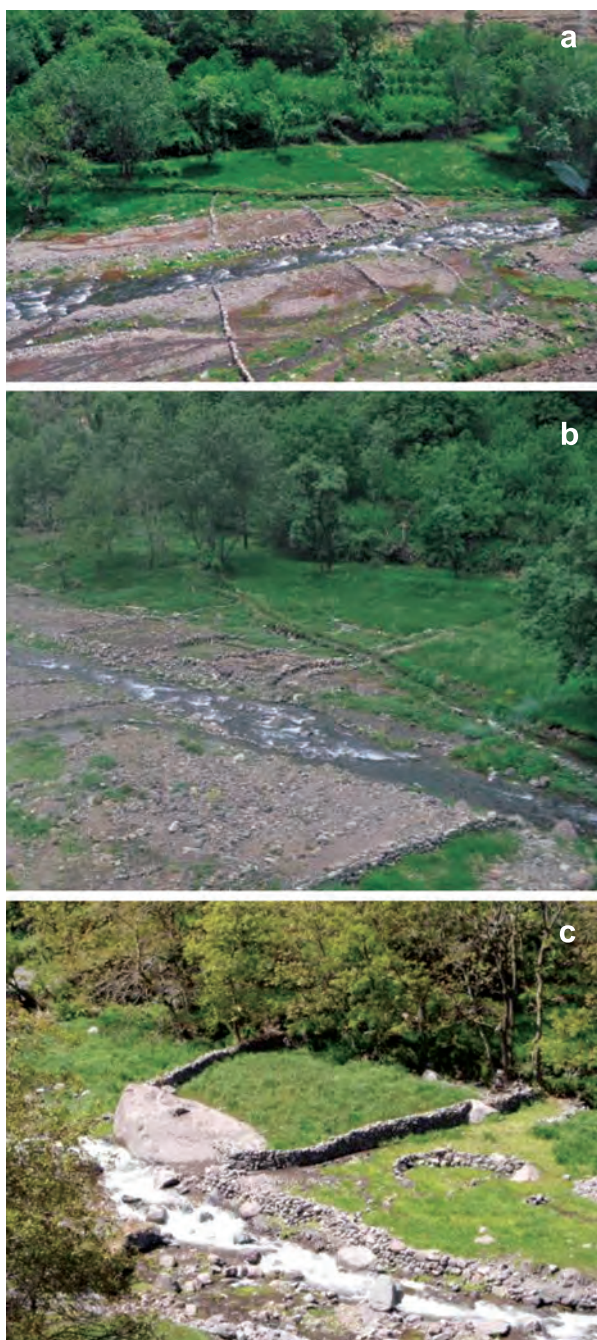


Figure 1

Construction des terrasses progressives le long des lits des oueds (Haut Atlas).



a : basse terrasse restaurée : entre les cordons/murettes de pierres, des arbustes et des arbres fixent les sédiments déposés lors des crues. © M. Sabir

b : cordons de pierres protégeant des parcelles à divers stades de restauration : cailloux, herbes diverses, céréales et enfin des noyers et des céréales fourragères. © M. Sabir

c : murettes protégeant des parcelles au stade « graminées fourragères ». Noter la taille des blocs de pierre transportés lors des plus grosses crues. Haut Atlas, Maroc. © M. Sabir

par l'exploitant (apport de fumier ou de terre fine) et par les déjections du bétail. Ces pâturages de fond de vallée sont à usage collectif (agdal) ou individuel. Ils sont fauchés ou pâturés par les bovins (vaches laitières) et les équidés. Ces agdals avec herbe fourragère sont constamment irrigués. Dans la phase préliminaire de reconstruction de la terrasse, le sol est saturé en eau et présente beaucoup d'éléments grossiers.

Dans une deuxième phase, le sol atteint une épaisseur telle (20 cm) qu'il peut être gratté superficiellement à l'araire tiré par un âne/bœuf, épierré, enrichi en MO et semé en céréales et légumineuses fourragères (orge, luzerne, bersim, fétuque, fève), puis en céréales pures (blé). Finalement, au bout d'une bonne dizaine d'années, ces parcelles cultivées et irriguées lors des crues ont atteint une épaisseur suffisante (> 50 cm) pour y planter des arbres fourragers sur les bordures (frênes, peupliers, saules, aulnes, caroubiers) ou fruitiers à l'intérieur de la parcelle (noyers, cerisiers, pruniers, pommiers). Si les crues ont été suffisamment nombreuses, mais pas trop fortes, cette portion de l'oued se trouve stabilisée suite au captage des sédiments transportés et aux travaux de consolidation réalisés par les paysans : les pics des crues et les transports solides sont réduits, l'étiage stabilisé. Mais s'il vient de la montagne une crue brutale avec un mur d'eau de ruissellement, de terre et de pierres atteignant plus de deux mètres de haut, tout cet aménagement temporaire sera dévasté et le cycle dévastation-restauration des berges et de la basse terrasse peut recommencer plusieurs fois au cours d'un siècle.

On a connu le 17 août 1995 un désastre tel qu'il a coûté la vie à plus de 242 touristes piégés dans le fond de la vallée de l'oued Ourika. En moins d'une heure, il est tombé 100 mm en montagne. Le débit de pointe de l'oued est passé de 1 à 1 000 m³/s en 15 minutes, le temps de concentration étant très court, vu le relief très accidenté (pentes fortes) et les surfaces amont dénudées. Un mur de boue, haut de trois mètres, a tout écrasé (SAIDI *et al.*, 2010).

Discussion

Un banc de sable et de galets n'a pas la fertilité d'un sol, complexe organo-minéral structuré qui permet les échanges gazeux, liquides et le stockage des nutriments indispensables pour la croissance des plantes. Cependant, l'eau circule en abondance pendant l'été : « les eaux noires » et les délaissées de crue apportent des nutriments et des MO qu'il faut compléter par l'apport de fumier et d'engrais pour obtenir une bonne production de biomasse. Les herbes sauvages profitent des sites humides pour germer, étendre leur réseau racinaire, particulièrement apte à agglomérer les particules en agrégats. Le bétail qui profitera de ces herbes vertes en périodes sèches, y laissera urine (riche en azote, K et divers oligo-éléments) et fèces (riches en microbes, carbone, fibres et nutriments divers) qui

attireront les « ingénieurs du sol ». Les paysans creusent la terre fine déposée dans les cônes de déjection des ravins des versants avoisinants et les étalent sur ces terrasses en construction. En définitive, ce site nourri par les eaux de l'oued peut reconstituer en quelques années un milieu apte à produire des céréales, puis des arbres.

Un tel aménagement, repris plusieurs fois par siècle, exige beaucoup d'efforts et d'heures de travail, mais peu de matériel : les exploitants n'hésitent pas à restaurer ces casiers après chaque crue destructrice. Les roches des murs sont prélevées progressivement sur place. Le sol riche en MO est apporté par la sédimentation des terres érodées sur les montagnes voisines : il est fumé par le bétail fourrageant sur place et par l'eau noire provenant des terres de parcs érodées sur les parcours. Les cultures associées de céréales et de légumineuses ou de divers arbres entretiennent durablement cette fertilité. Les résidus de culture (orge fourrager, blé pour grains) sont souvent enfouis. L'eau est abondante toute l'année grâce au ruissellement faible sur les versants lors des pluies et à la fonte des neiges en saison sèche qui nourrit une nappe permanente dans les alluvions. C'est donc un milieu particulièrement favorable à la culture de petits champs ou de jardins sur alluvions, une fois stabilisé (menthe, ail, pommes de terre, iris à parfum, oignons et safran). C'est aussi un endroit charmant qui attire bien des touristes et des familles qui viennent pique-niquer au frais, alors qu'à Marrakech il fait étouffant de chaleur ($> 40^{\circ}\text{C}$). Ces aménagements temporaires exigeant beaucoup de travail ne se feraient pas aussi volontiers, s'ils n'étaient largement rentabilisés par la production fourragère, fruitière, potagère et le tourisme. Cependant, ces dernières années, le tourisme l'emporte sur l'usage agricole et pastoral de ces vallées reculées. Bien qu'il fasse travailler beaucoup de jeunes au chômage, l'usage touristique (restauration, hôtellerie) transforme dangereusement le paysage de ces vallées à crues sporadiques et imprévisibles. Les restaurants, les cafés et les auberges sont installés à même les lits mineurs des oueds, souvent sur les parcelles stabilisées par les paysans. Les risques sont énormes malgré le système d'alerte aux crues mis en place par l'Agence du bassin hydraulique du Tensift. En outre, la circulation des véhicules y est toujours dangereuse. Une seule voie existe sur la rive gauche de l'Ourika.

À plus long terme, ces petits aménagements stockent l'eau dans la montagne et assurent un minimum de débit d'étiage dans la vallée semi-aride de Marrakech (rôle de château d'eau). Ces casiers piègent aussi les sédiments avant qu'ils n'aillent envaser les barrages en aval. Ces petits aménagements donnent du travail à de nombreux ouvriers et produisent des revenus à diverses périodes de l'année, en particulier du fourrage et des fruits en été, saison particulièrement sèche dans les plaines et les montagnes environnantes (services environnementaux et socio-économiques).

Les exemples ont été observés dans les vallées de Oued Lakhdar, du Rhéraya, du N'Fiss et de l'Ourika dans le Haut Atlas (vers 1 200 m d'altitude) et dans le Rif central. Mais ces tentatives de restauration des terres dévastées par les crues brutales des oueds s'observent dans toutes les montagnes semi-arides du Maroc.

Les substrats sont rocheux. Les formations rencontrées sur l'ubac sont majoritairement volcano-sédimentaires (tufs andésitiques et schistes). L'altération du substrat magmatique se manifeste par la formation de conglomérats en fonds de vallée (quaternaire) issus des colluvions et des dépôts détritiques. L'adret présente une alternance de formations de grès, supports difficilement érodables, et de formations marneuses sensibles à l'érosion.

Les sols rencontrés le long du versant sont des lithosols colluviaux peu évolués. Leur formation découle de l'érosion du relief et d'une lente altération du support rocheux. Ces sols discontinus sont de faible épaisseur et caillouteux ; l'horizon humifère est presque inexistant et la roche mère apparaît vers vingt centimètres. Au sommet, le surpâturage et le matorral empêchent le développement des lithosols qui sont désagrégés et qui ne présentent plus d'horizons distincts. Les analyses chimiques montrent que ces sols ne sont pas calcaires. Ils sont sableux à sablo-limoneux. Le taux d'argile est inférieur à 1 % dans tous les cas. Cette faible proportion peut s'expliquer par le décapage, puis le transport des argiles par les eaux de ruissellement. Au niveau local, le taux d'argile peut augmenter légèrement à cause du dépôt des produits de l'érosion qui ont pu être stockés sur les terrasses.

Globalement, le taux de matière organique est plus important dans les 10 premiers centimètres constitués d'éléments fins que dans la tranche sous-jacente pierreuse. Cependant, ce taux n'est pas significativement important. Les taux des deux horizons presque identiques sur les sols caillouteux montrent l'absence de dégradation biologique par le faible couvert végétal ($CV < 25\%$). D'une manière générale, le taux de MO augmente avec l'âge de la parcelle. Avec un taux d'argile de moins de 1 %, le pourcentage de MO dans la fraction supérieure est faible dans les parcelles jeunes. Dans les sols colluviaux de l'agdal, il devient relativement important (1 %), ce qui témoigne de l'influence de l'irrigation et de l'apport de fumier.

Les sols sont globalement pauvres en azote avec un taux inférieur à 0,5 % dans tous les cas, ce qui est caractéristique des sols sableux à sablo-limoneux. Le rapport C/N inférieur à 12 suggère que la minéralisation de la matière organique ne rencontre pas de difficultés. Les sols ont des teneurs moyennes en potassium, sauf pour l'agdal qui est lessivé, car constamment irrigué. Les teneurs en phosphore sont également moyennes. Ces valeurs moyennes sont essentiellement corrélées au substrat volcanique sous-jacent et à l'épandage d'engrais.

Les sols ne sont pas salés, mais pauvres en ions à l'exception du potassium et du phosphore. Le pH compris entre 7,3 et 7,8 caractérise les sols faiblement basiques, les valeurs sont liées au substrat rocheux.

À terme, la production en biomasse, essentiellement fourragère, de ces terrasses aménagées au fond des oueds peut passer d'un quintal/ha/an à 3 t/ha/an. Les herbes sont souvent fauchées et transportées à la case. Les parcelles qui sont proches des douars sont pâturées directement. Les vaches laitières conduites par les femmes ou les jeunes filles y séjournent durant les matinées. Les brebis, conduites par des jeunes garçons, y pâturent en fin de journée, en rentrant des pâturages forestiers montagnards.

Une fois stabilisées (risques minimums d'être emportées par les crues fréquentes), ces parcelles sont utilisées pour produire des légumes. Elles sont fertilisées (apport de fumier du douar, engrais minéraux achetés au souk voisin) et plantées en bordure par des arbres fourragers (frênes, peupliers, saules). Quand le risque est jugé vraiment minimum par les paysans, les parcelles sont plantées par des arbres fruitiers (noyers, cerisiers, pommiers). Ces vallées encaissées, autrefois sans valeur, sont devenues des zones riches (production fruitières pour le marché de Marrakech). En soixante ans, entre la fin des années 1950 et l'an 2010, les surfaces plantées en rosacées (cerisiers, pommiers) et noyers occupent tous les fonds des vallées de Tamatert, d'Imlil et de l'Ourika. Les douars ont été élargis et construits en dur (briques et ciment). Ces endroits du Haut Atlas sont des exemples typiques de la gestion conservatoire des eaux et sols (GCES).

Le développement des spéculations agricoles (fruitières), commerciales et touristiques a induit une transformation sociétale des vallées. Les jeunes garçons, pour la plus part scolarisés au niveau primaire, travaillent de plus en plus dans le commerce et le tourisme, au point de manquer de bergers et d'ouvriers agricoles. Par conséquent, les troupeaux caprins sont convertis en ovins et bovins. Les jeunes filles, de plus en plus scolarisées, s'attachent de moins en moins aux travaux de l'exploitation agricole (collecte de bois de feu, fourrage, etc.). L'exploitation paysanne est passée d'une exploitation pastorale vivant aux dépens d'un large troupeau caprin pâturent en montagne (forêts, matorrals) à une exploitation arboricole-agricole (cerisier/pommier/noyer-maraichage) dont les troupeaux de caprins et d'ovins sont relativement peu importants. Les besoins énergétiques des ménages sont satisfaits par l'introduction des bonbonnes de gaz et l'électrification des douars. L'eau potable est introduite dans la plupart des foyers.

Cette dynamique socioéconomique induisant le développement rural de ces vallées a engendré un allègement de la pression sur les ressources forestières (bois de feu) et pastorales de la montagne. Les matorrals dégradés commencent à se régénérer. Les vieilles souches de chênes verts, de thuyas et de genévriers font ressortir des jeunes rejets. Encouragé par cette dynamique positive, le forestier développe des programmes de reboisement des terres forestières autrefois utilisées par les paysans. Cette évolution progressive contribuera à la production d'une eau de qualité, moins chargée en sédiments pour les retenues des barrages situés en aval.

Bibliographie

BRUNET M., 2009 – *Impact des structures d'aménagements et gestion des terres sur les propriétés physiques des sols dans la vallée d'Imlil,*

Maroc. Mémoire de fin d'études, département Génie de l'environnement, IUT Saint-Étienne, France.

CHEGGOUR A., SIMONNEAUX V., SABIR M., ROOSE É., 2006 – Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluies sur les principaux sols du bassin versant du Rheraya (Haut Atlas occidental, Maroc). Communication orale, XIV^e conférence Isco « International Soil Conservation Organisation » du 14 au 19 mai 2006 à Marrakech, Maroc.

EVENO St., 2009 – *Impacts des structures d'aménagements et gestion des terres sur le stockage et le transfert de matière dans la vallée d'Imlil (Haut Atlas occidental, Maroc)*. Mémoire de fin d'études, département Génie de l'environnement, IUT Saint-Étienne, France.

ROOSE É., SABIR M., 2004 – Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé. *Bulletin Réseau Érosion*, 21.

ROOSE É., SABIR M., LAOUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

SABIR M., 2002 – Quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans le bassin versant de Sidi Driss, Haut Atlas central, Maroc. *Bulletin Réseau Érosion*, 19.

SAIDI M. E., DAOUDI L. A., ARESMOUK M. E., FNIGUIRE F., BOUKRIM S., 2010 – Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc) : événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride The Ourika floods (High Atlas, Morocco), Extreme events in semi-arid mountain context. *Comunicações Geológicas*, 97 : 113-128.

Évolution des propriétés des sols de lits de ravines marneuses au cours de leur restauration écologique (Draix, France)

Amandine ERKTAN

Lauric CÉCILLON

Freddy REY

Introduction

Dans les Alpes du Sud françaises, les bassins versants marneux, soumis à un climat montagnard méditerranéen, ont été fortement déboisés du ^{xv}^e jusqu'à la première moitié du ^{xix}^e siècle, ce qui les rend particulièrement sujets à une intense érosion sous forme de ravinement (fig. 1). Dans ce milieu de moyenne montagne, les vitesses d'ablation, mesurées sur les versants dépourvus de végétation, sont d'environ 1 centimètre par an (MATHYS *et al.*, 2003). Cette érosion a des conséquences négatives sur les plans socio-économique et écologique à l'aval du bassin versant de la Durance. Hier les coulées de boue, aujourd'hui les crues, sont responsables de l'envasement des retenues hydro-électriques et du colmatage des frayères à poissons. Ceci n'a cessé de stimuler le développement de stratégies de restauration des terrains érodés dans cette région.

C'est en 1860 que se met réellement en place la politique de restauration des terrains de montagne (RTM). D'importants travaux de restauration sont alors entrepris, selon diverses techniques (LILIN, 1986). Des seuils en bois ou en maçonnerie sont installés afin de corriger les lits des torrents. Par ailleurs, des pins noirs d'Autriche (*Pinus nigra*) sont plantés sur 300 000 hectares.



*Système de ravines découpant totalement la surface d'un versant marneux.
Noter les recrues de pins se développant à partir du fond de la ravine de Draix.
© A. Erktan.*

Une nouvelle stratégie d'ingénierie écologique

Malgré d'importants travaux de restauration depuis plus d'un siècle, des zones fortement ravinées subsistent encore. Les ravines marneuses qui incisent le paysage dans ces zones, à l'origine de la majeure partie de la production sédimentaire fine du bassin versant, sont les zones cibles d'une nouvelle stratégie d'ingénierie écologique, développée par l'Irstea (REY, 2009). L'ingénierie écologique consiste à agir sur l'écosystème dans le but de le faire évoluer vers un nouvel état fonctionnel, bénéfique pour l'homme et aussi pour la nature (MITSCH et JORGENSEN, 2004). De manière originale, l'ingénierie écologique met l'accent sur un apport, y compris énergétique, minimal de l'homme sur le système écologique, ainsi que sur l'utilisation des propriétés d'auto-organisation des systèmes écologiques visés.

Dans les Alpes du Sud, la stratégie d'ingénierie écologique utilisée pour réhabiliter les ravines érodées consiste à utiliser la végétation comme piège à sédiments. Cette approche ne vise donc pas directement à limiter le détachement des particules de sol, mais à favoriser la sédimentation dans le lit des ravines.

Cette rétention des sédiments à l'amont des bassins versants torrentiels représente une solution dite « minimale » (HOOKE *et al.*, 2007) dans le sens où elle cible les actions et évite d'avoir à végétaliser l'ensemble des terrains ravinés. L'objectif

final est que ces amas sédimentaires forment des zones clés pour le développement spontané de la végétation, qui limitera alors directement l'érosion *via* l'action du couvert végétal sur la stabilité des sols. C'est donc la mise en place d'une boucle de rétroaction positive entre sol et plantes qui est visée sur le long terme.

Afin de retenir des sédiments dans les lits de ravine d'environ un hectare, des ouvrages d'ingénierie écologique sont construits depuis une décennie. Ils sont constitués d'un seuil en bois mort, en amont duquel des boutures de saules d'environ 3 cm de diamètre et de 50 cm de longueur sont implantées de sorte que les deux tiers des boutures soient enfouies et qu'elles forment une haie.

Effets des ouvrages d'ingénierie écologique sur la restauration des ravines

Rôle des ouvrages d'ingénierie écologique dans la rétention de sédiments dans le lit de ravines

Les ouvrages, disposés en cascade dans les lits de ravines, ont pour rôle premier de retenir une partie des sédiments en transit lors de crues. Le suivi des hauteurs de sédiments piégés par les ouvrages a été mené depuis 6 ans sur deux sites expérimentaux. Les résultats ont montré que, durant les trois premières années après leur implantation, ce sont les boutures de saules, implantées en amont du seuil en bois mort, qui retiennent les sédiments (fig. 1). À partir de la troisième année, les rejets des boutures prennent le relais et commencent à jouer un rôle dans la rétention des sédiments (fig. 1 ; ERKTAN et REY, 2013).

À l'échelle d'un sous-bassin versant de 3 ha, sur le site du Francon, où est menée une expérimentation grandeur nature (Draix, Alpes-de-Haute-Provence), il a été montré que les ouvrages piègent en moyenne 0,35 m³ de sédiments par an et que l'équipement des lits par des ouvrages permet ainsi de diminuer d'environ 1/3 la quantité de sédiments transitant à son exutoire (N. Talaska, communication personnelle). Enfin, il a été montré que l'efficacité des ouvrages est optimale lorsqu'ils sont placés à 1 mètre de dénivelé les uns des autres.

Dans le but d'optimiser la rétention des sédiments dans les lits des ravines, nous avons cherché à relier les caractéristiques morphologiques des barrières végétales à leur capacité de rétention de sédiments. Nous avons ainsi observé que l'homogénéité morphologique des barrières végétales semble être un paramètre clé pour favoriser le piégeage de sédiments (ERKTAN *et al.*, 2013).

Colonisation spontanée des atterrissements sédimentaires de lit de ravines par la végétation

Les atterrissements sédimentaires formés en amont des barrières végétales de saules sont des zones favorables au développement d'une végétation spontanée. Ces amas sédimentaires forment en effet des marches d'escalier qui dissipent le ruissellement et fonctionnent comme des pièges à graines et à eau (REY *et al.*, 2005), favorisant l'installation et la croissance végétale.

Le suivi du développement du couvert végétal dans les lits de deux ravines équipées d'ouvrages a permis de mieux comprendre les mécanismes expliquant cette colonisation végétale. Il s'agit de la germination, de la reproduction végétative, ou de façon plus originale du glissement d'individus ou de communautés végétales des versants vers le lit des ravines (BURYLO *et al.*, 2007). Quatre années après l'installation des ouvrages, le couvert végétal qui s'est développé dans les lits de ravines est majoritairement composé d'herbacées (60-70 %), d'espèces arbustives (25-30 %) et enfin d'espèces arborées (5-10 %) et ce, quel que soit le site expérimental étudié (photos a, b). La strate herbacée est dominée par *Achnatherum calamagrostis* et *Aphyllantes monspellensis*, la strate arbustive par *Ononis fruticosa*, *Genista cinerea* et *Buxus sempervirens* et la strate arborée par *Pinus sylvestris* et *Pinus nigra*. Les espèces installées sont majoritairement vivaces (97 %) et pionnières (34 %) (Sophie Labonne, communication personnelle). Le recouvrement végétal global des lits de ravine reste cependant faible (inférieur à 50 %).



a : ouvrages d'ingénierie écologique au moment de leur installation,
b : après une saison de végétation.

© A. Erktan

Afin de mieux anticiper comment pourrait évoluer la végétation dans les décennies à venir, nous avons étudié la structure verticale de communautés végétales qui se sont spontanément installées depuis une centaine d'années dans des lits de ravines, sans construction d'ouvrages. Nous avons ainsi identifié un gradient de végétation qui correspond à la succession de différents stades écologiques jusqu'au « climax ». Le long de ce gradient de végétation, nous observons une augmentation de la proportion de la strate arborée, une augmentation puis le maintien de la strate arbustive et une diminution de la strate herbacée, qui reste cependant bien présente (fig. 3). On voit également apparaître une strate muscinale en fin de succession. Dans les ravines, l'activité érosive est telle que le passage d'un stade écologique au suivant peut être remis en cause par des crues de forte intensité. L'évolution des communautés le long de ce gradient n'est donc pas forcément linéaire. Ce gradient de végétation peut néanmoins correspondre à l'évolution du couvert végétal dans les lits de ravines aménagées par des ouvrages, si le développement de la végétation n'est pas trop intensément perturbé par des crues, et c'est pourquoi nous l'avons choisi pour être à la base de l'étude présentée ci-dessous, qui vise à mieux comprendre comment la stabilité et la fertilité des lits de ravines en cours de restauration peuvent évoluer au cours du temps.

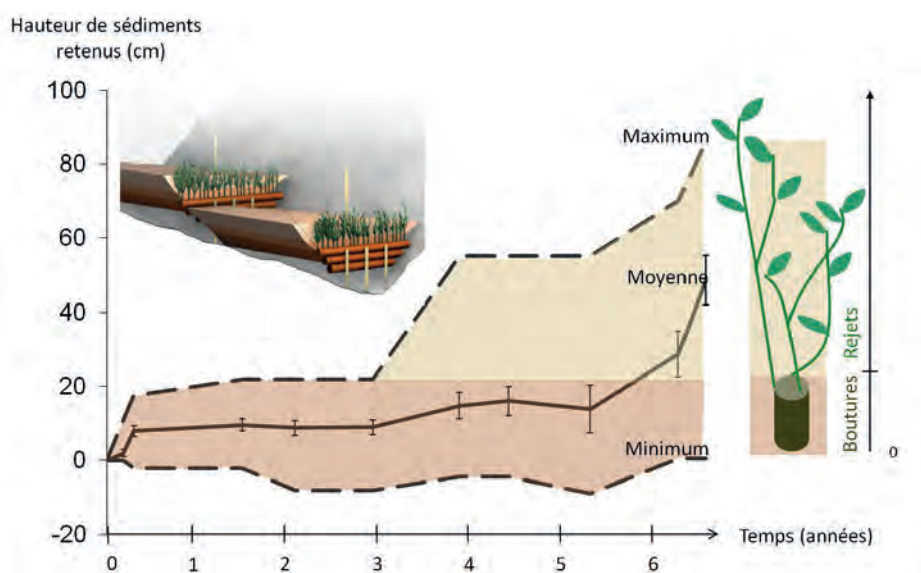


Figure 1

Rétention de sédiments par les ouvrages d'ingénierie écologique durant les six premières années.
Source graphique : L. Harduin.

Influence de la végétation spontanée sur la stabilité des amas sédimentaires de lits de ravines

Il a été montré sur substrat marneux que la présence de racines fines, caractéristiques des systèmes racinaires des herbacées et d'espèces arbustives, joue un

rôle majeur dans la protection des terrains marneux contre le ruissellement concentré (BURYLO *et al.*, 2012). Par ailleurs, la présence de racines traçantes, se développant profondément dans le sol, est essentielle pour réduire des mini-glissements de terrain.

Dans une étude récente, nous avons également suivi une composante pédologique de la stabilité des amas sédimentaires : la stabilité des agrégats du sol, dont l'influence significative dans l'explication de la sensibilité des sols à l'érosion a été montrée par BARTHÈS et ROOSE (2002). Nous avons ainsi étudié l'évolution de la stabilité des agrégats (méthode LE BISSONNAIS, 1996) des lits de ravines marneuses le long du gradient de végétation représenté dans la figure 3. Nous avons observé une augmentation significative de la stabilité des agrégats le long de ce gradient (fig. 4). Nous avons montré que l'augmentation de teneur en matière organique explique significativement la stabilité des agrégats, ce qui est en accord avec diverses études réalisées précédemment (BARTHÈS *et al.*, 1999 ; BLAVET *et al.*, 2004 ; DIALLO *et al.*, 2004). De plus, nous avons montré que les caractéristiques morphologiques des racines, telle que la diversité des diamètres racinaires favorise la stabilité de ces agrégats dans certaines conditions (ERKTAN *et al.*, 2016).

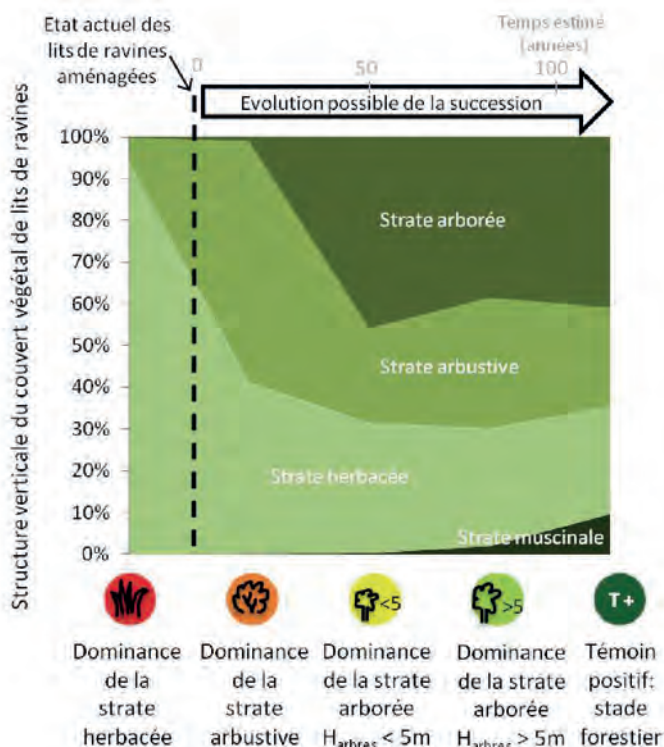


Figure 2
Évolution possible de la structure verticale du couvert végétal de lits de ravines en cours de restauration.

Influence de la végétation spontanée sur la fertilité des amas sédimentaires de lits de ravines

Nous avons étudié la teneur en matière organique, bon indicateur de la fertilité des sols, de lits de ravines érodées dans lesquels les ouvrages d'ingénierie écologique ont été construits. Nous avons observé que, neuf ans après les travaux de restauration, la teneur en matière organique atteint 21 g.kg^{-1} , alors qu'elle est de 35 g.kg^{-1} dans des lits de ravines stabilisées depuis une centaine d'années (fig. 5). Nous avons par ailleurs observé que la teneur en matière organique de lits de ravines nues est de $7,4 \text{ g.kg}^{-1}$ (fig. 6). Par conséquent, la teneur en matière organique augmente de l'ordre de 10 g.kg^{-1} durant la première décennie après construction des ouvrages. Cette forte augmentation est imputable aux apports de matière organique depuis les versants qui, contrairement aux lits, étaient déjà végétalisés avant la construction des ouvrages. La réussite de la restauration de la fertilité des lits de ravines érodés pourrait donc dépendre de la présence de végétation sur ses versants. Le suivi de l'évolution de la teneur en matière organique a également été réalisé le long du gradient de végétation présenté dans la figure 3. Cette étude a montré que la teneur en matière organique augmente significativement le long du gradient (de 10 g.kg^{-1} à 45 g.kg^{-1} , Figure 6). Par ailleurs, on note une légère acidification des sols (de $\text{pH} = 8,92$ à $\text{pH} = 8,22$) le long de ce gradient, qui peut être due au développement des résineux, ainsi qu'à un début de décarbonatation (la teneur en CaCO_3 diminue de 548 à 458 g.kg^{-1}). Cette décarbonatation associée à l'augmentation de la capacité d'échange cationique (de 42 à 107 méq.kg^{-1}) indique que la pédogenèse est enclenchée au sein des amas sédimentaires.

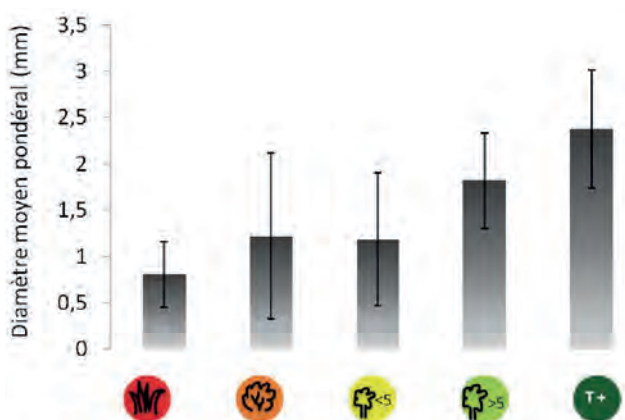


Figure 3

Évolution de la stabilité des agrégats le long d'un gradient de végétation, caractérisant l'évolution possible du couvert végétal durant le centenaire suivant les travaux d'ingénierie écologique (signification des pictogrammes : voir fig. 3 ; $n = 15$).

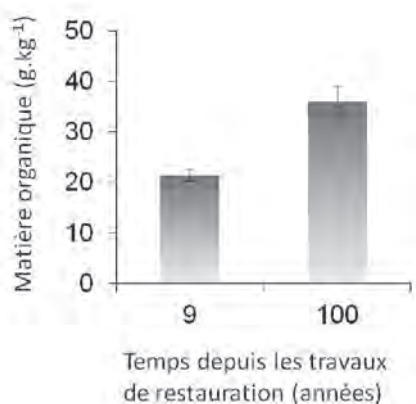


Figure 4

Évolution de la teneur en matière organique du sol de lits de ravines le long d'un gradient de végétation, caractérisant l'évolution possible du couvert végétal durant le centenaire suivant les travaux d'ingénierie écologique (signification des pictogrammes : voir figure 3 et T- = témoin négatif, amas sédimentaire non végétalisé ; n = 15).

Conclusions et perspectives

La restauration des terrains ravinés par des techniques innovantes d'ingénierie écologique semble donc prometteuse. Dans cette stratégie, les lits de ravines sont la clé de voûte du processus de restauration écologique. Leur aménagement par le biais du végétal permet de recréer un milieu stable et fertile, propice au développement d'un véritable système sol-plante. Les lits de ravines peuvent donc être comparés à des petites oasis linéaires qui se développent au milieu des terrains érodés (ROOSE *et al.*, 2000, 2010). Ces oasis sont à la base du basculement d'un cycle de fonctionnement de l'écosystème, caractérisé

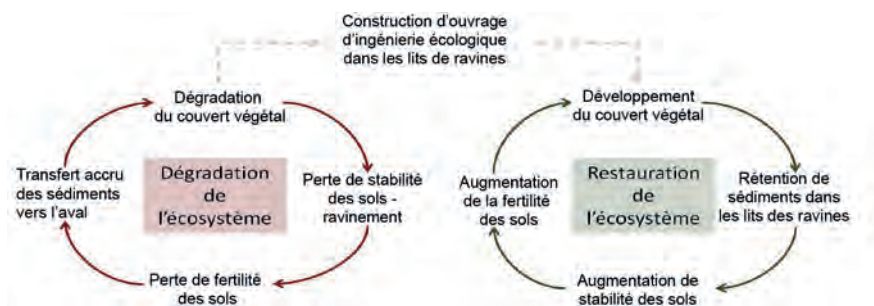


Figure 5

Schéma de bilan de la stratégie d'ingénierie écologique pour la restauration des ravines érodées.

par la dégradation de celui-ci, vers un cycle vertueux permettant sa restauration écologique (fig. 7). En effet, la dégradation du couvert végétal dans les Alpes du Sud françaises avait entraîné une diminution de la stabilité et de la fertilité des sols, qui eux-mêmes influaient négativement sur le développement d'un couvert végétal. L'aménagement des lits de ravines par des ouvrages d'ingénierie écologique permet de recréer des amas sédimentaires, sur lesquels un couvert végétal peut se développer et favoriser la stabilité et la fertilité de ces sols en devenir. L'amélioration de la qualité des sols peut alors, à son tour, favoriser la croissance végétale.

Bibliographie

- BARTHÈS B., ALBRECHT A., ASSELINE J., DE NONI G., ROOSE É., 1999** – Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Comm. Soil Sci. Plant Analysis*, 30 : 1928-38.
- BARTHÈS B., ROOSE É., 2002** – Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47, 2 : 133-149.
- BLAVET D., DE NONI G., ROOSE É., MAILLO L., LAURENT J. Y., ASSELINE J., 2004** – Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse*, 15 (1) : 111-120.
- BURYLO M., REY F., DELCROS P., 2007** – Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France). *Ecological Engineering*, 30 (3) : 231-239.
- BURYLO M., REY F., MATHYS N., DUTOIT T., 2012** – Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (14) : 1463-1470.
- DIALLO D., BARTHÈS B., ORANGE D., ROOSE É., 2004** – Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse*, 15 (1) : 57-64.
- ERKTAN A., CÉCILLON L., FRASCARIA-LACOSTE N., ROOSE É., REY F., 2013** – Morphological diversity does not increase sediment retention by plant barriers in marly eroded gullies under ecological restoration (Southern Alps, France). *Plant and soil*, 37 (1-2) : 653-669.
- ERKTAN A., REY F., 2013** – Linking sediment trapping efficiency with morphological traits of *Salix* tillers barriers on marly gully floors under ecological rehabilitation. *Ecological engineering*, 51 : 212-220.
- ERKTAN A., CÉCILLON L., LEGOUT C., GRAF F., ROUMET C., REY F., 2016** – Increase in soil aggregate stability along a successional gradient in severely eroded Mediterranean ecosystem: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant and Soil*, 398 (1-2) : 121-137.
- HOOKE J., VAN WESEMAEL B., TORRI D., CASTILLO V., CAMMERAAAT E., POESEN J., 2007** – Combating Land Degradation by Minimal Intervention: the Connectivity Reduction Approach. *RECONDES Project practical guidelines*, 22 p.
- LE BISSONNAIS Y., 1996** – Aggregate stability and assesment of soil crustability and erodibility: 1 Theory and methodology. *European J. of Soil Science*, 47 : 425-437.
- LILIN CH., 1986** – Histoire de la RTM au XIX^e siècle. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 139-146.
- MATHYS N., BROCHOT S., MEUNIER M., RICHARD D., 2003** – Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena*, 50 (2-4) : 527-548.

MITSC W. J., JORGENSEN S. E., 2004 – *Ecological engineering and ecosystem restoration*. New York, John Wiley & Sons, 411 p.

REY F., 2009 – A strategy for fine sediment retention with bioengineering works in eroded marly catchments in a mountainous Mediterranean climate (Southern Alps, France). *Land degradation and development*, 20 : 210-216.

REY F., ISSELIN-NONDEDEU F., BEDECARRATS A., 2005 – Vegetation dynamics on sediment deposits upstream of bioengineering works in mountainous

marly gullies in a Mediterranean climate (Southern Alps, France). *Plant and Soil*, 278 (1-2) : 149-158.

ROOSE É., CHEBBANI R., BOUROUGAA L., 2000 – Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, 11 : 317-326.

ROOSE É., SABIR M., LAOUNA A., 2010 – « Restauration des ravines ». In : *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, Marseille, IRD Éditions : 160-172.

Aménagements hydro-agricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols

Cas du bassin de Gros Morne en Haïti

Michel BROCHET

Saintil CLOSSY

Charles LILIN

Éric ROOSE

Introduction

Haïti, soumise à une forte orogénèse, a connu depuis longtemps divers problèmes d'érosion qui ont été exacerbés 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 développement rural ou de protection environnementale se sont succédé 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 qui doivent à la fois maîtriser l'érosion et améliorer la production agricole. Elle conduit aussi à 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 quelque temps après qu'ils soient terminés. Les



a : cuves de stockage des eaux de ruissellement des toits et des pistes : utilisations ménagères et irrigation de petits champs en aval.

© M. Brochet

b : haie vive et seuils en béton en amont d'un ravineau : piégeage des sédiments et du ruissellement.

© M. Brochet

projets de lutte antiérosive sont considérés avant tout par les paysans comme une ressource immédiate de salaires plutôt qu'un investissement à long terme, 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) (SMOLIKOWSKY, 1993 ; ROOSE, 1994 ; BROCHET, 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 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 : des haies vives pour maîtriser le bétail, des cultures pérennes comme la canne à sucre, des bananiers et des 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.

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 du manguier, 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.

Les seuils en maçonnerie et en gabions

À Gros Morne, le projet de SOS ESF¹⁰ 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. 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 « lagons », 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 mètres cubes dans les bassins et quelques centaines de mètres cubes 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 le seuil aval.

10. Ce projet bénéficie de financements de l'Union européenne, du ministère français des Affaires étrangères et de dons privés.



a et b : les seuils en béton retiennent en amont des sables, des matières organiques et de l'eau permettant des cultures associées intensives, et en aval, de l'eau stockée dans des cuves qui servent à l'abreuvement du bétail et à l'irrigation complémentaire, Haïti.

© M. Brochet

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 centennales 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 en maçonnerie. 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 ; les problèmes sont fréquents en ce qui concerne la qualité des gabions, l'ancrage du seuil, la prise en compte du risque de contournement ou du renversement. 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 (MAÏGA et 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.

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 (MAÏGA et DIENG, 2003). L'aménagement de la ravine de Bois scié à Gros Morne (11 seuils et 3 puits) a coûté 35 700 euros en 5 ans pour une capture de 5 épisodes pluvieux, soit 194 m³ d'eau dans les citernes et 3 150 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'euros) : 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 1 500 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.

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 campechianum*), *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 une 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.

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 (enclosure) 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 dépôts de sédiments en amont. Ces haies sont régulièrement taillées pour limiter leur développement et la décomposition des 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 de 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 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. À 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 cette technique innovante appropriée par les agriculteurs (KOOHAFKANet LILIN, 1989).

Les difficultés rencontrées

L'utilisation de techniques biologiques (seuils dans les ravines, vergers et haies vives sur les versants) s'est heurtée à l'absence de références, mais l'observation des pratiques paysannes a fourni des informations précieuses, par exemple en ce qui concerne l'utilisation du candélabre ou de divers « bois-repousse ».

La disponibilité de certaines macroboutures est limitée, surtout pour les espèces les plus intéressantes. De ce fait, la montée en puissance de l'utilisation des techniques biologiques doit être progressive et le projet doit organiser en pépinière la multiplication végétative des espèces peu répandues.

Un problème rencontré est lié à la « mémoire » des projets de CES antérieurs. Les projets finissent par être considérés par l'ensemble des bénéficiaires comme des sortes de vaches à lait, le principal intérêt des aménagements mis en place venant des salaires ou de la distribution de vivres qui sont associés à leur construction. Dans ce contexte, l'appropriation des ouvrages par les bénéficiaires constitue un vœu pieux. Or, les aménagements biologiques ne peuvent pas faire l'économie d'une gestion par l'agriculteur.

Une autre difficulté vient de ce que les aménagements à base de techniques biologiques sont dispersés dans le bassin versant. La gestion des chantiers doit donc être décentralisée, ce qui implique la formation de relais locaux (KOOHAFKAN et LILIN, 1989).

Enfin, ces aménagements biologiques, s'ils sont assez peu coûteux tout en améliorant la fertilité du fond frais et en stabilisant la ravine, ont l'inconvénient d'être peu photogéniques, contrairement aux seuils en dur dans les ravines.

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 (emboisement). 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 en pluvial, 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.

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.

L'intérêt du projet de Gros Morne ne réside pas seulement dans les choix techniques effectués, même s'ils constituent la partie la plus visible des innovations proposées. D'autres changements sont plus discrets.

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. À 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 (Lilín Charles « Aménagements hydro-agricoles et CES : Comment tirer profit de l'expérience acquise dans un projet ? », 2009).

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.

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.

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 aiguë 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.

Ainsi, le caractère artisanal du projet se traduit par une prise en compte fine des attentes et des contraintes, mais aussi de leur évolution au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Le succès du projet résulte d'une succession de paris raisonnables portant sur ce qu'il est possible de faire à un moment et sur un site donnés et sur ce qui relève encore de l'utopie (Atelier CIAT, Port au Prince 2012).

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 agroforestier fruitier sur les bas de versant.

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, 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 ($3\ 151\text{ m}^3 + 200\text{ m}^3$ dans les bassins x 5 épisodes de grosses averses) correspond à environ $16\ 500\text{ m}^3$ 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 coûts sociaux, mais la formation progressive à de nombreux métiers artisanaux indispensables pour l'extension de tels projets.

Évolution 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

Au-delà de l'augmentation des rendements, 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 bananes 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 oasis linéaires ou 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 aux contextes d'insécurité alimentaire chronique et conjoncturelle.

Conclusions

Le contexte actuel en Haïti est caractérisé par une forte dégradation des ressources et une importante 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 et généreuses.

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 probablement réduit aussi 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 « une oasis linéaire » où les paysans, les techniciens agricoles et les experts ont développé une méthodologie appliquée à des petits bassins, 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*, 34 (134) : 423-436.

BROCHET M., 2012 – *Atelier aménagement des bassins versants*. Gros Morne juin 2012, 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, octobre 2007.

BELLANDE A., 2008 – Déboisement et reboisement en Haïti : quelques éléments pour comprendre et agir. *Revue Conjonction*, Institut Français Port-au-Prince, Haïti : 221-222.

DEGRAS L., 2005 – *Le jardin créole. Repères culturels, scientifiques et Techniques*. Éd. Jasor. Archipel des Sciences, 232 p.

GUITO R., 1999 – *Manuel pratique de CES d'Haïti*. Centre de formation en aménagement intégré des Mornes, Limbé, MARNDR et Coop. Française, Haïti, 133 p.

KOOHAFKAN A., LILIN CH., 1989 – *Arbres et arbustes de Haïti. Utilisation des espèces ligneuses en conservation des sols et en aménagement des bassins versants*. FAO-MARNDR, 133 p.

LILIN CH., 2009 – Du nord au sud : prudence dans la gestion des projets. *Revue Gérer et Comprendre (Annales des Mines)*, 95.

LILIN CH., KOOHAFKAN A., 1987 – *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. MARNDR et FAO, 36 p.

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 peasant: an assessment of 25 years of erosion control in rural Haiti*. Usaid, 265 p.

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 É., 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, 70, 420 p.

ROOSE É., CHEBBANI R., BOURUGAA 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'agrarie haïtien. Tome III : Dynamique de l'exploitation paysanne*. Éditeur Sacad et FAMV Pointe-à-Pitre Port-au-Prince, 476 p.

SÉVERIN F., 2002 – *Plant ak pyebwa te dayiti*. Port-au-Prince, Éd. Quital., 143 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 de Haïti. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 229-252.

USAID, 2007 – *Environmental vulnerability in Haiti*.

Amélioration de la productivité des sols cultivés des collines du bassin versant de Maniandro (Madagascar)

Edmond ANDRIAMBELOMANGA

Simone RATSIVALAKA

Nicolas ANDRIAMAMPIANINA

Jean-Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY

Mparany ANDRIAMIHAMINA

Introduction

Cette étude a été réalisée dans le sous-bassin d'Ambohitsimeloka du bassin versant de Maniandro¹¹, situé à 25 km au nord-ouest d'Antananarivo, sur les Hautes Terres centrales malgaches (fig. 1). C'est un espace humanisé dans lequel la problématique de la dégradation des sols causée par un aménagement extensif des flancs cultivés des collines (les *tanety*) est très importante. Le problème est de chercher les améliorations à apporter dans la gestion paysanne de la fertilité des sols ferrallitiques acides de *tanety* du bassin versant de Maniandro qui s'étend de 18° 45' lat. S à 18° 47' lat. S et 48° 25' long. E à 48° 27' long. E avec une altitude comprise entre 1 250 m et 1 450 m. L'objectif de cette recherche est de contribuer à une meilleure compréhension

11. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet « Restauration et gestion de la fertilité des sols sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, le cas du bassin versant de Maniandro, nord-ouest d'Antananarivo » financé par l'Agence universitaire de la francophonie (AUF). Les organismes associés dans ce projet sont, du côté malgache : le département de géographie de l'université d'Antananarivo et le département forêts de l'École supérieure des sciences agronomiques (Essa), le département de recherche forestière et piscicole (DRFP) du Centre national de recherche pour le développement rural (Fofifa), et du côté français : le département de géographie de l'université J. Moulin Lyon 3 et la maison de la télédétection de Montpellier.

des stratégies traditionnelles de gestion de la fertilité des sols et d'identifier les différentes contraintes liées à cette gestion paysanne afin d'apporter des solutions pour contrôler l'érosion et améliorer la fertilité des sols en vue de pérenniser les activités agricoles.

Méthodologie

Cette étude comprend, outre la documentation, des observations du paysage agricole, des enquêtes sur les ménages, des mesures sur parcelles d'érosion et des tests de fertilisation organique et minérale de la culture de l'haricot. L'observation sur transect fait ressortir tous les problèmes d'érosion et de fertilité à l'échelle du paysage et des parcelles cultivées, ainsi que tous les modes d'aménagement agricole existants. L'enquête sur le terrain a porté sur l'interview au hasard des exploitants agricoles à partir d'un questionnaire semi-structuré. L'échantillonnage correspond à une fraction de sondage de 1/5, soit 45 ménages sur 220 recensés en 2006 dans le village d'Ambohitsimeloka alors peuplé de 1 200 habitants.

Trois parcelles d'érosion de 10 x 10 m, délimitées par des tôles enfoncées dans la terre, ont été mises en place pour mesurer le ruissellement et l'érosion. Le dispositif de collecte des eaux de ruissellement comprend deux fûts de 200 litres reliés entre eux par un partiteur à 11 fentes. La mesure d'érosion porte sur l'évaluation des impacts des dispositifs antiérosifs sur l'érosion et l'état de la fertilité des sols sous manioc : 1) paillage constitué de graminées collectées sur place, 2) parcelle témoin sans dispositif antiérosif, 3) culture sous couverture végétale vivante de *Stylosanthes gracilis*.

Les analyses chimiques du sol ont concerné des prélèvements de sol faits dans l'horizon A1 (0-15 cm) avec un échantillon issu de quatre répétitions de prélèvements d'échantillons dans chaque plateau de 2 m x 5 m. Elles concernent le pH eau, les cations échangeables : Ca, Mg, K (méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium – lecture au spectrophotomètre d'absorption atomique), le P assimilable (méthode de Bray II), l'azote et l'aluminium (méthode de Kjeldhal) et la matière organique (méthode de Walkley Black).

L'expérimentation agronomique consiste en deux essais de fertilisation : 1/ fertilisation minérale et organique du sol par des engrais chimiques (dolomie, K, P₂O₅) et du fumier de parc ; 2/ fertilisation organique du sol sur haricot avec du fumier, un amendement dolomitique, un engrais organique phosphaté (guano) et des morceaux de tronc de bananier haché. L'expérimentation étudie l'effet de doses de ces fumures sur le haricot. La production a été évaluée en poids de graines sèches en t/ha/an.

Résultats

Faible fertilité physico-chimique des sols ferrallitiques acides des tanety

Ce sont des sols ferrallitiques rajeunis avec une faible épaisseur de l'horizon humifère (10 cm). Le ruissellement a partiellement décapé la couche superficielle. La faiblesse de l'horizon AH et la fragilité de la structure de l'horizon AB ne permettent pas l'infiltration suffisante de l'eau en profondeur ; en conséquence, la nutrition minérale des plantes ne peut pas se faire normalement.

Dans les sols de *tanety*, la somme en bases échangeables en K, Ca et Mg est très déficiente : inférieure à 4 méq/100 g de sol (tabl. 1). La teneur en P assimilable est faible et tourne autour de 5 ppm. Le pH du sol, inférieur à 6 est acide. La teneur faible en M.O (< 1,5 %) et le taux élevé de minéralisation ne permettent pas la formation de complexe organo-minéraux stables pour le stockage des nutriments assimilables (Terre-Tany, 1995). Dans ce cas, les sols ont une carence en nutriments et la croissance des plantes est ralentie. Les sols de terrasses colluviales sont plus riches en bases échangeables en Ca, Mg et K (somme des cations de plus de 4 méq/100 g), en M.O (supérieure à 4 %) et en P assimilable (équivalent de 17 ppm/100 g). Le pH est presque neutre.

Tableau 1
Caractéristiques chimiques des sols de Maniandro.

Unité topographique	pH	MO %	P ass. ppm	N %	C %	Ca	Mg	K	S
Sols des versants cultivés ou <i>tanety</i>	5,13	1,13	4,47	0,071	0,88	1,20	0,13	0,14	1,47
Sols de bas de pente ou terrasses	6,14	4,18	17	0,28	3,4	3,11	1,03	0,69	4,48

Source : RATSIVALAKA et al., 2007.

Gestion traditionnelle de la fertilité des sols

Les paysans gèrent la fertilité de leurs terres par trois méthodes complémentaires.

La gestion « horizontale »

Elle consiste en transferts d'éléments fertilisants prélevés sur d'autres parties du terroir (ROLLIN, 1994). Le parc à bœufs constitue le centre de production de fumier. Selon RAKOTO-RAMIARANTSOA (1995), le prélèvement d'une biomasse végétale est nécessaire pour la production de fumier. Les paysans de Maniandro prélèvent 500 kg/semaine de litière sur les versants. La litière doit être asséchée avant d'être étalée dans le parc à bœufs. Le piétinement par les bœufs lors de leur séjour nocturne dans le parc permet de mélanger la litière avec leurs déjections. La production de fumier est fonction de l'alimentation animale : pâturage pendant la journée, puis la nuit, fourrages prélevés par les enfants (30 à 50 kg/jour) et

alimentation complémentaire composée de résidus de cultures (pailles, tiges de maïs, feuilles de haricots, fanes d'arachides). Ces techniques produisent 300 à 500 kg/semaine de fumier (humide). Le fumier est évacué et entassé à l'extérieur du parc. Il doit être recouvert par des matières végétales sèches pendant une semaine pour la rétention de l'azote. On parle de « mûrissage de fumier » : 7 à 10 t/ha de ce fumier sont apportées chaque année dans les champs cultivés de *tanety* : 20 à 30 t/ha de fumier sont réservées aux terrasses et rizières.

L'utilisation des engrais par les paysans montre une diversification des éléments fertilisants : fumier, déjection avicole, compost, NPK et urée. Mais le fumier de parc reste le plus utilisé : 57 % des paysans de Maniandro fertilisent leur terre avec du fumier, 20 % avec des déchets avicoles, 10 % avec du compost et des engrais minéraux.



Apport de fumier de parc sur une parcelle de culture de haricot.

© E.Andriambelomanga

La gestion « verticale » de la fertilité

C'est la régénération de la fertilité des sols qui provient du milieu lui-même au niveau de la parcelle (ROLLIN, 1994). Ici, trois types de gestion verticale sont adoptés par les paysans. 1/ Le labour et l'aménagement des trous de plantation sont les principales techniques d'aménagement du sol des *tanety* pour régénérer leur fertilité. 2/ La jachère pendant 1 à 4 ans suivant la vitesse de colonisation par les herbes après une mise en culture de 2 à 4 ans. La diversité des herbes signifie un certain niveau de régénération de la fertilité. La jachère réduit l'érosion et accroît l'humidité du sol. Mais la pression foncière réduit la durée de la jachère. 3/ La rotation et l'association culturale avec des légumineuses. Dans le bassin versant de Maniandro, les associations culturales les plus pratiquées sont : maïs-haricot (année 1), manioc-haricot (année 2), manioc-arachide (année 3). Les légumineuses comme le haricot et l'arachide sont connues pour leur capacité à fixer l'azote de l'air. Cet azote est disponible pour les cultures associées à ces légumineuses et les cultures suivantes.

La « gestion intégrée » des eaux, des sols et de la biomasse

Elle consiste à cultiver des plantes pour freiner l'érosion et à aménager des trous collecteurs des eaux de pluie afin d'améliorer la productivité des sols. Elle s'est traduite aussi par la production des plantes sur la parcelle pour nourrir le bétail afin de produire du fumier, principal fertilisant des sols. Les zones de culture produisent aussi de la biomasse en faible quantité : les résidus de cultures sont exportés vers le parc des animaux pour y être recyclés. En se nourrissant, les animaux prélèvent de la matière végétale, la transforment en matière organique décomposée pouvant facilement minéraliser. Dans les espaces cultivés, on apporte de la biomasse transformée en matière organique sous forme de déjection, fumier, compost. L'apport de biomasse correspond à un enrichissement en nutriments des sols, d'où le rôle important joué par la biomasse dans la gestion de la fertilité.

Cette notion d'intégration implique une gestion intégrée des espaces agricoles. Elle montre une complémentarité spatiale de l'utilisation des sols. Les apports massifs d'engrais sur les parcelles de riz et les cultures maraîchères de saison et de contre-saison traduisent l'intensification agricole dans les terrasses et rizières. Les productions agricoles dans ces unités (paddy, tomates, haricots, choux, pommes de terre, courgettes) sont faibles et n'arrivent pas à combler les besoins alimentaires et financiers des exploitants. D'où l'aménagement extensif des *tanety* pour la monoculture de manioc, patates douces, arachides et pois de terre, cultures moins exigeantes. Elles produisent un complément alimentaire en période de soudure du riz. Mais l'aménagement extensif des *tanety* pose des problèmes de ruissellement et d'érosion.

Contraintes perceptibles sur les milieux écologiques, sociaux et économiques

Sur le milieu naturel, les méfaits de la gestion paysanne de la fertilité des sols se traduisent par la dégradation alarmante des ressources naturelles, qui entraîne à son tour l'importance de l'érosion des sols. L'érosion aboutit à la perte de fertilité chimique des sols cultivés (tabl. 2).

Tableau 2
Érosion chimique des sols sur une parcelle cultivée.

Échantillon du sol prélevé sur la parcelle d'expérimentation	pH	MO %	P assim ppm	N %	C %	Ca méq/100g	Mg	K
Sol à l'état initial (avant la saison des pluies)	5,44	1,13	0,060	0,55	0,89	1,76	0,100	0,015
Sol en place (pendant la saison des pluies)	4,81	1,27	0,076	0,57	1,00	0,99	0,106	0,066
Sol érodé (pendant la saison des pluies)	5,30	1,16	0,060	0,54	0,91	2,60	0,125	0,046

Source : RATSIVALAKA et al., 2007.

L'érosion en nappe sélective du sol entraîne une perte d'éléments fertiles (voir sol érodé du tableau 2) du sol. Éléments fins et fumier sont emportés par le ruissellement. L'érosion aboutit à un appauvrissement des sols en place et à

l'exportation des éléments nutritifs avec les sédiments (ANDRIAMBELOMANGA, 2007a). D'après ce tableau, on constate une acidification des sols, une perte en bases échangeables de 0,713 méq pour 100 g de sol (RATSIVALAKA *et al.*, 2007). Si l'érosion décapante se poursuit, apparaît un horizon plus riche en Ca, Mg et K.

Cette perte d'éléments fertiles du sol entraîne la diminution de la production agricole et le déclin des revenus. La pauvreté s'accroît et les paysans pauvres ne peuvent plus améliorer les terres pauvres : ils sont pris dans un cycle pervers de dégradation du milieu. Il faut trouver des solutions à leur portée.



Culture de manioc sous couverture végétale morte, Madagascar.

© S. Ratsivalaka

Les techniques d'amélioration de la fertilité des sols

L'augmentation de la couverture des sols cultivés

Deux méthodes testées localement par RATSIVALAKA *et al.* (2007) peuvent être appliquées dans le bassin versant de Maniandro : d'une part, la couverture vivante des sols par la culture dérobée de *Stylosanthes gracilis* intercalée avec les cultures et d'autre part, la couverture morte des sols par le paillage à base de matières végétales mortes ou *bozaka*. Cette technique permet la réduction de l'érosion des sols, l'augmentation de l'infiltration des eaux de pluie, la réduction de la perte d'humidité par évaporation et l'augmentation de l'eau disponible, l'augmentation de la teneur en matière organique de la couche

Tableau 3

Rôles importants de la végétation dans la lutte antiérosive.

Pertes en terre (tonnes/ha/an)		
Parcelle		
Culture de manioc sans dispositif antiérosif	Manioc sous couverture végétale vivante (<i>Stylosanthes gracilis</i>)	Manioc sous couverture végétale morte (paillage)
26,8	10	7

Source : RATSIVALAKA *et al.*, 2007.

superficielle améliorant la résistance des agrégats à l'érosion (Terre-Tany, 1995). Les techniques de culture sous couverture végétale permettent de lutter efficacement contre l'érosion des sols cultivés (tabl. 3).

L'amélioration de la fertilité chimique et la productivité des sols

Les mécanismes pour augmenter la fertilité chimique et la productivité des sols sont : accroître le niveau de matière organique dans les sols ferrallitiques à faible fertilité, au moyen d'application massive d'engrais organique surtout du fumier de parc. Ce dernier apporte de l'azote (N) et des fertilisants majeurs : K, Ca, P, Mg, donc il permet une bonne production. Mais il ne corrige pas totalement l'acidité du sol. Par conséquent, il faut apporter aux sols des amendements à base de dolomie qui agit de façon spectaculaire dans l'augmentation du pH des sols ferrallitiques acides (tabl. 4) (RATSIVALAKA *et al.*, 2007). On ne peut pas espérer un bon rendement sans l'apport de la dolomie, source de Ca et Mg, dans les sols très acides à toxicité aluminique.

Tableau 4

Rendement de haricot en grains obtenu à partir de l'essai de fertilisation organique et minérale avec de la dolomie, du fumier et des engrais minéraux.

Traitement	Rendement (t/ha/an)
T1 Témoin	0,100
T2 Dolomie (1,5 t/ha)	0,275
T3 Dolomie (1,5 t/ha) + Potasse (80 kg/ha)	0,350
T4 Dolomie (1,5 t/ha) + Potasse (80 kg/ha) + Triple Superphosphate (80 kg/ha)	0,400
T5 Dolomie (1,5 t/ha) + Potasse (80 kg/ha) + Fumier (15 t MS/ha)	0,600
T6 Dolomie (1,5 t/ha) + Fumier (15 t/ha)	0,925

Source : RATSIVALAKA *et al.*, 2007.

Dans ce sol bien pourvu en potasse, les résultats obtenus ont fait ressortir que l'apport de potasse a peu d'effet, mais que l'association Dolomie + Fumier à forte dose (T6) donne le meilleur rendement.

Les phosphates naturels, les bananiers, le guano et la dolomie apportent des éléments fertilisants naturels. L'usage de la dolomie et du fumier permet de doubler le rendement. Par contre, le traitement Dolomie + Guano + Bananier (T5) ne présente qu'un rendement moyen (tabl. 5).

La comparaison des rendements obtenus sur les parcelles témoins (T1) et sur les systèmes appliqués permet de dégager une amélioration de la productivité des sols cultivés avec le fumier et la dolomie ; le guano et le bananier haché n'ont pas amélioré la production dans cet essai. Ces systèmes présentent aussi des avantages en termes de coût. Ces éléments fertilisants sont disponibles localement et ils sont à la portée de tous les paysans. Seul l'achat de dolomie et de guano constitue une dépense pécuniaire aux paysans (4 € le sac de 50 kg

Tableau 5
Rendement de haricot en grains en t/ha obtenu avec du fumier,
de la dolomie, du guano et des bananiers hachés.

Traitement	Rendement moyen (t/ha)	Rendement minimum (t/ha)	Rendement maximum (t/ha)
T1 Témoin	0	0	0
T2 Fumier (15 t/ha)	0,825	0,500	1,350
T3 Dolomie (1,5 t/ha) + Fumier (15 t/ha)	1,425	0,750	2,525
T4 Dolomie (1,5 t/ha) + Fumier (15 t/ha) + Guano (500 kg/ha)	1,300	0,875	2,150
T5 Dolomie (1,5 t/ha) + Bananier (10 t/ha) + Guano (500 kg/ha)	0,680	0,500	1,050

Source : RATSIVALAKA et al., 2007.

de dolomie, plus 12 € le sac de 50 kg de guano contre 25 à 30 € le prix des engrais chimiques). Mais l'apport massif de fumier organique reste indispensable. Cet apport massif n'est pas possible dans le contexte écologique et économique actuel : la litière pour produire du fumier se raréfie et peu nombreux sont ceux qui possèdent des bovins. Reste encore à tester la production de compost avec tous les résidus de culture et les déchets des ménages. Le prix des engrais minéraux n'est pas à la portée des paysans pauvres. Il serait donc judicieux de subsidier les engrais pour améliorer les conditions de vie des ménages ruraux.

Les améliorations socio-organisationnelles

L'amélioration de la gestion de la fertilité des sols doit tenir compte des conditions socio-économiques et organisationnelles locales. Pour cela, il faut coordonner et réunir les efforts pour une action concertée qui vise l'encadrement des paysans par :

- le renforcement des capacités des paysans et la vulgarisation agricole, notamment en matière de gestion durable des sols et des techniques culturales intensives sur *tanety* : semi-direct, production de compost, utilisation des légumineuses ;
- la mise en place des institutions de micro-finance (IMF) et des lignes de crédits matériels et des banques de semences et d'intrants agricoles ;
- l'amélioration des infrastructures rurales : pistes, ouvrages hydro-agricoles, centre de formation et d'appui des paysans.

Discussion

Les pratiques traditionnelles de gestion de la fertilité des sols n'assurent plus les besoins quotidiens des paysans. Elles ne répondent ni aux exigences de la pression démographique, ni à la pérennisation des activités culturelles, ni à la

gestion durable et rationnelle des sols. La préoccupation majeure des paysans reste l'assurance de leurs besoins alimentaires journaliers sans tenir compte de leurs besoins futurs. L'amélioration de la fertilité des sols constitue la seule garantie de la sécurité alimentaire de la population rurale à Madagascar. Les pratiques paysannes prometteuses sont liées à cette gestion de la fertilité. Il s'agit pour le cas de Maniandro de l'intégration de la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. C'est là que les développeurs doivent intervenir en apportant des améliorations. La mise en œuvre des actions de gestion des sols doit tenir compte de ces stratégies paysannes rationnelles. Pour notre projet, les actions mises en œuvre sont :

- étudier les stratégies paysannes existantes, leurs contraintes et leurs atouts ;
- mener des essais agronomiques avec la participation des paysans en vue de dégager des solutions d'amélioration et pérenniser les essais ;
- apprendre aux paysans à utiliser les engrais organiques naturels disponibles localement à travers l'expérimentation réalisée en parcelles expérimentales, et en même temps initier les paysans aux techniques culturales modernes, à moindre coût et à la portée de tous. Cela facilite l'appropriation paysanne des techniques proposées.

Les expérimentations effectuées permettent d'identifier les meilleures solutions de LAE, entre autres: 1/ l'augmentation de la couverture végétale des sols : paille, jachère de *Stylosanthes gracilis* qui permettent de lutter contre l'érosion des parcelles cultivées, 2/ l'amélioration de la fertilité chimique et de la productivité des sols par des traitements organiques à base de fumier, de paillis, de dolomie et d'engrais naturels tels que guano et bananiers hachés. Cela donne de meilleurs rendements pour le cas du haricot.

Pourtant, dans le contexte socio-économique rural de Madagascar où la pauvreté règne, il est nécessaire de mettre à la disposition des paysans les moyens leur permettant d'adopter les différentes techniques proposées : crédit agricole, matériels agricoles, banques de semence et d'engrais... Mais les projets de recherche n'ont pas ces moyens. L'appui étatique par l'intermédiaire du ministère de l'Agriculture est crucial, ce qui n'est pas encore le cas pour le bassin versant de Maniandro. Par ailleurs, les actions mises en œuvre par les projets de recherche restent souvent limitées dans un site expérimental. Or, les zones touchées par la dégradation des sols à Madagascar occupent de vastes étendues, notamment sur les Hautes Terres.

Conclusions

Les terres des versants sont érodées et appauvries malgré les techniques traditionnelles d'exploitation du milieu pour assurer la subsistance quotidienne. Pour vaincre la pauvreté paysanne et conserver parallèlement le potentiel de production

dans ces zones, un certain nombre d'actions sont nécessaires : couvrir mieux le sol, équilibrer le bilan minéral et entretenir le taux de MO du sol grâce à une politique de production de biomasse. Vu la pauvreté des paysans, l'intervention extérieure est nécessaire. La réussite de la mutation de la gestion traditionnelle vers la gestion moderne des sols dans ces zones dégradées requiert en effet la participation active de tous les acteurs du développement dans le cadre du partenariat public et privé. Les stratégies d'action à mettre en œuvre devraient se concevoir dans le cadre d'une concertation entre tous les acteurs : État, ONG, associations, centres de recherche, bailleurs de fonds et paysans.

Bibliographie

ACCT, CIRAD, FOFIFA, ORSTOM, 1991 – « Bas-fonds et riziculture ». Actes du séminaire d'Antananarivo Madagascar, 9-14 décembre 1991, Montpellier, France, Éd. Cirad, 502 p.

ANDRIAMBELOMANGA E., 2007A – *La gestion paysanne de la fertilité des sols dans le bassin versant de Maniandro : l'exemple d'Ambohitsimeloka (Hautes Terres centrales de Madagascar)*. Mémoire de maîtrise de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, université d'Antananarivo, 131 p.

ANDRIAMBELOMANGA E., 2007B – *La gestion de l'eau et de la fertilité des sols dans le terroir d'Ambohitsimeloka (sous-bassin de Torotosy, bassin versant de Maniandro/Mahitsy)*. Rapport de mission, département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, université d'Antananarivo, 100 p.

RAKOTO RAAMIARANTSOA H., 1995 – *Chair de la terre, œil de l'eau : paysanneries et recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar)*. Paris, Orstom, coll. À travers champs, 370 p.

RATSIVALAKA S., SERPANTIÉ G., DE NONI G., ROOSE É., 2006 – « Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols ». Actes des Journées scientifiques du réseau « Érosion et GCES », Paris, Éditions AUF et GB, 310 p.

RATSIVALAKA S., ANDRIAMAMPINANINA N., MIETTON M., PUECH C., ANDRIAMIHAMINA M., RANDRIAMBOAVONJY J. C., 2007 – *Restauration et gestion de la fertilité des sols sur les Hautes Terres centrales de Madagascar : cas du bassin versant de Maniandro, nord-ouest d'Antananarivo, Madagascar*. Réseau des chercheurs EGES de l'AUF. Rapport scientifique de mi-parcours, 49 p. Rapport final, 41 p.

ROLLIN D., 1994 – *Des rizières aux paysages : éléments pour une gestion de la fertilité dans les exploitations agricoles du Vakinankaratra et du Betsileo Nord (Madagascar)*. Thèse nouveau régime de géographie, département de géographie, université de Paris X Nanterre, 323 p.

TERRE-TANY, 1995 – *Terroirs et Ressources, spécial Hautes Terres centrales*, 2, GDE, Fofifa, 74 p.

Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda

François NDAYIZIGIYE

Introduction

Au Rwanda, comme dans toute la région des grands lacs, le problème de diminution de la productivité des sols est, d'une part, fortement lié à l'érosion et à l'exploitation continue des terrains, et d'autre part, au morcellement des parcelles comme conséquence de l'explosion démographique. En 2002, la superficie des exploitations agricoles était réduite à moins d'un demi-hectare pour 43 % des agriculteurs et 33 % possédaient une parcelle comprise entre 0,5 et 1 ha (MINIFIN, 2002). Pour subvenir aux besoins familiaux sans cesse croissants, les agriculteurs sont amenés à cultiver sans repos le peu de terres disponibles sans amendements suffisants : en conséquence, les rendements de cultures ne font que diminuer.

Différentes études (KÖNIG, 1990 ; NDAYIZIGIYE, 1993) ont montré que la dégradation des sols au Rwanda résulte principalement d'une érosion sélective et d'une insuffisance de matières organiques apportées au sol, et que l'intensification de la production nécessite, d'abord une lutte antiérosive efficace, ensuite un apport de matières organiques suffisant et enfin, un complément raisonné d'engrais minéraux appropriés.

Plusieurs techniques antiérosives ont été identifiées, mais aucune d'elles n'est en mesure d'enrayer complètement l'érosion et de restaurer en même temps la



Sur ce versant, les haies vives d'herbes ont permis de transformer la pente homogène en terrasses progressives mais n'ont pas supprimé toute érosion (voir sillons).

© F. Ndayizigiye



Dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion à la station de Rubona sur une pente de 28 % aménagée en terrasses progressives grâce à des haies de Calliandra calothyrsus.

© F. Ndayizigiye

fertilité du sol. Il faut une combinaison de techniques antiérosives et de méthodes culturales pour combattre efficacement l'érosion et restaurer la fertilité des sols. La majorité des paysans étant par ailleurs trop pauvres pour aménager leurs exploitations avec des structures antiérosives onéreuses comme les terrasses radicales et acheter assez d'engrais minéraux pour intensifier la productivité de toutes leurs terres, il faut trouver des techniques antiérosives et des méthodes culturales accessibles aux agriculteurs. Dans un lot de techniques proposées, chaque utilisateur devrait trouver un paquet qui lui est accessible. Un pari pas facile à gagner ! Nous présentons ici différentes façons dont les haies vives d'arbustes peuvent aider à résoudre le problème d'érosion et de fertilité des sols dans les petites exploitations agricoles.

Les haies vives de légumineuses arbustives, le ruissellement et l'érosion

Installées à des équidistances appropriées (par exemple, une double haie tous les 5 à 10 mètres sur une pente de 15 % à 35 %), les haies d'arbustes comme

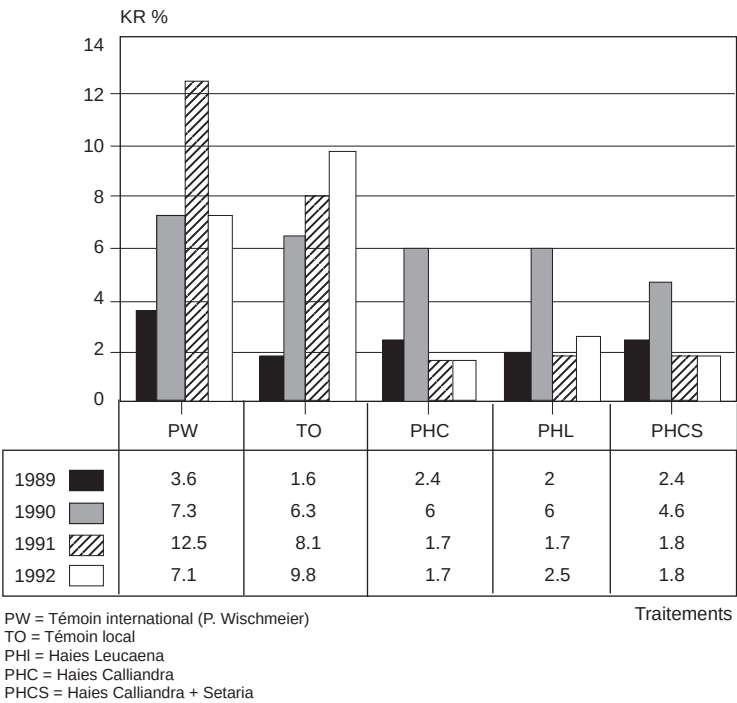


Figure 1
Ruissellement sur les parcelles aménagées avec des haies d'arbustes à Rubona.

Leucaena leucocephala et *Calliandra calothyrsus* permettent, au bout de trois ou quatre années de culture continue, de réduire considérablement le ruissellement d'environ 75-82 %, et l'érosion de plus de 98 % fig. 1 et 2).

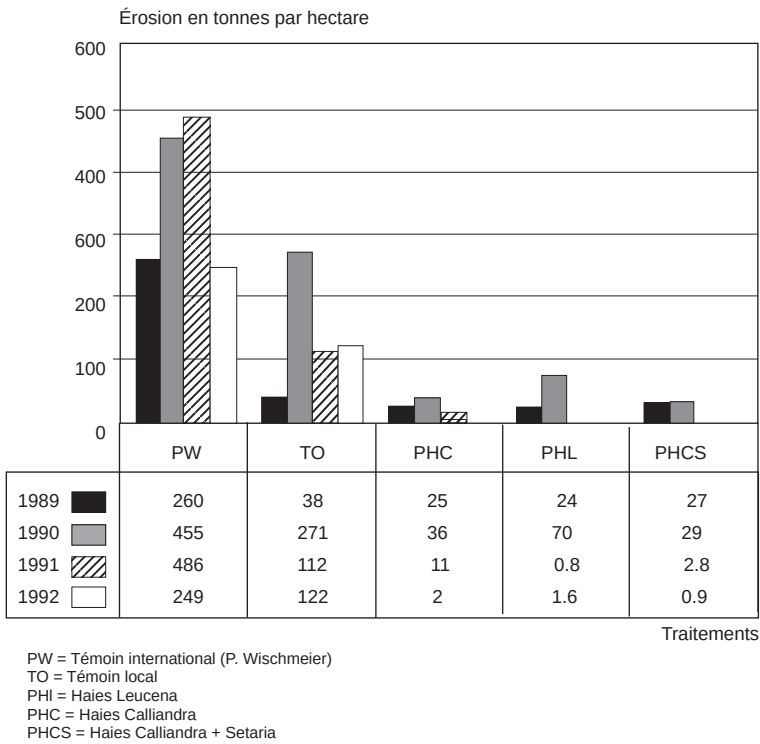


Figure 2
Érosion (t/ha/an) sur les parcelles aménagées avec des haies d'arbustes à Rubona.

Notons qu'avec des méthodes culturales appropriées, notamment le labour perpendiculaire à la pente combiné avec les billons, on arrive à former, au bout de 8 à 12 ans, des terrasses d'équilibre où le ruissellement est pratiquement supprimé et ne persiste qu'une érosion sélective qui peut être combattue par l'utilisation de la matière organique.

La production de biomasse par les haies vives arbustives

La quantité de biomasse produite par les haies arbustives varie selon les espèces utilisées et augmente avec le temps (fig. 3). Un mode de gestion approprié avec

des coupes régulières au début, au milieu et à la fin de chaque saison culturale (3 à 5 coupes/an), permet d’obtenir des rendements de biomasse importants et garantit une durée de vie plus longue des arbustes. Ainsi, si l’on met une haie tous les 10 mètres, on arrive à produire en moyenne 4,5 t/ha/an de matière sèche pour le *Calliandra* et 3,8 t/ha/an de matière sèche pour le *Leucaena* après 4 ans d’installation (NDAYIZIGIYE, 1993).

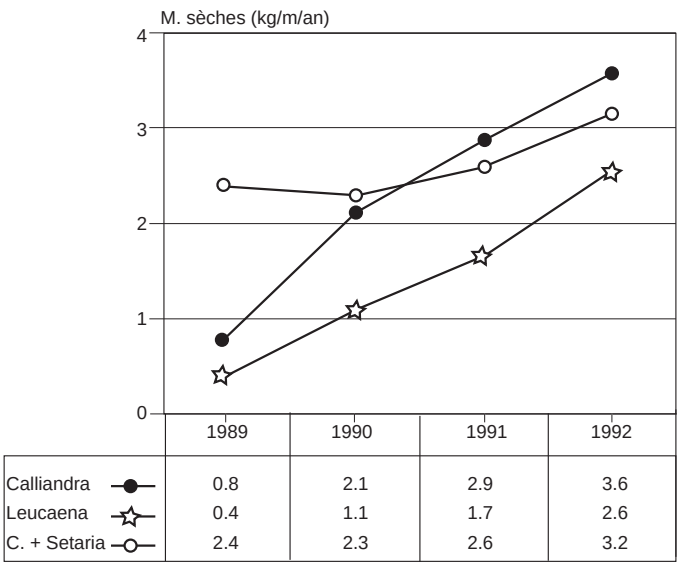


Figure 3
Évolution de la production de biomasse par les haies arbustives à Rubona.

Sur cette figure, on peut noter que l’association de l’arbuste (ici, c’est le *Calliandra*) avec une herbe (ici, le *Setaria sphacelata*) permet d’avoir les deux premières années une grande quantité de biomasse, mais l’herbe dégénère très vite et ralentit la croissance et l’épanouissement de l’arbuste qui souffre de sa concurrence surtout en ce qui concerne l’eau. KÖNIG (2007) déconseille aussi d’utiliser les lignes d’herbes, parce qu’elles perdent leur efficacité et leur vitalité après quelques années de plantation.

L’utilisation de la biomasse produite par les haies vives d’arbustes

Les arbustes choisis pour les haies antiérosives sont des espèces légumineuses réputées pour leur pouvoir de fixation de l’azote atmosphérique et de recyclage d’autres éléments chimiques du sol (phosphore, potassium, calcium, magnésium



Sédimentation des terres érodées devant une haie double de *Sétaria sphacelata* et de bananiers formant progressivement un talu.

© IRD/É. Roose

assimilables) dont les cultures ont besoin pour leur développement. Ces éléments seront restitués au sol par les différentes voies par lesquelles la biomasse produite pourra être utilisée.

Engrais vert

L'enfouissement direct de la biomasse constitue la filière courte (1 à 3 mois) qui permet un « turn over » rapide des nutriments contenus dans la biomasse. En général, ce sont les exploitations ne disposant pas d'élevage qui ont recours à cette technique pour restaurer la fertilité du sol. Les enfouissements ont lieu au moment des labours en début de chaque saison culturale. Ils concernent

surtout les adventices et les résidus de cultures constitués essentiellement de racines (les parties aériennes ayant été souvent exportées pour d'autres besoins, notamment le paillage, le chauffage, la construction des enclos). La biomasse ainsi constituée n'est pas très importante et est souvent de médiocre qualité. Par contre, la coupe des haies d'arbustes légumineux qui a lieu au début de la saison pourra fournir une quantité non négligeable de biomasse de bonne qualité qui sera enfouie pendant le labour et dont les éléments chimiques seront libérés au fur et à mesure de leur décomposition.

Paillage

Le paillage est le moyen idéal de conservation du sol. Sur sol perméable fraîchement labouré, il permet de maintenir plus longtemps une bonne infiltration (MANNERING *et al.*, 1968 ; ROOSE, 1975 ; LAL, 1975 ; NDAYIZIGIYE, 1993). En effet, il n'y a pas de formation de croûtes de battance ou de sédimentation qui peuvent réduire l'infiltration, et le paillis s'oppose à la formation du ruissellement et force l'eau à pénétrer dans le sol. Le paillage s'avère d'un grand intérêt au début de la saison de cultures où le sol reste nu pendant 2 semaines à 1 mois et après le premier sarclage des légumineuses et céréales. Ainsi, l'agriculteur peut utiliser la biomasse produite sur les haies vives pour pailler ses cultures. Il va procéder à la coupe des arbustes directement après le semis ou le premier sarclage. Dans les deux cas, le paillis va aider à limiter le ruissellement et l'érosion, mais seulement pendant 15 à 20 jours, suite à leur minéralisation rapide. Le grand avantage du paillage, c'est que les éléments recyclés sont directement restitués au sol, donc disponibles pour les cultures. Car le paillage 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) (ROOSE, 1993).

Compost

Le compostage constitue une pratique valable pour les agriculteurs n'ayant pas de bétail pour se procurer de la matière organique nécessaire à la restauration de la fertilité du sol. Pour avoir un bon compost, il faut disposer d'une quantité importante de biomasse de bonne qualité. Ainsi, la biomasse produite sur les haies vives d'arbustes au milieu de la saison peut être utilisée pour enrichir le compost en la mélangeant avec les résidus de sarclage ou de récolte et la biomasse produite ailleurs (bords des chemins, boisements). Ce compost sera de bonne qualité et contribuera à la restauration de la fertilité des sols. Cependant, les paysans pauvres disposent rarement de suffisamment de biomasse pour réaliser un bon compost en quantité suffisante pour fertiliser toutes ses parcelles. De plus, le compostage exige beaucoup de travail pour transporter de grandes masses de biomasse, retourner les tas, puis transporter à nouveau aux champs le compost mature. Enfin, il faut disposer de beaucoup d'eau pour maintenir les tas suffisamment humides et favoriser les activités microbiennes.

Fourrage et fumier

Dans les exploitations disposant d'élevage, une grande partie de la biomasse produite est utilisée comme fourrage pour les animaux. Cette filière est plus ou moins longue, car il faut 3 à 6 mois avant la maturité du fumier. Le rendement de restitution en biomasse et nutriments est généralement faible (30 à 40 %), mais la matière organique produite est de meilleure qualité (C/N = 60 pour la paille, 20 pour le fumier et 10 pour l'humus du sol). Le fumier apporte aussi la microflore indispensable pour mobiliser le stock minéral du sol et le rendre assimilable par la plante. Cependant, il a été constaté que le fumier produit sur la ferme chez les paysans est très pauvre en azote (0,52 % des matières fraîches).

En comparant les éléments recyclés par les arbustes et ceux fournis par le fumier de ferme produit avec la vache (litière, déjections et urines), nous avons constaté que l'azote recyclé par les arbustes est 2 à 2,5 fois plus élevé que celui qui est présent dans le fumier, et que par contre, par rapport au fumier, le potassium et le phosphore recyclés sont respectivement 5 à 8 et 2,7 à 4 fois inférieurs pour les haies d'arbustes installées à 10 mètres d'équidistance (tabl. 1).

Tableau 1

Comparaison entre les éléments recyclés (kg/ha/an) par les arbustes des haies installées à 10 mètres d'équidistance et ceux fournis par 10 t de fumier de ferme sec.

Objet	Matières sèches (t/ha/an)	Azote (N) (kg/ha/an)	Phosphore (P) (kg/ha/an)	Potassium (K) (kg/ha/an)
<i>Calliandra calothyrsus</i>	4,5	124,2	9,2	27,7
<i>Leucaena leucocephala</i>	3,8	102,3	6,4	17,7
Fumier de ferme	10	52,4	25	142,7

On remarque ici que les remontées chimiques dues à la biomasse produite par les arbustes sur les haies sont importantes. Dans une étude effectuée sur des sols pauvres à Ruhande, KÖNIG (1990) a aussi trouvé des données du même ordre : les feuilles produites dans une haie de *Calliandra* (2 000 m par hectare) coupée trois fois par an contiennent jusqu'à 105 kg de N, 4,7 kg de P₂₀₅ et 26 kg de K_{2O}. La production de *Leucaena leucocephala* est inférieure à celle de *Calliandra*, qui est mieux adaptée aux sols acides et aux hautes altitudes.

Ainsi, pour enrichir le fumier produit sur la ferme, il faudrait incorporer la biomasse produite par les arbustes légumineux dans le fourrage donné aux bétails. Non seulement cette biomasse est nutritive pour les animaux, mais aussi elle améliorera, par les déjections animales et les résidus de fourrage interposés, la qualité du fumier qui sera produit.

Les haies arbustives et la production vivrière

L'utilisation des haies arbustives dans les exploitations paysannes permet, certes, de lutter contre l'érosion de façon satisfaisante et de produire une quantité non négligeable de biomasse de bonne qualité pour la restauration de la fertilité, mais son influence sur la production vivrière reste faible. Toutes choses étant égales par ailleurs, il n'y a pratiquement pas de différence de production entre les parcelles aménagées avec les haies vives arbustives et celle non aménagée (fig. 4). Malgré un apport constant de 10 tonnes/ha de fumier durant les trois premières années, les rendements sont restés faibles. À la quatrième année, l'application de 2,5 tonnes/ha de chaux, 30 tonnes/ha de fumier de ferme et 300 kg/ha d'engrais minéral (NPK triple 17) a généré des augmentations de rendements de cultures. Mais comme pour les années précédentes, il faut noter que ces rendements restent très voisins (très faible variabilité interparcelleire), ce qui justifie le fait de ne pas avoir de répétition de chaque traitement.

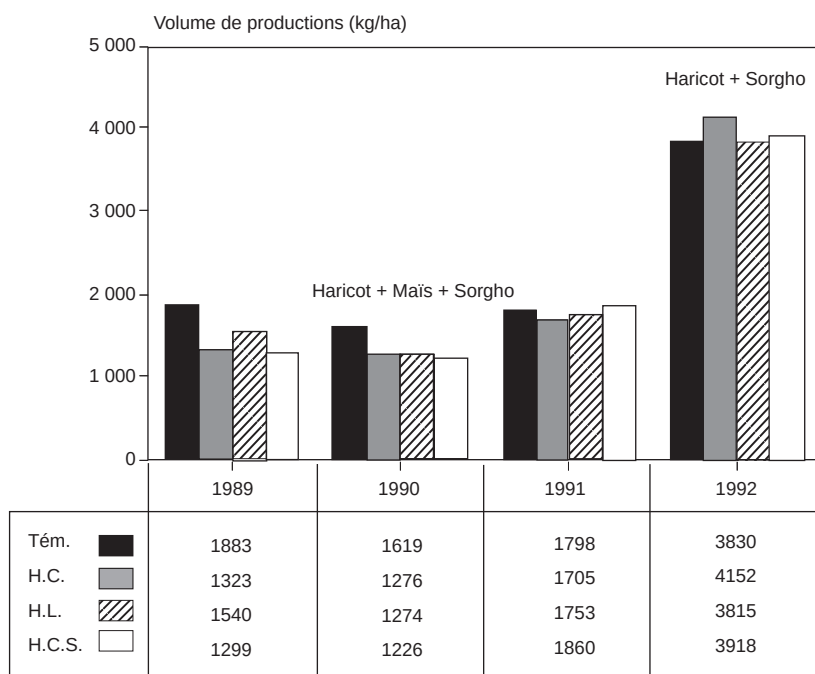


Figure 4

Comparaison de la production vivrière (kg/ha) sur les parcelles aménagées avec les haies d'arbustes à Rubona.

Cependant, il a été constaté que si les rendements des cultures sur les parcelles aménagées n'ont pas augmenté de manière à dépasser ceux de la parcelle témoin,

cela est imputable, d'une part, à une insuffisance d'éléments nutritifs, et d'autre part, à ce que les haies vives arbustives entraînent un appauvrissement en éléments fertilisants dans la partie amont des terrasses progressives (érosion sélective et décapage), et exercent une forte concurrence sur la partie aval des terrasses. En effet, sur la partie médiane de la terrasse où le décapage est moindre et la concurrence des haies faible, les rendements sont de 30 à 50 % supérieurs par rapport au témoin (fig. 5).

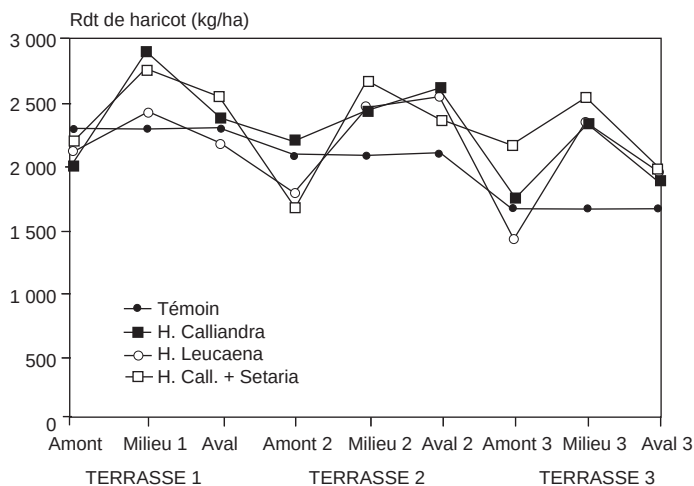


Figure 5

Incidence des haies d'arbustes sur les rendements du haricot à Rubona (saison 1992a).

En utilisant la matière organique et les engrais chimiques, et en réduisant l'effet négatif dû au décapage et à la concurrence des haies par une gestion rigoureuse, on pourrait probablement après 5 ans de bonne gestion de la biomasse produite par les haies améliorer progressivement les rendements si toutefois, les exportations par les récoltes n'augmentent pas aussi vite.

Les haies vives arbustives et les engrais chimiques

Les haies de *Leucaena* et *Calliandra* contribuent au recyclage des éléments nutritifs et à l'approvisionnement du système en C, N, et autres nutriments (fig. 6 et 7).

Mais les méthodes « biologiques » seules ne peuvent pas rétablir la fertilité des sols déjà dégradés : un apport minéral supplémentaire (P et souvent Ca, Mg et oligoéléments) est nécessaire (ROOSE *et al.*, 1992).

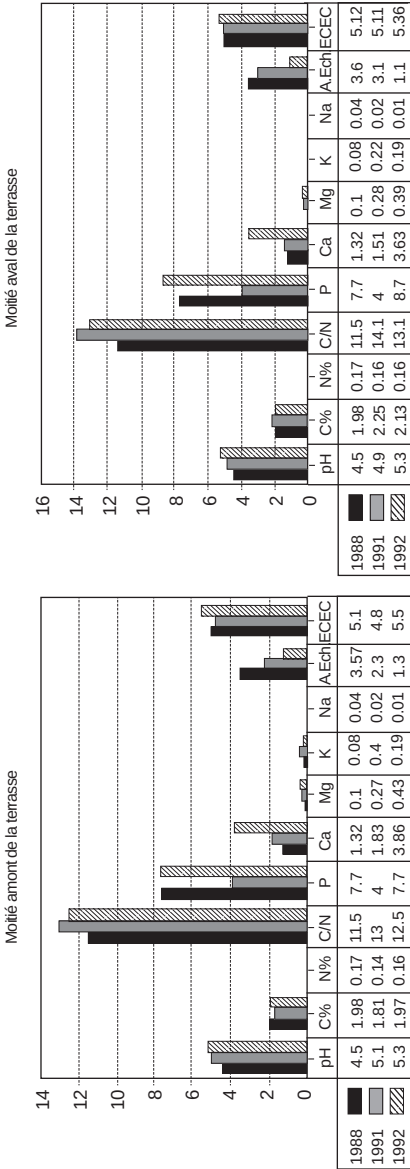


Figure 6
Évolution des propriétés chimiques du sol sur les parcelles aménagées avec des haies de *Calliandra*.

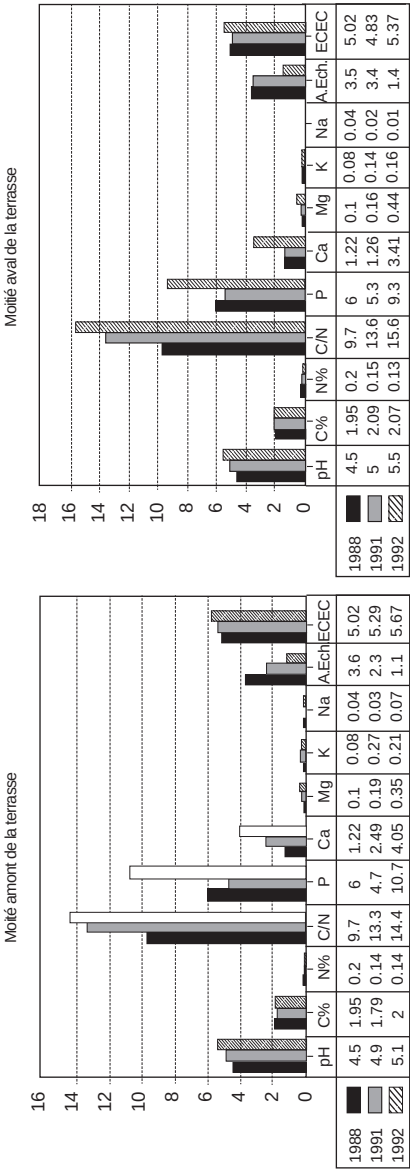


Figure 7
Évolution des propriétés chimiques du sol sur les parcelles aménagées avec des haies de *Leucaena*.

Une haie d'arbustes légumineux, comme *Calliandra* ou *Leucaena*, n'est pas seulement capable d'arrêter le ruissellement et l'érosion, mais elle est aussi très efficace en ce qui concerne la fixation d'azote atmosphérique et le recyclage des éléments nutritifs (voir tableau 1 plus haut). En plus, une fois installée sur 10 à 20 % de la superficie totale de la parcelle, elle peut produire presque autant de biomasse par hectare et par an que des engrais verts qui occupent toute la parcelle (18 à 25 tonnes/ha de matières fraîches) (KÖNIG, 1992). Néanmoins, une amélioration de la fertilité des sols déjà appauvris en éléments nutritifs ne peut pas être atteinte par des méthodes biologiques seules : sur ces sols pauvres, une application d'engrais minéraux est indispensable. La biomasse produite sur les haies vives servira alors de matière organique pour fixer les éléments chimiques de l'engrais minéral et les rendre disponibles pour les cultures.

Conclusions

Dans les conditions d'agriculture rwandaise, la lutte contre la dégradation des sols passe d'abord par la maîtrise de l'érosion et l'utilisation de la matière organique. La maîtrise de l'érosion peut être obtenue par plusieurs techniques (terrassement radical ou progressif) et méthodes culturales (billons, planches), mais l'utilisation de la matière organique reste une importante préoccupation. Il faut que l'agriculteur soit en mesure de la produire lui-même vu qu'il n'a pas les moyens financiers de les acheter ailleurs. Ainsi, l'intégration des haies vives d'arbres légumineux dans des systèmes de production vivriers permet non seulement de lutter contre l'érosion, mais aussi de produire de la matière organique. La quantité de biomasse produite va servir de matières organiques et permettre l'utilisation des engrais minéraux. Car ni le fumier ni le compost ou l'engrais vert seuls ne sont en mesure d'améliorer la fertilité du sol. Le recours à l'utilisation d'engrais minéraux est indispensable pour apporter les éléments qui manquent dans ces amendements organiques et pour compenser les pertes dues au lessivage et à l'exportation par les cultures. Ainsi, la maîtrise de l'érosion et la fertilisation tant organique que minérale constituent deux entités qui doivent aller de pair, si on veut accroître durablement la production des cultures.

Bibliographie

KÖNIG D., 1990 – Contribution des méthodes agroforestières à la lutte antiérosive au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 10 : 185-191.

KÖNIG D., 1992 – L'agriculture écologique agroforestière – une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, IRD, Montpellier, 12 : 130-139.

- KÖNIG D., 2007** – « Contribution de l'agroforesterie à la conservation de la fertilité des sols et à la lutte contre le réchauffement climatique au Rwanda ». Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007.
- LAL R., 1975** – *Role of mulching techniques in tropical soil & water management*. Technical Bull. n° 1, IITA, Ibadan, Nigeria, 38 p.
- MANNERING J., MEYER L., JOHNSON C., 1968** – Effect of cropping intensity on erosion and infiltration. *Agronomy J.*, 60 : 206-209.
- ROOSE E., 1975** – "Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas". In "Soil conditioners" SSSA Special publication n° 7, 12 : 131-137.
- MINISTÈRE DES FINANCES ET DE LA PLANIFICATION ÉCONOMIQUE (MINIFIN), 2002** – *Indicateurs du développement au Rwanda*. Kigali, 379 p.
- NDAYIZIGIYE F., 1993** – *La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols au Rwanda. Analyse des techniques antiérosives et de leurs effets sur la productivité des terres*. Thèse doct., Strasbourg, France, 235 p.
- ROOSE É., 1993** – *Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale*. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:38729>
- ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., SEKAYANGE L., 1992** – L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ? *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 327-349.
- ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1994** – « L'agroforesterie, la fertilisation minérale et la GCES au Rwanda : atteindre l'autosubsistance alimentaire dans une région de montagne tropicale à forte densité de population ». In Roose É. (éd.) : *Introduction à la GCES, Bull Pédologique Fao*, Rome, 70 (11) : 309-326.
- ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1996** – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.

Efficacité des haies mixtes, du fumier et du paillage pour la conservation de l'eau et la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique argileux acide du Burundi

Hervé DUCHAUFOR

Melchior BIZIMANA

Éric ROOSE

Canisius MIKOKORO

Introduction

La haie mixte de *Calliandra calothyrsus* et *Setaria sphacelata*, le fumier et le paillage partiel, disposés en courbes de niveau tous les 5 à 10 mètres, sont des solutions de gestion des eaux de surface et de la fertilité des sols ferrallitiques argileux acides fréquemment introduites au Burundi (KÖNIG, 1992). Les expérimentations en parcelles et les observations dans les champs paysans dans les collines schisteuses du Mumirwa ont montré que ces aménagements ne coûtent pas cher (1 000 m de haie ne demandent que 45 à 60 hommes jours/ha), mais réduisent énormément les problèmes de ruissellement ($K_r < 2\%$) et d'érosion ($E < 2$ t/ha) après 6 mois ou dès qu'on y a posé un filtre composé des déchets de labour ou des premiers produits de la taille. Mais ces aménagements qui consacrent 10 à 20 % de la surface cultivable à la production de feuilles (fourrage et paillage) et de petit bois (4 tailles par an) sont-ils acceptables par les petits

paysans qui, sur des surfaces exiguës (0,5 à 2 ha), doivent produire leur nourriture et le financement de l'école, de la santé et des réjouissances sociales d'une famille de 5 à 10 personnes ? Une analyse statistique multidimensionnelle des résultats disponibles (hiérarchisation AFC) a montré que les aménagements biologiques se situent parmi les techniques antiérosives qui assurent le meilleur équilibre entre la protection du capital sol et la production végétale (SIMONART *et al.*, 1994).

Durant trois campagnes, on a comparé le ruissellement, l'érosion, la production de biomasse des haies et des cultures (manioc sur buttes isohypses, puis maïs en rotation avec les haricots sur buttes traditionnelles) après une forte fumure de redressement de 100 t/ha de fumier bovin frais sur des parcelles d'érosion de 200 m², 20 m de long, 28 % de pente sur un sol ferrallitique argileux humifère profond et acide de la commune de Rushubi, à 1 650 m d'altitude, recevant 1 600 mm de pluies en deux saisons culturales, avec une température moyenne annuelle de 16 °C.

Les risques érosifs

Les résultats les plus intéressants ont montré que :

- les pluies ont varié de 1 362 à 1 597 mm pour un indice d'érosivité de 400 à 550 (WISCHMEIER et SMITH, 1978) ;
- sur la parcelle témoin, nue et labourée, le ruissellement a varié de 10 à 16 %, l'érosion de 450 à 800 t/ha/an et l'érodibilité du sol autour de $K = 0,10$: ces sols acides argileux (kaolinite) humifères sur 35 cm sont donc très résistants à la battance des pluies ;
- sous culture de manioc sur billons isohypses, la première année, le ruissellement est passé de 2,7 % (si 2 haies vives jeunes) à 1,7 % (si paillage léger) et l'érosion de 12 t (2 haies jeunes) à 3-9 t/ha/an (si paillis léger couvrant tout ou seulement 2 bandes de 2 m de large) ;
- sous manioc, la seconde année, le ruissellement (0,6 à 1,1 %) et l'érosion ont été négligeables ($< 0,1$ t/ha/an) quel que soit le traitement, car le manioc recouvre bien la totalité des parcelles (effet de la fumure). Si on compare ces parcelles cultivées au témoin nu, on observe que le paillage, même partiel, est aussi efficace que les deux haies vives pour maîtriser le ruissellement et l'érosion, mais on ne peut évaluer l'influence de la fumure de fond sur toutes les parcelles avant plantation. On confirme l'intérêt du paillage partiel pour protéger les propriétés physiques du sol (infiltration, stabilité structurale et érodibilité). Par contre, le billonnage en courbe de niveau et surtout le couvert de la litière et de la culture de manioc ont réduit le ruissellement (1/8) et surtout l'érosion (de 600 à moins de 0,1 à 12 t/ha/an). Le billonnage en courbe de niveau a stocké la majorité du refus à l'infiltration sauf durant les pluies extrêmes où eurent lieu quelques débordements en absence de paillis ;

– lors des cycles culturaux suivants (maïs suivi du haricot), le manioc n'a laissé aucun résidu, donc il ne reste pas de paillis : on n'a observé aucun arrière-effet de la fumure de redressement, ni du paillage initial enfoui lors du labour. La couverture du sol par le maïs et les haricots a été moins efficace que le manioc sur le ruissellement ($K_r = 6$ à 10% , contre 10% sur le témoin) et l'érosion (72 à 156 t/ha/an contre 729 t/ha/an sur témoin nu). Les haies ont été moins efficaces, car le *Setaria* a quasi disparu et a dû être renouvelé, ce qui confirme les observations de KÖNIG (chap. 46) au Rwanda. Sur sol riche amendé, le *Setaria* produit rapidement un excellent filtre, mais sur sol lessivé et appauvri, les touffes s'étiolent au bout de deux ans, deviennent moins efficaces et concurrencent beaucoup les cultures. L'étalement de la biomasse des cinq coupes sur des bandes de deux mètres à l'aval des talus/haies a réduit considérablement l'érosion pendant un mois, mais ensuite la rapide biodégradation de cette litière foliaire a réduit son efficacité lors des fortes pluies.



Bananeraie avec sous-étage de haricots aménagée en terrasse progressive avec des haies alternées de *Setaria* et de *Calliandra*.

© H. Duchaufour

La production de biomasse

La production de biomasse du *Setaria* atteint 5 puis 12 kg/10 m/semaine, avant de chuter rapidement à $0,4$ kg/10 m/semaine au bout d'un an quand le manioc recouvre le terrain. En 18 mois, la production de fourrage atteint $15,6$ t/ha/an. Mais après replantation, la production, ne profitant plus des apports du fumier,

ne dépasse pas 0,8 kg/10 m/semaine, soit 3,2 t/ha/an. De plus, les souches affaiblies sur sol épuisé n'arrêtent plus aussi bien le ruissellement ni les sédiments lors des fortes averses.

La production de feuilles sur *Calliandra* est beaucoup plus constante (0,65 kg/10 m/semaine, soit 3,64 t/1 000 m/ha/an) et ne semble pas souffrir de l'appauvrissement du sol (il puise ses nutriments plus bas dans le sol et l'azote dans l'air), ni de l'ombrage des cultures associées. La production de petit bois sur *Calliandra* s'élève à 3,7 t/1 000 m/ha/an, si on compte une haie tous les dix mètres.

La production du manioc après fumier s'élève à 35,3 t/ha/2 ans en présence de haies vives, contre 32,7 t/ha si paillage partiel. Par contre, sous maïs, la production de grain et de paille est 20 % plus faible, si 2 haies vives (Rdt grain = 2,7 contre 3,45 t/ha sous paillis et Rdt paille = 10,3 contre 12,8 t/ha/an), car la surface cultivée est plus petite et on peut observer une concurrence entre la haie et les cultures en aval.

De même sous haricot, les rendements en grain sont 35 % plus faibles en cas de haie vive sur sol épuisé (Rdt = 0,51 si haies contre 0,79 t/ha) sous technique traditionnelle.

Tant que les deux systèmes de culture et de haies ne sont pas en compétition nutritionnelle, la production vivrière en couloir peut s'avérer plus performante que sur parcelle non aménagée. Mais à mesure que le sol s'épuise en nutriments, en particulier après un cycle de manioc sur sol acide (fin de l'arrière-effet de la fumure de redressement), la concurrence nutritionnelle et hydrique entre les deux réseaux racinaires apparaît plus importante que les bénéfices des apports nutritifs par atterrissement (par érosion et labour). Aussi, la production des deux lignes de maïs et haricots à l'aval de la haie est nettement plus faible que celle des lignes plus distantes. En effet, on n'a apporté aucune compensation minérale aux exportations, ni irrigation : cet inconvénient peut être levé, si on tranche les racines à moins de 50 cm de la haie dès le début de la croissance (ROOSE, 1994). Cette perte de production vivrière n'est pas obligatoirement économiquement désavantageuse, si on tient compte des bénéfices à long terme de la conservation du capital sol et de la production foliaire et ligneuse des haies : bois de feu, tuteurs, fourrages, paillage des caféiers ou des cultures vivrières.

Évolution des propriétés du sol

La littérature (ROOSE et BERTRAND, 1986 ; KÖNIG, 1992 ; NDAYIZIGIYE *et al.*, 1993 ; SIMONART *et al.*, 1994 ; NAIR, 1993) insiste beaucoup sur l'amélioration qualitative du sol par les aménagements biologiques. Effectivement, ceux-ci réduisent efficacement le ruissellement et les pertes en terre et participent à la formation de terrasses progressives (talus supérieurs à 70 cm en 4 ans), à la

réduction de la pente (de 28 à 20 %), et à la culture en courbe de niveau : donc les haies réduisent les pertes en nutriments et apportent dans les émondes jusqu'à 110 kg de N, 10 kg de phosphore et 40 kg de K, de Ca et de Mg (NDAYIZIGIYE *et al.*, 1993 ; KÖNIG, 1992). Par contre, les dépôts de sédiments à l'amont des haies ne sont pas plus riches que la terre initiale (ce qui est normal puisqu'il s'agit d'une érosion aratoire essentiellement et pas d'une érosion en nappe sélective). Les effets de la fumure de fond (100 t de fumier/ha) ont disparu après trois ans, en particulier la potasse, élément très mobile. On observe une forte dégradation du pH avec une élévation de l'indice Ik de Kamprath, la diminution du phosphore et du taux de la saturation en bases. Après le cycle de manioc, la culture de maïs et haricot sans apport de nutriments a perdu 20 à 35 % de sa production à cause des haies qui réduisent la surface cultivée en vivrier, mais aussi à cause du décapage de l'horizon humifère par le labour au pied des talus : les deux premiers rangs de maïs à l'aval sont visiblement moins bien développés. Si on ne peut fertiliser partout, c'est donc là qu'il faut intervenir pour soutenir la productivité du sol (paillage, fumier, compost).

La haie vive est donc une bonne barrière physique qui infiltre les eaux et retient la terre (ce qui implique donc une accumulation volumétrique du sol), mais sans concentration de nutriments (vu l'exportation de la biomasse et le lessivage par le drainage). À moyen terme, la formation de talus entraîne l'appauvrissement du haut des pentes fortes et l'enrichissement des parties aval des parcelles et les vallons. La biodégradation des produits de la haie durant les trois années de suivi n'a pas vraiment amélioré le sol, pas même à l'amont de la haie où on a étalé une partie des émondes (sauf qu'il est plus profond et stocke plus d'eau), car les feuilles minéralisent très vite (en un mois) et les bois sont exportés. Par contre, les champs ne montrent aucune trace de dégradation avancée (ni rigole ni décapage de l'horizon humifère), comme on en voit sur les parcelles traditionnellement labourées.

Conclusions

1. La méthode des tests en parcelles d'érosion a bien montré les risques de ruissellement relativement faibles sur forte pente (Kr de 2 à 16 %), mais des pertes en terre impressionnantes sur sol nu (400 à 800 t/ha/an) et même sous cultures (E de 1 à 160 t/ha/an), et très variables en fonction du couvert végétal et de la pluviosité. L'érosion est non sélective (érosion en rigole et surtout aratoire).
2. La fumure de fond a sans doute réduit l'érosion en favorisant le développement du manioc (35 t/ha sur sol acide), mais son effet sur l'érosion, le rendement des cultures et la fertilité du sol acide devient très faible au bout de deux ans, si aucune fumure d'entretien n'est pratiquée. En région tropicale où la

minéralisation des MO est très rapide, il vaut mieux répartir la fumure sur plusieurs années (fractionnement des apports entre chaque rotation) plutôt que tout concentrer en début de cycle.

3. Le paillage léger, même incomplet (déchets de labour et émondes produits de la coupe des haies), a bien réduit l'érosion pendant un mois, après quoi, le feuillage disparaît de la surface du sol par biodégradation et minéralisation : il faudra choisir entre divers modes de valorisation des feuilles soit comme fourrage (et retour du fumier), soit comme paillage. On peut penser que le produit du sarclage posé sur le sol entre les rangs de culture peut aussi jouer un rôle temporaire non négligeable sur l'infiltration et la protection contre l'érosion.

4. La haie mixte a été très efficace pour infiltrer le ruissellement, protéger la terre et accumuler un talus de 70 cm en trois ans. L'herbe (*Setaria*) a très vite assuré son rôle de freinage du ruissellement, mais les touffes ont disparu au bout de deux ans quand le manioc a recouvert toute la parcelle et que le sol fut épuisé. D'après KÖNIG (1992), il vaut mieux éviter de doubler la haie d'arbustes légumineuses (*Calliandra*) par des lignes d'herbes qui épuisent le sol et concurrencent fortement la culture et les arbustes. La restitution de la biomasse produite par les haies n'a permis d'améliorer ni les rendements des cultures de maïs et haricots ni la fertilité du sol. En présence de sol fertile, la haie ne provoque pas beaucoup de concurrence (4 à 5 coupes/an), mais n'améliore pas vraiment le sol qui s'accumule en amont (sédimentation non sélective). En revanche dans sa partie aval, l'érosion aratoire attaque le talus et dégrade la productivité des terres. Cependant, la protection du capital sol, la stabilisation du paysage et la production annuelle de 1 000 m linéaires/ha de biomasse fourragère (15 t de *Setaria* + 3,4 t de *Calliandra*) et de bois de feu (3,7 t) peuvent compenser la perte de production vivrière. En cas de sol pauvre, la production de *Setaria* est dix fois plus faible et la protection du sol est nettement moins bonne. Il faut donc prévoir une fertilisation organique et minérale complémentaire pour stabiliser ou intensifier ce système de production. Il est difficile d'assurer une production équilibrée entre haie et cultures vivrières, vu la concurrence aérienne et souterraine (lumineuse, nutritionnelle et hydrique) : il faut donc prévoir 4 à 5 tailles/an de la haie, un labour profond de chaque côté des arbustes pour cerner les racines et réduire ces concurrences et une fumure organique et minérale complémentaire. Les haies et autres micro-barrages perméables permettent au moins de valoriser l'investissement en fumure (KÖNIG, 1992)

5. Ces résultats montrent bien les difficultés de l'introduction du système « haies vives et paillage incomplet + rotations intensives avec légumineuses + élevage fournisseur de fumier » dans des communautés rurales vivant sur des sols acides ou appauvris. Les haies d'arbustes légumineuses demeurent cependant performantes lorsqu'il s'agit d'intensifier le développement économique, tout en stabilisant les exploitations d'un terroir.

Bibliographie

- BIZIMANA M., DUCHAUFOUR H., 2012** – « Avantages et inconvénients de la Haie mixte *Calliandra/Setaria* comme dispositif antiérosif en milieu rural Burundais. Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles » In Roose É. (éd.) : Cdrom, Marseille, IRD Éditions.
- DUCHAUFOUR H., BIZIMANA M., 1992** – Restauration de la fertilité des sols et conservation des eaux en régions montagneuses du Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 161-178.
- KÖNIG D., 1992** – Agriculture écologique agroforestière : une stratégie intégrée de conservation de la fertilité des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 130-139.
- NAÏR P., 1993** – *Introduction to agroforestry*. Icrاف, Kluwer Acad. Publisher, 499 p.
- NDAYIZIGIYE F., ROOSE É., SEKAYANGE L., 1993** – L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ? *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 327-351.
- PENNES J. M., 1991** – « Rôle des techniques agroforestières dans le maintien et la restauration de la fertilité des sols ». Séminaire Bujumbura, programme fertilité des sols de l'Isabu : 229-238.
- ROOSE É., 1994** – Introduction à la GCES. *Bull. FAO des sols*, Rome, 70, 420 p.
- ROOSE É., BERTRAND R., 1986** – Terrasses de diversion ou micro-barrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (2) : 197-208.
- ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., NYAMULINDA V., BYIRINGIRO E., 1988** – La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES), une nouvelle stratégie de lutte antiérosive pour le Rwanda. *Bull. Agricole du Rwanda*, 21 (4) : 264-277 et *Bull. Réseau Érosion*, 12 (1992) : 140-160.
- SIMONART T., DUCHAUFOUR H., BIZIMANA M., MIKOKORO C., 1994** – Hiérarchisation des stratégies antiérosives en milieu paysan burundais. *Cahiers d'Outre-mer*, 185 et *Revue de Géographie de Bordeaux* : 49-64.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1978** – An universal soil – loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7th Int. Congress of Soil Science*, 1 : 418-425.

Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda

Dieter KÖNIG

Introduction

Au Rwanda, pays tropical montagneux au cœur de l'Afrique avec une population de 12 millions d'habitants sur 26 338 km², la densité de la population dépasse 1 000 hab./km² dans des régions agroécologiques favorisées. Dans ces régions, la superficie médiane des exploitations agricoles est inférieure à 0,5 ha. Il en résulte une surexploitation et une dégradation rapide des sols, qui sont menacés par une érosion accélérée sur des pentes raides de ce « pays aux mille collines ».

Dans ce contexte, des méthodes biologiques pour la conservation des sols qui ont été examinées depuis 1985 sont une alternative prometteuse aux systèmes mécaniques proposées par le gouvernement rwandais pendant les dernières décennies (fossés antiérosifs, terrasses radicales). L'agriculture écologique agroforestière (comme la GCES) essaie de lutter par une approche intégrale du problème, contre l'érosion des sols et contre la dégradation de sa fertilité. Elle a pour but la régénération et la stabilisation de la fertilité du sol dans un système de production bien adapté aux conditions écologiques et humaines de la région. Ses méthodes se ramènent à des expériences paysannes autochtones dans des régions d'Afrique densément peuplées, ses éléments principaux sont (KÖNIG, 1992) :

- l'intégration des arbres et des haies dans les parcelles de cultures (agroforesterie) ;
- la mise en place de cultures associées multi-étagères (p. ex. : maïs, haricots, manioc et patates douces cultivés simultanément dans la même saison) ;



Paysage de collines cultivées aménagées en terrasses progressives : talus protégés par des herbes fourragères ou des buissons de légumineuses. L'habitat (rugo) est dispersé sur des pentes fixées par des arbres. Les bas-fonds sont aménagés en rizière ou en planches drainées

© D. König

- la substitution de la jachère par l'emploi d'engrais verts ;
- l'intégration de l'élevage dans le système de culture (stabulation permanente) ;
- le recyclage de la biomasse dans un cycle aussi fermé que possible ;
- l'intégration de la conservation des sols par une bonne couverture du sol (haies vives isohypses, paillage, cultures associées multi-étagères, etc.).

Site et méthodes

Les expériences ont été faites près de Butare au sud du plateau central rwandais sur un sol ferrallitique fortement dégradé, très acide ($\text{pH} = 4$) et pauvre en éléments nutritifs. Le milieu tropical de montagne peut être caractérisé par une altitude de 1 700 m, des précipitations annuelles moyennes bimodales de 1 280 mm en dix mois et une température annuelle moyenne de 20 °C.

Sur une pente de 28 %, huit parcelles d'érosion de 100 m² ont été cultivées selon les méthodes de l'agriculture écologique agroforestière décrites ci-dessus qui essaient de lutter contre l'érosion des sols et la dégradation de sa fertilité



Talu de moins de deux mètres stabilisé par une haie de légumineuses arbustives (Calliandra ou Leucaena) et par des légumineuses rampantes ou diverses adventices. Station de Butare, Rwanda.
© D. König

par une approche globale. Elle a pour but la régénération et la stabilisation de la fertilité du sol dans un système de production bien adapté aux conditions écologiques et humaines de la région.

Résultats et discussion

Érosion et conservation des sols

Malgré une érosivité des pluies (un facteur R moyen de 350 d'après Wischmeier et Smith, 1978) et un ruissellement relativement faibles (2 à 15 %), on a constaté une érosion énorme sur les parcelles non protégées : 440 t/ha/an sur sol nu

et 226 t/ha/an sous manioc sur une pente de 28 %. Dans ces conditions, l'intégration des arbres et surtout des haies de *Calliandra calothyrsus* permet une réduction de l'érosion et des pertes en matières organiques et en éléments nutritifs, à un niveau d'érosion « tolérable » (1 à 3 % des valeurs initiales, voir fig. 1, qui présente les résultats des trois dernières années de mesure.). Des résultats comparables (120 à 250 t/ha/an sous cultures non protégées, 1 à 2 t/ha/an sur parcelles protégées par des haies vives) ont été obtenus à Rubona, à une distance de 15 km de Butare (ROOSE *et al.*, 1993 ; ROOSE et NDAYIZIGIYE, 1996). La seule introduction des arbres et des cultures associées (maïs ou sorgho, haricots ou soja, manioc, patates douces) ne suffit pas à réduire les pertes de terre à un niveau acceptable ($E = 57$ t/ha/an sous *Grevillea*). Seule l'intégration des haies d'arbustes légumineuses fait de l'agroforesterie un système de production valable en vue de la conservation du sol. Grâce au développement rapide des haies de *Calliandra calothyrsus*, l'érosion a été réduite à moins de 12 t/ha/an depuis la deuxième saison après leur plantation et à moins de 3 t/ha/an depuis la cinquième année après la plantation, c'est-à-dire à moins de 1,5 % des pertes sur la parcelle témoin cultivée de façon traditionnelle.

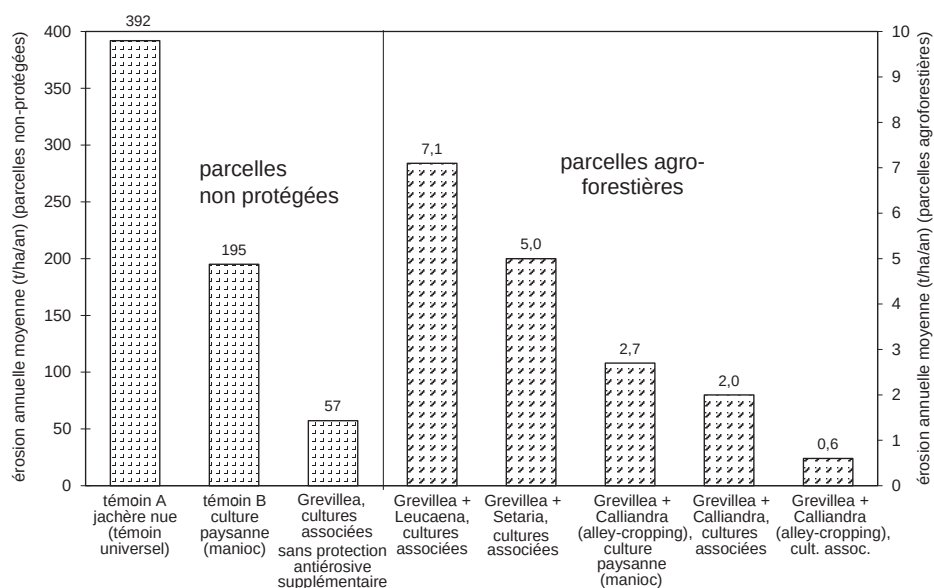


Figure 1
Érosion moyenne annuelle mesurée sur parcelles d'érosion de 100 m²
de la 6^e à la 8^e année après l'installation des parcelles et du système
agroforestier (Pasi, Butare 1991-1992 à 1993-1994).

Les résultats les plus encourageants (une réduction durable de l'érosion à 0,3 % des pertes mesurées sur la parcelle cultivée avec du manioc) ont été obtenus par la méthode de culture en couloir entre deux haies de *Calliandra calothyrsus* plantées sur des micro-terrasses d'une largeur de 0,5 m, à un écartement de 5 m.

Les lignes d'herbes, qui sont les plus efficaces pendant les deux premières années, perdent leur efficacité et disparaissent après quelques années. Par contre, les haies de *Calliandra* pur, une fois installées (2 ans), sont toujours très efficaces, même 20 ans après leur plantation.

Production de biomasse et séquestration du carbone

Par l'intégration des arbres et des arbustes dans le système de production agricole, l'agroforesterie permet une forte production de biomasse, même sur des sites dégradés. Puisqu'il existe très peu d'expériences sur l'intégration d'autres arbres que *Grevillea robusta* dans des systèmes agroforestiers, 32 espèces d'arbres ont été plantées en novembre 1985. À Butare, des relevés dendrométriques qui ont été faits à maintes reprises montrent que les meilleurs résultats ont été obtenus avec les arbres autochtones *Maesopsis eminii* et *Polyscias fulva* (fig. 2). Alors que les arbres exotiques (p. ex. *Grevillea robusta*, *Cedrela serrata*) ont une bonne croissance initiale, les espèces autochtones sont – à la longue – plus productives et concurrencent moins les cultures vivrières. Après 25 ans, les espèces autochtones les plus adaptées au site, *Maesopsis* et *Polyscias*, ont une hauteur moyenne de 23 et 20 m et un diamètre moyen de 34,5 et 34 cm respectivement pendant que les arbres exotiques les plus prometteurs, *Grevillea* et *Cedrela*, montrent une hauteur de 22 et 21 mètres et un diamètre de 26,5 et de 28 centimètres respectivement.

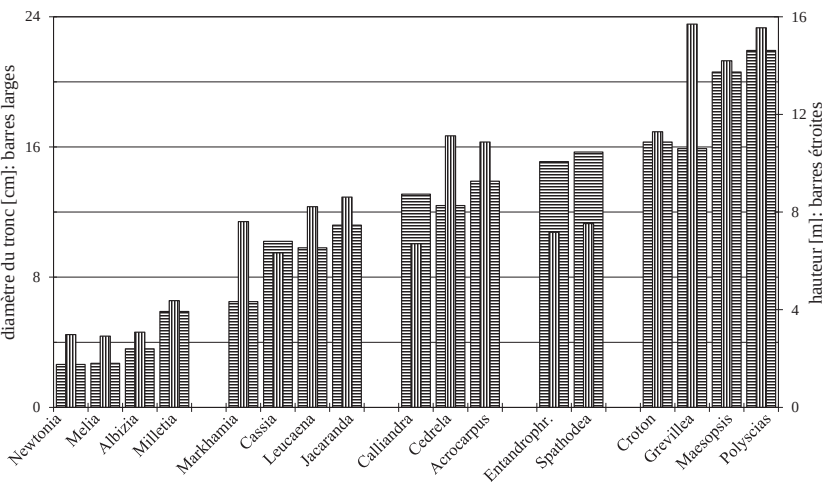


Figure 2
Diamètre moyen et hauteur moyenne des arbres de 10 ans sur le terrain d'expérimentation du Pasi ; le choix se limite aux espèces à forte présence au Rwanda.

La production élevée des arbres garantit une séquestration du carbone importante surtout dans le bois. La transformation d'une parcelle agricole en système agroforestier permet une séquestration durable de l'ordre de 10 à 20 tonnes de carbone par hectare dans la biomasse superficielle (chiffres approximatifs pour

les meilleures espèces d'arbres *Maesopsis eminii* et *Polyscias fulva*), ce qui correspond à 35-70 t de CO₂/ha. Dans cette estimation l'auteur ne considère pas les changements probables des teneurs en matière organique dans le sol, ni l'effet sur le bilan du carbone causé par la production du bois de chauffage sur place (qui s'élevait à environ 2-4 t de carbone par hectare et par an pour les meilleures espèces), ce qui contribue significativement à une réduction de la dégradation des forêts avoisinantes. Les premiers résultats montrent qu'il n'y a pas de changements significatifs du C dans le sol ; au lieu d'une augmentation



Parcelle agroforestière de plus de 20 ans, comprenant une culture de haricots, une haie de *Calliandra*, une plantation de *Polycias* taillée en têtard.

© D. König



Parcelle d'Eucalyptus plantés très serrés dont le sol a perdu 20 cm de terre, laissant les racines superficielles à l'air. Station de Butare, Rwanda.

© D.König

des MO nous observons même une tendance à sa dégradation probablement liée aux termites qui sont très abondants sur notre terrain d'expérimentation et qui mangent la MO.

En ce qui concerne l'intégration des arbustes, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des haies doubles de *Calliandra calothyrsus* plantées sur des terrassettes de 50 cm de large, à un écartement de 5 m. Cela permet de produire jusqu'à 24 tonnes de biomasse par hectare et par an, dont 15 tonnes de feuilles, qui donnent un fourrage excellent. Les feuilles produites dans une haie de *Calliandra* (longueur = 2 000 m par hectare) coupée trois fois par an contiennent jusqu'à 105 kg de N, 4 kg de P et 21 kg de K, 30 kg de Ca et 20 kg de Mg.

La production de *Leucaena leucocephala* est inférieure à celle de *Calliandra*, qui est mieux adaptée aux sols acides et aux hautes altitudes. Ces remontées biologiques de nutriments sont du même ordre de grandeur que celles observées à Rubona (ROOSE et NDAYIZIGIYE, 1996).

Malgré leur forte croissance initiale, les herbes produisent beaucoup moins de biomasse que les arbustes. Cinq ans après leur plantation, les lignes d'herbes antiérosives (avec *Pennisetum purpureum* ou *Setaria splendida*) sont fortement dégradées, tandis que les haies arbustives restent très productives pendant plus de vingt ans.

L'association « arbres + herbes » dans des « lignes antiérosives » est à déconseiller. En effet, la concurrence entre les herbes, les cultures vivrières et les arbres est importante, surtout quand ces lignes d'herbes sont composées des espèces à croissance rapide comme *Pennisetum purpureum* ou *Tripsacum fasciculatum*. Il en résulte une croissance tardive des arbres et une forte diminution de leur production de biomasse. Même après la baisse de productivité des lignes d'herbes et la disparition de la majeure partie des rhizomes d'herbacées, la croissance des arbres continue à souffrir du manque d'éléments nutritifs. Ce résultat souligne l'importance d'études à long terme. L'intégration de lignes d'herbes dans les systèmes agroforestiers est souvent conseillée et justifiée en raison de son effet antiérosif et de la production de biomasse supérieure les premières années. La baisse de la productivité et de l'effet conservatoire reste souvent méconnue, car la période d'observation des travaux de recherche est souvent limitée à moins de trois ans.

Fertilité des sols et rendements des cultures

L'agriculture écologique agroforestière permet une production durable ; elle garantit la sauvegarde de la fertilité du sol à long terme. Les arbres et les haies de légumineuses contribuent au recyclage des éléments nutritifs et à l'approvisionnement du système en carbone, azote, cations et phosphore. Par le compostage, la haute production en biomasse du système agroforestier peut être valorisée pour améliorer la production végétale. Le coût en heures de travail est énorme, mais n'a pas été quantifié (transport, hachage et humectation des tas de biomasse). L'application du compost est la seule mesure qui permet d'avoir une récolte significative sur notre terrain très fortement dégradé.

Cependant, les méthodes « biologiques » seules ne peuvent pas rétablir la fertilité d'un site déjà dégradé : un apport minéral supplémentaire (P et souvent Ca, Mg et oligoéléments) semble nécessaire au démarrage des légumineuses. Ce résultat a été confirmé par les expériences de Ndayizigiye à Rubona (ROOSE *et al.*, 1993). La valorisation de la biomasse produite dans des systèmes agroforestiers est difficile. Selon nos expériences, la technique de l'engrais vert (*Tephrosia vogelii*, *Sesbania sesban* et *Sesbania macrantha*, diverses espèces de *Crotalaria*) n'a pas la capacité de régénérer des sols dégradés. Malgré une production de biomasse de 18 à 25 tonnes par hectare, un engrais vert installé sans fumure améliorante (N et surtout phosphore, chaux) reste souvent sans influence significative sur la croissance des cultures qui suivent. La fixation d'azote des légumineuses est entravée par les carences en éléments nutritifs (en particulier, le phosphore) rencontrées dans ces sols très acides ; la reprise trop lente des engrais verts traditionnels a eu pour conséquence de fortes pertes de sol

Une alternative beaucoup plus prometteuse aux engrais verts est le système de culture en couloir (*alley-cropping*) qui est un système de jachère simultanée. Une haie isohypse de *Calliandra* ou de *Leucaena* – une fois installée sur 10 à 20 % de la superficie totale de la parcelle – peut produire presque autant de biomasse par hectare et par an que des engrais verts qui occupent toute la parcelle. Une haie arbustive de légumineuses n'est pas seulement plus facile à entretenir, mais aussi beaucoup plus efficace en ce qui concerne la fixation d'azote et le recyclage des éléments nutritifs.

Contrairement à ce que laisse supposer la plupart des définitions de l'agroforesterie, l'intégration d'arbres et des arbustes dans les parcelles cultivées n'a pas uniquement des effets synergiques positifs. Selon l'espèce d'arbre, la densité de la plantation, la nature et la fréquence des mesures d'entretien (coupe des racines, élagage), l'âge et la largeur, l'écart, la fréquence et la date des coupes des haies, apparaissent des effets de concurrence qui influencent la croissance des cultures en sous-étage. Cette énumération montre que les effets dépendent d'une multitude de facteurs et que vouloir saisir l'ensemble de leurs influences est pratiquement impossible. Les différences liées à l'espèce peuvent être compensées par des mesures d'entretien adéquates ; négliger de telles mesures peut entraîner des pertes totales de récoltes dans les cultures en sous-étage.

Les résultats des études concernant l'influence des différentes espèces d'arbres sur le rendement des cultures en sous-étage montrent des effets de concurrence qui sont remarquables jusqu'à une grande distance du tronc et qui varient beaucoup entre différentes espèces. Les arbres autochtones *Polyscias* et *Maesopsis* montrent, déjà à une distance de 60 cm de la rangée d'arbres, un niveau du rendement supérieur à celui de la parcelle témoin. Par contre, pour les deux espèces exotiques *Cedrela* et *Grevillea*, les effets négatifs sur les récoltes sont remarquables jusqu'à une distance de 1,5 et de 2,5 mètres du tronc respectivement. Pour *Croton megalocarpus*, arbre autochtone des savanes de l'est du Rwanda, les effets de concurrence racinaire sont encore plus accentués, pendant qu'ils sont négligeables sous *Entandophragma excelsum*, espèce de la forêt de

Nyungwe à croissance lente fournissant un bois de haute qualité. Néanmoins, les effets synergiques sont capables de compenser les effets de concurrence : à l'exception du *Grevillea* (même rendement) et de *Polyscias* (augmentation du rendement de 55 %), le rendement des cultures sur des parcelles agroforestières a été légèrement supérieur à celui enregistré sur les parcelles témoins.

Après dix ans d'agroforesterie et d'agriculture écologique (culture associée, application du compost et des engrais verts), nous avons constaté une augmentation du pH (de 4,1 à 4,35) et des éléments nutritifs P (+ 54 %), K (+ 18 %), Ca (+ 219 %) et Mg (+ 24 %) dans le sol superficiel (0-30 cm), pendant que les teneurs en matière organique et en azote ont été réduites de 18 % et de 20 % respectivement – avec des différences significatives entre les différentes espèces d'arbres. La matière organique apportée dans le système par la chute de feuilles d'arbres et par le compostage est donc complètement reminéralisée suite à la forte activité des termites. Les méthodes de l'agriculture écologique agroforestière seules peuvent contribuer à ralentir la vitesse de dégradation. Pour arriver à une intensification de la productivité des sols déjà fortement appauvris en éléments nutritifs, un complément d'engrais minéraux semble indispensable.

Apport de travertin et de cendres volcaniques

Pour compenser les pertes en éléments nutritifs dues à une longue histoire de dégradation du site d'expérimentation, des roches volcaniques en poudre, du

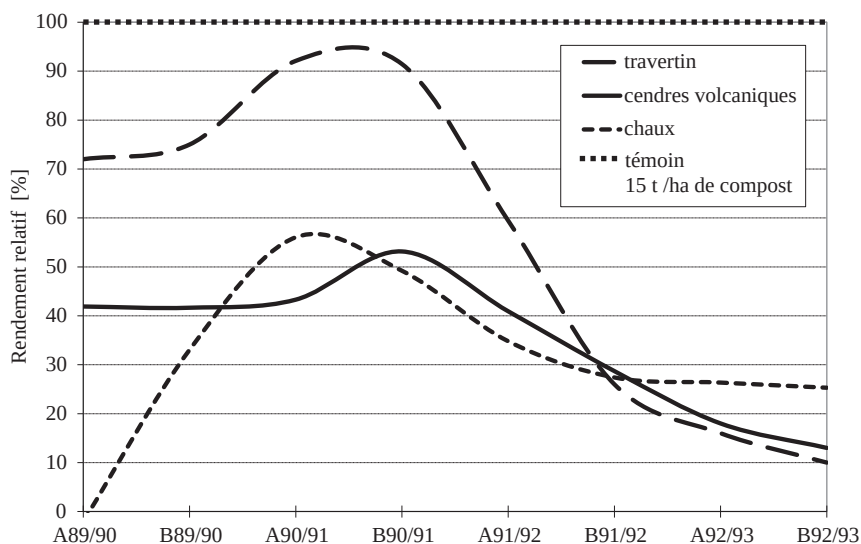


Figure 3

Développement des rendements relatifs sur des parcelles traitées par l'apport de 15 tonnes de compost (le témoin produisant 100 %) et différentes roches en poudre (application unique de 2,5 t/ha de travertin, des cendres volcaniques en poudre ou de chaux en 1989) pendant les 8 saisons de culture suivant l'application (HARTMANN, 1993).

travertin et de la chaux brûlée ont été appliqués sur des parcelles agroforestières en 1989. La figure 3 donne des renseignements sur le développement des rendements des cultures saisonnières pendant huit saisons après l'application de 2,5 tonnes de roches en poudre par hectare.

La figure 3 montre qu'une application du travertin est une mesure efficace pour améliorer la fertilité du sol et que son effet est de loin supérieur à celui de la chaux. Malgré sa production qui consomme beaucoup d'énergie et malgré ses effets négatifs sur le sol, qui ont mené à une légère baisse du rendement dans la première saison, le chaulage est très souvent utilisé dans l'agriculture. À la suite des expériences faites à Butare, l'auteur propose de remplacer le chaulage par une application de cendres volcaniques, une ressource locale aussi efficace que la chaux. Si disponible, une application supplémentaire du travertin pourrait contribuer à une amélioration ultérieure du rendement des cultures. Finalement, il faut constater que ces résultats ont été obtenus sur des parcelles bien protégées contre l'érosion, condition essentielle sans laquelle la plupart des efforts pour une amélioration de la productivité sont vains.

Conclusions

L'agriculture écologique agroforestière représente une stratégie efficace pour la gestion durable de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). L'intégration des arbres (spécialement des espèces autochtones) et surtout l'intégration des haies de légumineuses arbustives dans des systèmes de production vivrière permettent à la fois de sauvegarder la fertilité du sol, de nourrir et de couvrir le besoin en bois d'une population croissante de la superficie agricole. En plus, elle contribue à une réduction de la dégradation des sols hors de la surface cultivée et à une séquestration du carbone importante surtout au-dessus du sol.

Néanmoins, une amélioration des sols déjà fortement dégradés et appauvris en éléments nutritifs ne peut pas être atteinte sans fumure minérale complémentaire (en particulier, du phosphore et des bases). Compte tenu des ressources très limitées du pays en engrais minéraux, la conservation des sols une fois améliorés et surtout la sauvegarde de la fertilité des sols toujours productifs par des méthodes biologiques et le recours à des ressources minérales locales (cendres volcaniques et travertin pulvérisés) sont indispensables.

Bibliographie

HARTMANN M., 1993 – *Möglichkeiten und Grenzen der Bodenverbesserung auf degradierten Standorten in den Feuchttropen durch Kalkung und Anwendung vulkanischer Aschen - dargestellt am Beispiel Rwanda*. Thèse de diplôme en géographie, Mayence.

KÖNIG D., 1992 – L'agriculture écologique agroforestière - une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, IRD, Montpellier, 12 : 130-139.

NDAYIZIGIYE F., 1993 – *La GCES au Rwanda. Analyse des techniques antiérosives et de leurs effets sur la productivité des terres*. Thèse doct. géographie physique, univ. Strasbourg, 235 p.

ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., SEKANYANGE L., 1993 – L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ? *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 327-349.

ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1996 – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.

WISCHMEIER W., SMITH D., 1978 – *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Washington USDA, Agricultural Handbook, 537, 58 p.

Lutte antiérosive et intensification de l'agriculture en milieu steppique (Boughezoul, Algérie)

Mourad ARABI

Lakhdar BOURUGAA

Oum El kir KEDAID

Introduction

En Algérie, les zones de montagne, de steppe et de parcours sont les plus touchées par les phénomènes de dégradation. La déforestation, le surpâturage, la mise en culture des terres pentues et la minéralisation des matières organiques du sol sont les principaux facteurs qui ont contribué à cette situation. En conséquence, les rendements des cultures sont faibles. La recherche de nouveaux modes de gestion qui permettent d'accroître la productivité des terres sans dégrader l'environnement apparaît comme l'une des priorités du secteur agricole. Ce chapitre présente la synthèse des mesures de ruissellement, d'érosion en nappe et de biomasse sur trois parcelles de 460 m² aménagées en cordons empierreés dans la zone agropastorale de Boughezoul entre 2000 et 2004, puis actualisées en 2011.

Milieu et méthodes

Les parcelles sont situées en amont du barrage de Boughezoul sur l’oued Chélif (35° 42’N – 2° 50’ E, alt. 640 m), à 150 km au sud d’Alger sur un grand glacis d’exposition sud en amont des parcelles ; les sols calcimagnésiques xériques sont peu filtrants. En aval, le sol est un siérozem de piémont à accumulation sablo-limoneuse épais de 30 à 50 cm, sur un encroûtement calcaire, mais favorable à l’installation des cultures (POUGET, 1980). Il se caractérise par un taux de calcaire actif élevé (7 à 8 %), alors que le taux de calcaire total est moyen. Le pH est alcalin, ce qui dénote une saturation du complexe adsorbant en calcium. L’observation des parcelles avant aménagement montre que le sol est fragile et instable, ce que confirme l’analyse des agrégats prétraités (AG au benzène, eau ou alcool), avec la formation d’une croûte de battance et même l’apparition de griffes. Vraisemblablement, cette instabilité proviendrait de la faible teneur du sol en matières organiques et de la texture sablo-limoneuse (tabl. 1).

Tableau 1
Caractéristiques physico-chimiques des parcelles de 2000 à 2012.

Traitements Parcelles entre 2000 et 2012	Granulométrie			Calcaire		pH	Cond	C %	Agal %	Age %	Agb %
	A %	L % f + g	S % f + g	Tot	actif						
Standard ₀₀	13,6	30	56	15,5	9,7	8,1	0,65	1,1	//	//	//
Régional ₀₀	16	32,5	51	18	7,8	8,4	0,65	0,91	//	//	//
Amélioré ₀₀	12	40	47,5	21	5,4	8,3	0,52	0,87	//	//	//
Standard ₁₂	17	28	54,5	13	8,6	8,2	0,65	1,2	23,6	19,2	6,8
Régional ₁₂	14	37,5	48	15	8,2	8,1	0,41	1,1	17,3	7,9	6,4
Amélioré ₁₂	12	40	47,5	18	7,1	8,2	0,44	2,2	62,8	53,8	40,2

Abréviations : A % : Argile ; C % : taux de carbone ; L % (f + g) : limon fin + limon grossier ; S % (f + g) : sable fin + sable grossier ; cond : conductivité ; Agal : taux d’agrégats traités à l’alcool ; Age : taux d’agrégats traités à l’eau ; Agb : taux d’agrégats traités au benzène.

Le climat est méditerranéen semi-aride, sec et chaud en été, froid et pluvieux en hiver. Les pluies atteignent en moyenne 300 mm et le Q d’Emberger de 25 unités est à la limite entre le semi-aride et l’aride (ANRH, 1993). La sécheresse estivale est rude, mais la période pluvieuse est assez régulièrement étendue de décembre à avril avec un pic d’averses supérieures à 30 mm au mois de mars (fig. 1) lorsque le sol est peu couvert par la végétation. L’amplitude thermique est forte. La fréquence et la violence du sirocco des dernières années contribuent aux fortes chaleurs de juillet-août (ETP plus élevée, sol très sec, stress hydrique) et aux dépôts éoliens visibles sur les bords de la route.

Le dispositif expérimental comprend un bloc de trois parcelles contiguës de 23 × 20 m sur un champ agricole de 10 % de pente sur siérozem. Les parcelles sont isolées en amont de versant par un canal isohypse de dérivation des eaux de

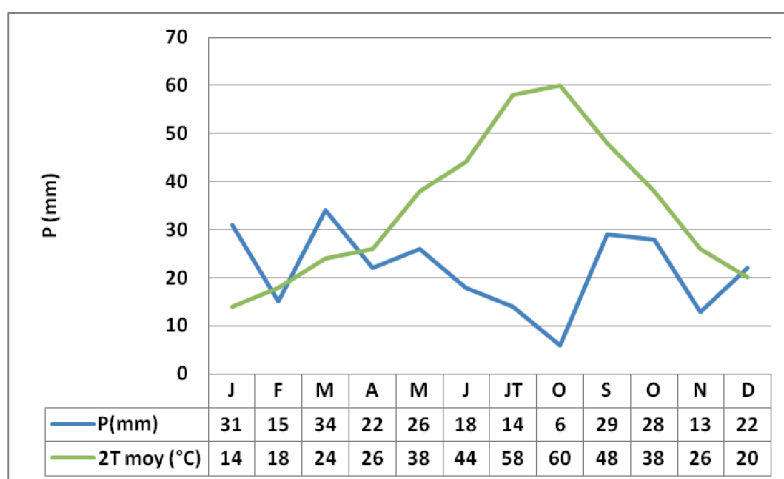


Figure 1

Diagramme ombrothermique de Gaussen pour la région de Boughezoul.

ruissellement de 80 x 60 cm et séparées par des plaques de tôles fichées à 10 cm dans le sol pour empêcher les écoulements latéraux. Des alignements de cyprès et filao sont érigés autour des parcelles pour les protéger des dépôts éoliens. Ces parcelles ont été équipées en canaux et cuves reliés à des partiteurs à trois fentes tarés sur le terrain (ROOSE, 1968 ; ARABI, 1991) pour mesurer le ruissellement annuel (Kram en % des pluies), le ruissellement journalier maximal (KR_{max}), l'érosion en nappe et rigole (charges de fond et suspensions en t/ha/an). Pour apprécier la qualité du sol, 10 carottes ont été prélevées sur chaque parcelle de haut en bas sur une distance de 10 mètres derrière les cordons sur une profondeur de 0-15 centimètres (horizon retourné) en octobre 2011, période qui correspond à la fin de la période sèche et des premières pluies automnales.

L'objectif de l'étude est de comparer le comportement d'un témoin absolu standard mondial (sol nu travaillé dans le sens de la pente) à un témoin régional (système de production agropastoral traditionnel de blé-jachère pâturée), labouré à la charrue à socs sur 60 cm de profondeur, sans amendements et à un système de production amélioré. Les comparaisons portent sur le ruissellement, l'érosion et les revenus nets des cultures.

Les améliorations consistent en un sous-solage en courbes de niveau sur une profondeur ne dépassant pas 20 centimètres, suivis d'un hersage pour fendre la terre sans la retourner, la pratique du paillage après récolte, l'emploi de semences sélectionnées, l'usage d'herbicides et de pesticides, des apports en fertilisants organiques et minéraux, une tentative d'enrichissement pastorale, des cultures en interlignes de blé et de fèves en rotation sous des abricotiers, consolidés par des lignes de cordons empierrés (tabl. 2). Tous les 20 mètres, une ligne de haie d'*Atriplex nummularia*/*Medicago arborea* renforce les cordons constitués de trois niveaux de pierres. Ces améliorations sont localisées sur les 10 derniers mètres derrière les cordons, le reste étant occupé par l'impluvium. Cet impluvium



a : *Atriplex numularia*, plante fourragère semée sur un cordon pierreux pour enrichir les parcours en milieux steppiques.

© M.Arabi

b : des abricotiers plantés en amont des cordons pierreux sont entrés en production dès la 4^e année.

© M.Arabi

c et d : des brises-vents de Filao et Cyprès plantés en bordure des champs ont protégé les cultures du vent et des dépôts de sables éoliens.

Station INRF de Boughezoul, Algérie.

© M.Arabi

de 230 m², très fréquent en région aride (FLORET *et al.*, 1990 ; ROOSE, 1994 ; ROOSE *et al.*, 2010), a été dénudé et compacté sur 10 m pour favoriser le ruissellement vers la partie cultivée (fig. 2).

Principaux résultats et discussion

Les pluies

Durant la période de septembre 2000 à août 2011, les pluies ont été partout déficitaires : il a plu 230 à 250 mm au lieu de 300 mm, moyenne des pluies en année humide. La répartition des pluies est très aléatoire de septembre à

Tableau 2
Caractéristiques des traitements à Boughezoul en 2000-2004.

Système de production	Traitements		
	Témoin absolu Sol nu labouré	Témoin régional, parcelle paysan	Parcelle améliorée
Agropastoral sur siérozem sur alluvions-colluvions de piémont à encroûtement calcaire P = 10 %, altitude = 710 m, avec une charge caillouteuse < 5-10 %	Labour à socs suivi d'un sarclage à la main tous les mois. Pas de produits phytosanitaires.	Agriculture traditionnelle : rotation blé-jachère pâturée, semences locales provenant des récoltes précédentes, faculté germinative faible, labour à socs 60-80 cm de profondeur. dans le sens de la pente, pas de produits phytosanitaires, ni engrais.	Agriculture intensive, abricotiers et <i>Atriplex nummularia/Medicago arborea</i> en lignes sur structure antiérosive complantée formant obstacles pour intercepter la charge solide et ainsi filtrer le ruissellement + culture en interlignes : rotation biennale blé/fèves en courbes de niveau, emploi d'engrais : azote = 50 U dont 50 % au semis et 50 en hiver à la volée, phosphore (150 unités + fumure de fond avant semis) pour le blé ; fumure de fond 50 kg de fumier + 3 kg de P ₂ O ₅ + 1 kg K/par trou) puis 02025 pour l'abricotier ; produits phytosanitaires (2.4.D,S double action 6 l/ha, Hexaconazole, Bromuconazole, Frumax, etc.), variété de blé sélectionnée (Soltane), labour superficiel croisé et hersage favorisant l'infiltration.

avril. L'augmentation de la variabilité interannuelle accentue l'aridité du climat avec des années sèches de plus en plus nombreuses. En général, les intensités sont faibles. Pour la période 1974-1999, à peine 5 % des averses dépassent 20 mm/jour. Les pluies maximales de l'année s'observent entre novembre et mai (P.J max. = 20 mm/j) avec un indice d'agressivité faible (RUSA = 35) entre 1970 et 1988. Mais les pluies annuelles d'occurrence décennale atteignent 600 mm dans la région. Ce sont ces pluies orageuses et assez violentes qui défigurent les paysages et provoquent de graves inondations meurtrières en aval (Arabi, 2006).

Effet des cordons de pierres sur le ruissellement et l'érosion

Durant ces quatre années, des ruissellements supérieurs à 35 % ont été mesurés lors des averses importantes entre novembre et mai sur sols nus tassés par le surpâturage avec de faibles taux d'érosion. Mais certains orages sont assez violents pour précipiter une grande quantité d'eau et provoquer des crues catastrophiques. C'est ainsi que plus de 90 % des pertes en terre annuelles peuvent être enregistrées en une seule pluie (ARABI, 2006). L'efficacité des cordons de pierres sur le ruissellement et l'érosion dépend de la hauteur des averses. En effet, ils fonctionnent remarquablement bien pour des averses inférieures au seuil de 50 millimètres de pluies. Ils agissent comme des filtres qui ralentissent la vitesse des écoulements, provoquent une baisse de la compétence du ruissellement et favorisent le dépôt des sables grossiers et des matières organiques en améliorant l'infiltration. Si les pierres sont bien juxtaposées, elles filtreront les pailles, les fèces et diverses matières organiques flottantes, ce qui fait dire aux paysans que ce dispositif est

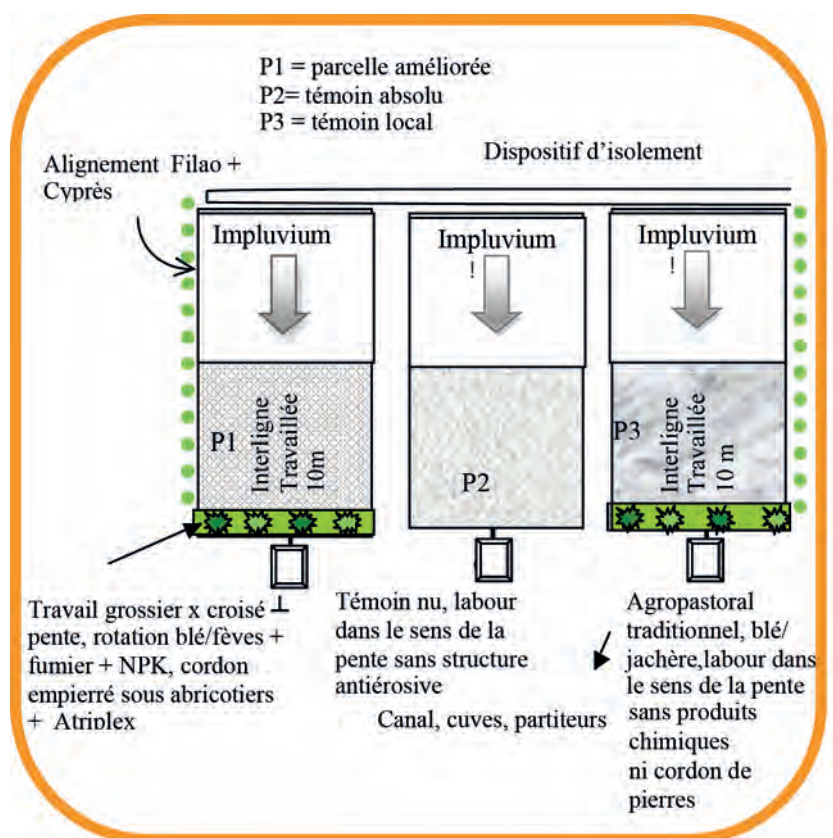


Figure 2
Dispositif comportant trois parcelles agronomiques de 23 x 20 m.

bien adapté pour restaurer la fertilité des sols et accroître la biomasse. On souligne l'influence favorable du travail superficiel du sol et du paillage sur l'infiltration, ce qui ressort en effet de la parcelle améliorée P₁. Le travail superficiel sans retournement de la terre, en augmentant la rugosité du terrain et l'infiltration, a retardé et réduit la formation d'un écoulement superficiel où les conditions morphologiques peuvent favoriser l'incision. De même, la litière issue des résidus de cultures (chaumes de blé et feuilles de fèves) a permis de lutter efficacement contre l'impact des gouttes de pluie (ROOSE *et al.*, 2010, 2012).

En outre, on a observé que sous ces résidus de cultures, le sol conserve jusqu'au mois de juillet une certaine humidité (ARABI *et al.*, 2003-2004), ce qui favorise l'humification et le développement de la microfaune du sol. Par ailleurs, en milieu aride où la disponibilité en terre n'est pas un facteur limitant, l'utilisation d'impluvium en amont des parcelles pour le captage du ruissellement a permis de suppléer à l'insuffisance des pluies par un apport en eau de ruissellement estimé entre 150 et 180 mm. Cette pratique existe en Afrique depuis des millénaires et s'est répandue dans le monde (EDWARDS *et al.*, 1989 ; HUDSON, 1987 ;

ROOSE *et al.*, 2010). Durant ces dernières années, la teneur du sol en MO a plus que doublé (2,2 % contre 1 % avant). Le sol s'est épaissi régulièrement derrière la structure antiérosive. En dix années de lutte contre l'érosion, le versant a évolué en terrassettes. Les apports en éléments érodés (pailles, résidus de cultures et excréments) modifient progressivement l'état structural du sol comme le confirment les tests d'agrégats prétraités (AGb ou e ou al du tableau 1). Il importe aussi de préciser que toutes ces pertes en terre sont à la fois le résultat combiné de l'érosion aratoire et de l'érosion en rigole (ARABI, 1991). Ainsi, la couche superficielle semble moins vulnérable à la battance des pluies et à l'énergie du ruissellement. Seul l'excédent des eaux (averses supérieures à 50 mm) passe au-dessus du niveau de pierres. Ce seuil peut atteindre 70 mm/h si l'intensité de la pluie est faible ($I < 20$ mm/h), mais pour des pluies exceptionnelles assez fréquentes dans la région en automne, les cordons peuvent être rapidement saturés. Pour préserver la pérennité des ouvrages et favoriser l'évolution du terrain en terrasses, de nouvelles lignes de pierres sont envisagées pour rehausser le niveau atteint des cordons empierrés. On a aussi observé qu'entre les tiges des *Atriplex*, les filets d'eau peuvent se réorganiser en petites rigoles, quand les conditions de pluie deviennent exceptionnelles.

Il semble que les herbes à rhizomes rampant à la surface du sol et à tiges nombreuses (*Agropyrum elongatum*, *Avena fatua*, *Hyparrhania hirta*, *Lolium perenne*, *Hedysarum coronarium*...) renforcent d'avantage le dispositif antiérosif. Mais cette solution a un prix : le risque d'une propagation rapide sur l'aire cultivée par voie de rejets ou de stolons, tel que *Cynodon dactylon* sur les champs cultivés que les paysans ont du mal à contrôler.

Influence de l'amélioration des systèmes cultureux

Si les améliorations et innovations apportées au système de production local ont réduit modestement l'érosion et le ruissellement, le système de gestion amélioré montre une hausse remarquable des rendements par unité de surface. Ainsi, les rendements moyens en cultures pour le blé d'hiver, passent de 3 q/ha chez le paysan à 27 q/ha en amélioré auxquels il faudra ajouter 28 q de fèves, et 12,6 q d'abricots. De même, les plantes pastorales ($PP = Atriplex$ et *Medicago*) ont produit jusqu'à 2 tonnes de MS/ha et 0,62 unités fourragères/kg de MS dont 50 % sont consommables. Une telle production autorise une charge de 2 têtes ovins/ha/an et une charge d'exploitation automnale de 12 têtes/ha selon les normes admises. En outre, les résidus de cultures ont nettement augmenté (7 q de paille, et 12 q de feuilles de légumineuses et autres résidus) de telle sorte que la production animale et la disponibilité en fumier peuvent aussi s'améliorer. Au total, cette augmentation de la productivité résulte d'une amélioration notable de l'alimentation hydrique par un sous-solage localisé, d'une utilisation plus efficace des nutriments libérés par les MO piégées derrière les barrières anti-érosives ainsi que de l'association de cultures régénératrices dans la rotation biennale, la diminution des pertes dues aux ravageurs (muridés) et maladies et à la protection d'un brise-vent autour des cultures.

En milieu oasien et particulièrement en steppe, les paysans recourent de plus en plus à la pratique des brise-vents pour protéger du dessèchement les cultures malgré certains préjugés défavorables sur la concurrence hydrique. Celle-ci peut être contrebalancée par une gestion appropriée des espaces cultivés où les systèmes racinaires pivotants des plantes sont situés dans le profil du sol des différents groupes de cultures. Les rendements obtenus dans nos parcelles sont très encourageants sans qu'on puisse observer une baisse de la productivité durant ces années. Le brise-vent formé de *Casuarina* + Cyprés et plus tard de cannes de Provence (initiative paysanne introduite en 2009) a constitué une ambiance climatique favorable à l'association des cultures et a garanti à toutes les plantes un espace suffisant de développement. La consommation en eau du brise-vent est partiellement compensée par la diminution des effets néfastes du sirocco. Il faut noter aussi que le déficit pluviométrique n'a pas pénalisé la production grâce au captage du ruissellement en amont, à une meilleure infiltration de l'eau, au travail du sol, à sa fertilisation et surtout au cordon empierre. Il est donc possible d'accroître les rendements sur les parcelles lorsque le système agricole adopté précédemment est de type traditionnel, même si le sol est peu productif.

Si on retranche du chiffre d'affaires les prix des intrants supplémentaires (semences, engrais, produits phytosanitaires), il reste au paysan un revenu à l'hectare nettement supérieur à celui obtenu avec les cultures traditionnelles : 7 000 \$ au lieu de 500 \$ (tabl. 3). Ces résultats montrent que le développement agricole diversifié est possible en zone steppique à condition d'utiliser les bonnes pratiques qui suppléent le déficit pluviométrique, améliorent la capacité de rétention des sols et accroissent leur fertilité sans dégrader l'environnement. En intensifiant le système de production, on a multiplié par 14 le revenu à l'hectare en produisant en sus du blé, des fèves, du fourrage (*Attriplex/Medicago*) et des abricots. Avec un tel bénéfice, les paysans peuvent abandonner la vaine pâture et saisir l'intérêt qu'il y a pour eux à changer de système de production : du blé extensif à un système plus diversifié qui leur assure la sécurité alimentaire et améliore sensiblement la situation nutritionnelle du bétail et des ménages.

Effet des cordons de pierres sur le foncier

On a constaté sur les premiers cordons encore à l'état juvénile une dégradation par la divagation du bétail. Dans ces zones de parcours, la densité d'implantation de structures antiérosives doit tenir compte de la circulation du bétail depuis les pâturages jusqu'aux bas-fonds, lieux de l'abreuvement du bétail. Tant que la végétation n'a pas atteint quatre à cinq ans, il est recommandé de clôturer les champs pour éviter le piétinement. Le cloisonnement des parcelles par des lignes de brise-vents avec *Cupressus sempervirens* ou *horizontalis* ou *Casuarina equisetifolia* a transformé le paysage en bocage et protégé les cultures de l'érosion éolienne contrairement aux parcelles témoins où des dépôts éoliens sont observés. Il faut noter que la méthode des cordons de pierres est assez bien connue en zone méditerranéenne. Elle s'intègre facilement dans les paysages et son prix de revient, de 80 à 100 \$/100 mètres linéaires selon la disponibilité des pierres,

mobilisant 20 à 30 hommes jours, peut être supporté par la plupart des paysans de la région. Il est toutefois important de disposer d'un régime foncier stable à long terme. En effet, on ne peut demander aux agriculteurs de consentir de gros investissements pour développer et pérenniser leurs cultures, si on ne leur offre pas la garantie de pouvoir continuer à vivre de la terre. Le régime foncier instable reste encore un handicap sérieux qui empêche l'investissement agricole en Algérie.

Tableau 3

Effet de l'amélioration des pratiques culturales sur le ruissellement (moyen et max. en % des pluies), l'érosion (t/ha/an) et sur la biomasse et les revenus nets à Boughezoul, années 2000-2004 (données actualisées en 2011).

Revenus \$/ha/an	Rendements q/ha/an	Érosion t/ha/an	Krmax %	Kram %	Pluie mm	Traitements
		2	34	11	273	Témoin absolu sol nu travaillé//P Médiane
= 500	4 b + 1 p	1,6	14	4	273	Témoin traditionnel blé/ jachère travaillé//P sans engrais ni produit phytosanitaire Médiane
= 7000	27 b + 7 p + 0,6ft 28 f + 12 rc	0.2	3,5 ?	2 ?	273	T. amélioré rotation : blé/fève, travail grossier x croisé ⊥ P + fumier + (NPK) ; CE complantés en <i>Atriplex</i> et arbres fruitiers Médiane

b = blé, p =paille, f = fève, ft = fruits, rc = résidus de culture.

Conclusions

Cette étude réalisée en zone semi-aride propose un ensemble de pratiques culturales et d'aménagements alternatifs pour préserver les sols et rétablir leur capacité de production. Contrairement au système d'exploitation traditionnel, les améliorations apportées, la diversification entre arboriculture fruitière-élevage (fumier)-pâturage en arbustes fourragers consolidés par les cordons de pierres ont réduit l'érosion et le ruissellement, enrichi et stabilisé le sol ; mais elles ont surtout accru significativement la productivité des terres, particulièrement sur les 10 mètres en amont des cordons empierrés.

Dans les régions à faible pluviosité, il est possible d'adopter un système de production localement intensif, amélioré et diversifié. Dans ces milieux où les sols sont tassés par le surpâturage, les eaux de ruissellement excédentaires peuvent occasionner des dommages coûteux sur les personnes et les biens. Il est donc judicieux de tirer profit de cette ressource en l'étalant sur la plus grande surface, en développant des stratégies de diversification agricoles pour assurer une plus grande protection des sols.

Bibliographie

ANRH, 1993 – Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000, moyennes annuelles ramenées à la période 1922/1960-1969/1989. Projet PNUD Alg. 88/021.4 cartes + notice explicative.

ARABI M., 1991 – Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie). Thèse doct., univ. Grenoble, 272 p.

ARABI M., 2006 – Aménagement antiérosif sur petits bassins versants expérimentaux en milieu semi aride algérien. *Z. Geomorphology NF*, 50 (2) : 209-220.

ARABI M., ROOSE É., 1994 – « Intensification de l'agriculture sans dégradation en montagne méditerranéenne : cas de Médéa (Algérie) ». In Roose É. (éd.) : *Introduction à la GCES, Bull. des Sols FAO*, Rome, 70 : 363-370.

ARABI M., BOURUGAA L., KEDAID O., 2003-2004 – Nombreux rapports, notes diverses. CRSTRA Biskra.

EDWARDS K. A., CLASSEN G. A., SCHROTEN E. H. J., 1988 – *L'exploitation des ressources hydrauliques en Afrique tropicale*. Cipea, ACCT, Éthiopie (Addis-Abeba), rapport de recherche, 16, 128 p.

FLORET C., PONTANIER R., SOUISSI A., 1990 – *Optimisation de l'utilisation de l'eau en zone aride méditerranéenne*. Tunisie, Dir. des Sols, E-S 256, 13 p.

HEUSCH B., 1970 – L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative. *Annales de la Recherche Forestière (Maroc)*, 12 : 9-176.

HUDSON N. W., 1987 – Soil and water conservation in semi arid areas. *FAO Soils Bulletin*, 57, Rome, 173 p.

POUGET M., 1980 – Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 116, 557 p.

ROOSE É., 1968 – *Protocole standard pour les parcelles de mesure de l'érosion en nappe en accord avec le modèle USLE de Wischmeier*. Montpellier, Orstom, 12 p.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.

ROOSE É., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993 – Érosion en nappe et ruissellement en montagne algérienne. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 289-308.

ROOSE É., SABIR M., LAQUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols du Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

ROOSE É., SABIR M., ARABI M., MORSLI B., MAZZOUR M., 2012 – Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo*, 6 : 43-69.

Gestion du ruissellement et restauration de la productivité des terres de montagne au Nord-Ouest algérien (Beni Snouss)

Mohamed MAZOUR

Mohamed ZOBIRI

Malika BENMANSOUR

Introduction

Les régions montagneuses de l'extrême nord-ouest de l'Algérie sont soumises à de fortes pressions en homme et en bétail qui ont contribué à une sévère dégradation des sols et de la couverture végétale. Le défrichement, la mise en culture des terres en forte pente, le surpâturage et les pratiques agricoles souvent inadaptées sont autant de facteurs liés à l'homme qui ont accentué les phénomènes de dégradation.

Les montagnes s'étendent sur une superficie de 75 000 kilomètres carrés dont les deux tiers sont situés à plus de 800 mètres d'altitude : le quart présente des pentes supérieures à 25 %. La lithologie y est souvent constituée de roches dures alternant avec des couches tendres (schistes et argilites) sensibles à l'érosion. Le climat est très irrégulier : les années sèches alternent avec des années humides, avec des pluies souvent intenses et dévastatrices (MAZOUR, 2004).

La lutte contre les érosions sous toutes leurs formes et spécialement contre les érosions pluviales constitue l'objectif essentiel des travaux de défense et restauration des sols. Plus récemment, on s'est préoccupé de l'amélioration de la

productivité agricole dans ces zones. Cette défense revêt un caractère d'impérieuse nécessité, car les désastres consécutifs au progrès des érosions se précisent et s'aggravent à une cadence croissante pour prendre un caractère catastrophique chaque fois que des pluies torrentielles sont enregistrées dans une région donnée. Les populations de ces montagnes connaissent fort bien le phénomène de l'érosion hydrique et se sont entraînées à en réduire les effets néfastes depuis longtemps.

Les conditions naturelles de ces régions (climat, relief, sol et couverture végétale) associées à une société rurale bien particulière, qui a toujours su mettre en œuvre des formes de gestion communautaire, ont contribué au perfectionnement de techniques de gestion de l'eau et de conservation des terres qui ont servi de support à la survie d'une population souvent trop nombreuse par rapport aux ressources disponibles.

Bon nombre de ces techniques furent cependant abandonnées avec le temps, suite à des événements historiques (invasions, colonisation, décolonisation, exodes,...) et des phénomènes de changement d'usage des terres qui sévirent dans les zones montagneuses du nord de l'Algérie.

Les paysages ruraux que nous rencontrons aujourd'hui sont le fruit d'aménagements lentement élaborés par les agriculteurs. Parmi les innombrables exemples d'aménagement de surface de production, les terrasses et terrassettes à l'amont de murets ou talus sont largement répandues dans les montagnes telliennes comme sur le pourtour méditerranéen. Dans un milieu où la maîtrise des eaux est essentielle à la production agricole, où le sol est fragile et constamment soumis à l'érosion, ce type d'aménagement pourrait répondre à un double objectif : la conservation de l'eau et du sol et l'augmentation de la productivité des terres. Il est cependant assez rare de rencontrer seul ce même type d'aménagement, il est souvent associé à d'autres techniques complémentaires dans une répartition spatiale qui est loin d'être uniforme. Un des aspects intéressants des techniques traditionnelles est justement leur diversité et la complexité dans leur fonctionnement combiné.

Dans ce travail, nous avons voulu évaluer l'impact de quelques techniques et aménagements antiérosifs dans les sites de Beni Snous, Honaine et Zouanif sur la conservation de l'eau et du sol et l'amélioration de la productivité agricole.

La restauration des terres de montagne fortement dégradées et les aménagements traditionnels de conservation de l'eau et du sol peuvent-ils jouer un rôle dans l'amorce d'un développement local intégré et d'un équilibre écologique durable ? Quelles sont les retombées matérielles et financières ?

Matériel et méthodes

Ce travail concerne des sites bien particuliers qui se distinguent par un milieu naturel où les risques d'érosion sont omniprésents, mais avec un potentiel de

production de biomasse intéressant et une population locale ingénieuse qui a su mettre au point des techniques et des aménagements de conservation de l'eau et du sol d'une grande efficacité. Ce sont les sites de Beni Snous, Honaine et Zouanif. Un premier travail (MAZOUR et MORSLI, 2006) a été réalisé en 2004 dans la même zone et avait pour objectif de tester le comportement et l'évaluation de l'efficacité des aménagements traditionnels, leur comportement, leur stabilité et le rapport coût/efficacité.

L'approche méthodologique demeure assez simple. L'enquête repose sur l'évaluation et la caractérisation du comportement des aménagements de conservation de l'eau et du sol et leur impact sur l'amélioration de la fertilité des sols et par conséquent, l'amélioration de la productivité des parcelles agricoles ayant été restaurées. Des observations directes ont été effectuées sur les sites avec des repérages et un suivi rigoureux des paramètres à analyser. Une analyse du comportement des aménagements traditionnels utilisés a été menée particulièrement face aux événements pluviométriques extrêmes enregistrés ces trois dernières années (2010, 2011 et 2012).

Nous avons ensuite mesuré l'intérêt de l'amélioration de certaines techniques par des moyens modernes et des matériaux nouveaux pour les rendre plus attractives économiquement (choix des cultures, fertilisation raisonnée, système d'irrigation performant et adapté, gabion, béton, etc.).

Un certain nombre de facteurs sont appréciés directement, puis évalués et analysés à la lumière de plus de 15 années d'observations, de mesures, d'expérimentation et d'évaluation afin de comprendre les raisons de la pérennité et de la reproductibilité de certaines techniques qui ont exigé des efforts considérables au cours des siècles.

Quelques aspects socio-économiques particuliers de ces zones ont été pris en considération, notamment l'organisation du travail collectif et l'implication de la femme rurale dans l'entretien des différents aménagements ruraux, ainsi que la pratique agricole dans le but de restaurer la productivité et d'inverser la dynamique régressive de la dégradation vers une dynamique progressive de conservation de l'eau et du sol et l'amélioration de la production agricole locale.

Le milieu naturel

Les trois sites expérimentaux sont situés dans le Nord-Ouest algérien dans la wilaya de Tlemcen. Les Beni Snous se trouvent à quelque 30 kilomètres au sud-ouest de la ville de Tlemcen, dans une zone enclavée où les conditions de vie sont assez dures : c'est en quelque sorte une oasis où les ressources naturelles sont gérées d'une manière rigoureuse (fig. 1).

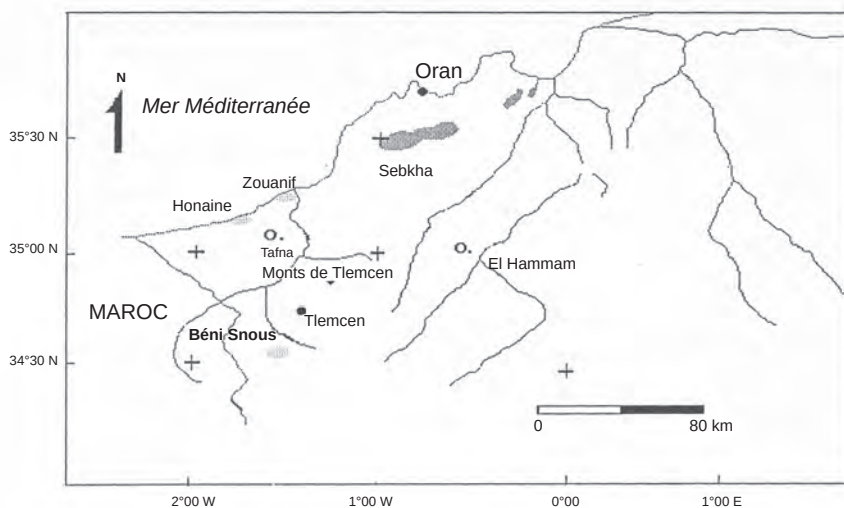


Figure 1
Carte de situation des monts du Tell occidental de l'Algérie.

Le relief très escarpé est fortement disséqué avec de fortes pentes et un réseau de drainage assez dense : le cours d'eau principal porte le même nom que la localité Beni Snous coule dans des gorges profondes et contribue d'une manière importante à l'alimentation des nappes alluviales et du barrage de Beni Bahdel situé à 8 km.

Le climat est de type continental semi-aride avec de fortes amplitudes thermiques ; les pluies moyennes annuelles varient de 300 à 550 mm. Ces pluies sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité : l'intensité maximale peut atteindre 80 mm/heure.

La lithologie est constituée de roches calcaires et dolomitiques altérées, ce qui confère à ces zones une bonne résistance aux différents processus d'érosion.

Les formations végétales naturelles (matorral) sont pauvres et très dégradées, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération. L'agriculture est constituée essentiellement d'arboriculture fruitière rustique (oliviers), de cultures maraîchères sur terrasses traditionnelles bien connues et d'élevage de caprins et d'ovins.

À 80 kilomètres plus au nord, se trouvent les deux autres sites de Zouanif et Honaine sur des versants côtiers montagneux avec une autre physionomie du paysage qui paraît moins escarpé, mais aussi moins travaillé.

Pour les deux sites, le climat est de type méditerranéen semi-aride où les pluies moyennes annuelles oscillent entre 300 et 450 mm et sont irrégulièrement réparties durant l'année, l'amplitude thermique est moins accentuée. L'influence maritime adoucit et humidifie l'atmosphère et permet beaucoup de cultures sans irrigation.

Les sols à Zouanif sont assez riches et évoluent sur des faciès volcaniques. À Honaine, les sols ont une texture complexe et ont parfois des influences volcaniques. Ils ont souvent un bon potentiel de production.

Les techniques traditionnelles de conservation de l'eau et du sol ont toujours accompagné toutes les activités agricoles dans la région. Bon nombre de ces techniques furent cependant abandonnées avec le temps ou encore utilisées, mais sans véritablement jouer leur rôle : elles sont fortement dégradées et utilisées en l'état, vu les changements d'usage des terres.

Résultats

Les aménagements antiérosifs traditionnels et particulièrement, les terrasses sont largement utilisés dans la région et ont montré une bonne efficacité contre le ruissellement et l'érosion (MAZOUR et MORSLI, 2006). Mais elles ont été fortement endommagées ces dernières années suite à des événements pluviométriques intenses. Il en est de même pour la plupart des autres techniques traditionnelles comme les structures en pierres sèches, les seuils en terres compactées, les divers cordons et les ouvrages hydrauliques (Jboub, Madjen, Séguia, Sed, etc.).

Il apparaît clairement que les aménagements traditionnels de conservation de l'eau et du sol ont leur limite, mais ceci semble être bien connu des populations rurales qui prévoient de grands travaux de réfection des ouvrages et aménagements antiérosifs régulièrement et après chaque événement pluviométrique important (tabl. 1). La périodicité de ces travaux d'entretien semble curieusement correspondre aux fréquences d'apparition de ces événements pluviométriques dangereux.

Nous présentons au tableau 1 les comportements des différents aménagements traditionnels pour la période 1991-2005, période caractérisée globalement par un déficit hydrique récurrent. Le tableau 2 présente les valeurs du ruissellement et de l'érosion mesurées dans la région, où les conditions climatiques et agro-écologiques sont proches, et ce en fonction des systèmes d'utilisation des terres pratiqués par les populations rurales.

Par ailleurs, nous avons examiné régulièrement, au niveau des trois sites expérimentaux, l'évolution de quelques parcelles aménagées en terrasse et irriguées traditionnellement par des séguia (canaux) et sed (ouvrages de stockage d'eau). Nous avons ensuite évalué les gains enregistrés après aménagement des terrasses et restauration des parcelles. Les résultats sont reportés sur le tableau 3 ci-dessous.

Seuls les aménagements en terrasse sont pris en considération avec irrigation ou sans irrigation.

Parfois, d'autres aménagements sont associés, mais leur impact n'est pas très important par rapport aux terrasses.

Tableau I
Comportement de quelques aménagements traditionnels de conservation de l'eau et du sol
en fonction de certains facteurs dans le Nord-Ouest algérien (2010-2011-2012).

Aménagements antiérosifs traditionnels**	Facteurs analysés	Efficacité pour la conservation de l'eau du sol		Dégâts partiels	Dégâts importants	Destruction totale	Coût des dommages X1 000 DA
Ouvrages et structures							
Murets avec terrassettes		++	++		X		5/m²
soit en pierres,		+	+	X			1/ml
soit en végétal,		+	++			X	1/ml
soit mixte.		+	++		X		1/ml
Dérivation des eaux :							
Swéguia		+++	++		X		3/ml
Sed		+++	++			X	20/m³
Stockage des eaux :							
Madjen		+++	+			X	10/m³
Jboub		+++	+			X	10/m³
Techniques culturelles							
Cultures en billons		++	++		X		1/ml
Mulching :							
de pierres,		++	++	X			1/m²
de paille.		++	++	X			1/m²
Cuvettes d'infiltration et de ruissellement :							
circulaire		++	++	X			5/m³
en demi-lune		++	++	X			5/m³

bs = Beni Snous : 15 aménagements ; z = Zoualef : 15 ; h = Honaine : 15.

** Sed : ouvrage de stockage d'eau à l'amont d'une diguette réalisé généralement en terre transversalement à un cours d'eau temporaire avec une espèce de déversoir latéral. D'une capacité de quelques milliers de mètres cubes, il est généralement réparé ou entièrement refait après chaque crue importante par la Touiza (chantier de volontaires).

Séguia : canal de dérivation et de collecte des eaux réalisé en terre ou en pierres agencées.

Madjen : ouvrages de stockage d'eau utilisant des dépressions naturelles ou creusées. L'eau sert à certaines activités domestiques, telles que le lavage, l'arrosage des jardins et potagers et l'abreuvement des animaux d'élevage.

Jboub : ouvrages de stockage d'eau de petite capacité réalisés au niveau de certaines ravines. Ils servent surtout à l'abreuvement du cheptel.

Tableau 2
Ruissellement (Kram et K_{max} %) et érosion (t/ha/an)
sur parcelles expérimentales à Tlemcen (1991-2005).

	Parcelle standard				Système traditionnel			Système amélioré		
	Pluies (mm)	Kram (%)	K _{max} (%)	Érosion (t/ha/an)	Kram (%)	K _{max} (%)	Érosion (t/ha/an)	Kram (%)	K _{max} (%)	Érosion (t/ha/an)
Hériz Système agropastoral (blé-jachère pâturée) ; sol vertique gris sur marnes.										
Moyenne	330	6,2	20,3	2,0	5,6	16,7	1,36	4,67	14,6	0,95
Écart type	97	2,23	10,8	1,8	1,8	7,30	1,2	2,29	5,9	0,88
Madjoudj Système sylvo-pastoral (matorral dégradé pâturé ou en défens) ; sol brun calcaire érodé.										
Moyenne	387	3,9	22,4	3,55	2,4	10,9	0,52	2,2	11,2	0,4
Écart type	77	1,3	11,7	1,42	1,6	4,6	0,26	1,4	4,6	0,27
Gourari Système pastoral (matorral très dégradé à Diss et Chamerops) ; sol rouge fersiallitique.										
Moyenne	411	12,7	27,5	3,4	11,0	20,9	1,9	11,2	18,8	1,4
Écart type	76	2,13	5,32	1,37	3,21	7,45	0,55	3,36	6,89	0,53

Kram : coefficient de ruissellement annuel moyen.

K_{max} : coefficient de ruissellement maximum.

Tableau 3
Amélioration des productions après restauration et aménagements traditionnels de conservation
de l'eau et du sol en zones montagneuses dégradées (2010-2011-2012).

Sites	Types d'aménagement	Cultures	Production avant restauration X10 ³ DA/ha/an	Production actuelle X10 ³ DA/ha/an
Beni Snous1	Terrasse irriguée	Maraîchage + olivier	45 000	80 000
Beni Snous2	Terrasse non irriguée	Arboriculture	20 000	25 000
Zouanif1	Terrasse irriguée	Maraîchage + vigne de table	38 000	60 000
Zouanif2	Terrasse non irriguée	Légumineuses + amandier	15 000	30 000
Honaine1	Terrasse irriguée	Maraîchage + grenadier	38 000	60 000
Honaine2	Terrasse non irriguée	Arboriculture rustique	15 000	25 000

Discussion

Certaines formes de communautés rurales en zones montagneuses du Nord-Ouest algérien ont contribué d'une manière intéressante au développement et au perfectionnement de certaines techniques traditionnelles de gestion et de conservation de l'eau et des terres qui ont servi de support à leur survie. Les ressources naturelles disponibles sont souvent insuffisantes par rapport à une population trop nombreuse et toute l'ingéniosité de ces populations a été mise à l'épreuve pour garantir autant que possible une autosuffisance alimentaire. Dans cette démarche, les aménagements traditionnels de conservation de l'eau et du sol ont toujours joué un rôle essentiel (MAZOUR et MORSLI, 2006). Ces aménagements ont aussi connu de temps en temps des dégradations importantes et même des destructions à la suite d'événements pluviométriques extrêmes, mais les populations rurales dans ces zones ont toujours su réparer, reconstruire ou reproduire ces aménagements grâce à un savoir-faire acquis depuis des siècles et dans le cadre d'une organisation sociale performante.

Comportement des ouvrages et structures traditionnelles

Le village de Beni Snous dans les monts de Tlemcen, accroché à plus de 1 000 mètres d'altitude, aux flancs de montagne, est caractérisé par une sociologie particulière, étant donné son enclavement depuis des siècles et des conditions du milieu naturel très difficiles. Ses populations sont passées maîtres en aménagement et techniques de conservation de l'eau et des sols comme les fameuses terrasses méditerranéennes omniprésentes, les cuvettes aux pieds des oliviers en pierres soigneusement agencées. Beni Snous est surtout connu pour ses olivettes, ses vergers et ses terrasses cultivées. Ces terrasses verdoyantes atténuent les fortes pentes qui dépassent les 60 %, les sols peu profonds sur un substrat calcaire entretenant une végétation naturelle assez dense sous forme de maquis de chêne et de résineux et les pluies relativement abondantes et agressives en hiver et au printemps font que les risques d'érosion et de ravinement sont très élevés dans cette région. Les agriculteurs ont su développer depuis très longtemps des techniques simples, mais efficaces leur permettant de contrôler les eaux de ruissellement, les stocker et les utiliser pour l'irrigation des terrasses aménagées, des oliviers et autres arbres fruitiers (grenadier, pommier, pêcher, prunier, poirier, etc.). Au pied des arbres sont souvent confectionnées des cuvettes d'infiltration circulaires ou en demi-lune avec l'utilisation du paillage, mais parfois en pierres. Nous avons analysé 15 aménagements dans cette zone par rapport à six facteurs (tabl. 1.) : 2 terrassettes, 1 cordon en arbustes et fourragers, 2 *séguías*, 1 *sed*, 1 *madjen*, 1 *daya*, 1 culture sur billons, 1 utilisation de fumier, 2 cuvettes d'infiltration circulaires et 3 en demi-lune. Il en ressort tout d'abord le bon rapport coût/efficacité pour toutes les structures, sauf les ouvrages de stockages d'eau *madjen* et *jboub*. Mais ce sont les terrasses et terrassettes qui

caractérisent la région de Beni Snous depuis très longtemps, comme en témoignent l'indice de reproductibilité et aussi l'indice de productivité des terres aménagées et restaurées. Ils permettent une excellente conservation des eaux.

Fonctionnant en association avec les *séguia*, *sed*, *madjen*, *jboub* et cordons en végétaux, leur efficacité est multipliée : les écoulements superficiels collectés, les ruissellements atténués par les cordons et le travail du sol et canalisés par les *séguia*, l'infiltration améliorée au niveau des terrasses. Les pertes de terre ont diminué en conséquence (tabl. 2) sur tous les versants aménagés. La production agricole et les revenus ont sensiblement augmenté (tabl. 3). Le stock du carbone au niveau des parcelles de terrasses restaurées a gagné plus de 1,5 %. Ceci s'explique par l'utilisation régulière du fumier et le recyclage des débris végétaux. Les techniques traditionnelles ont non seulement des liens étroits avec les conditions agroécologiques de la zone, mais aussi avec ses caractéristiques socio-économiques ; c'est ainsi que plus au nord, sur les versants côtiers de la région, à Zouanif à l'est et à Honaine l'ouest, les terrasses, même si elles sont toujours présentes, leurs densités sont plus faibles et leurs répartitions assez irrégulières. Ceci donne non seulement une autre physionomie au paysage qui paraît moins travaillé, mais aussi une plus faible complémentarité avec les autres techniques de conservation de l'eau et du sol. Les cordons en pierres, en végétaux et mixtes sont assez nombreux et semblent jouer leur rôle d'une manière assez isolée. Il y a peu d'ouvrages de contrôle des écoulements superficiels à cause en partie du régime pluviométrique caractérisé par des averses peu agressives, une influence marine qui atténue le déficit hydrique, des ressources générées par la pêche qui font que la pression sur les terres agricoles n'est pas aussi importante et un système agricole moins contraignant.

Techniques culturelles de CES et restauration des terres

Le système de culture qui peut être défini comme un ensemble constitué par la succession des cultures sur une parcelle et les techniques culturelles qui leur sont appliquées est le facteur important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité des ressources et en même temps lutter contre les facteurs de dégradation de l'eau et du sol.

La répartition spatiale et temporelle des terres cultivées en zone montagnaise nous permet souvent d'observer des systèmes de gestion traditionnels caractérisés par :

- une diversification de cultures : céréaliculture, arboriculture fruitière, culture fourragère, et culture maraîchère ;
- un travail du sol traditionnel (araire, manuel) ;
- une utilisation de fumier et des haies vives.

En outre, ce milieu montagnard aux fortes pentes reste très vulnérable aux ruissellements dévastateurs à la faveur des conditions topographiques, pluviométriques et de l'usage de la terre.

L'analyse des pratiques de restauration des terres en conjuguant les techniques traditionnelles de CES (terrasses, gestion des ruissellements, fertilisation) et le choix d'itinéraire agricole approprié (arboriculture associée aux cultures maraîchères à haut potentiel de production et forte plus value) a permis une restauration des terres en montagne très avantageuse et qui souvent a multiplié les revenus (tabl. 3).

Conclusions

Les zones montagneuses de la région de Tlemcen au nord-ouest algérien sont parsemées d'une multitude d'aménagements traditionnels de CES.

Ce travail concerne particulièrement le comportement des aménagements traditionnels de CES et la restauration de la productivité des terres.

À travers l'analyse d'une quarantaine d'aménagements traditionnels de CES, ce travail a dans un premier temps abordé le comportement de ces aménagements dans la période 1991-2005 (MAZOUR et MORSLI, 2006), puis dans la période 2010-2012, à averses très agressives. Ensuite, nous nous sommes intéressés à quelques parcelles en terrasses restaurées. Ceci nous a amené à faire leur inventaire, leur diagnostic et leur analyse du point de vue de l'efficacité, de la productivité, du coût et des avantages de la restauration.

L'impact est généralement positif sur la CES et sur l'amélioration de la productivité des terres aménagées. Ce sont les techniques simples, peu coûteuses et à la portée de l'exploitant agricole qui ont montré le plus d'efficacité. Ce sont les terrasses et terrassettes qui sont les plus largement utilisées. Il s'est avéré que l'association des techniques de CES traditionnelles (mécanique, biologique, techniques culturales) combinées avec des compléments de fertilisation a un impact très positif sur la production et la réduction du risque de dégradation.

Mais ce sont des aménagements facilement reproductibles dans le cadre d'une organisation sociale du travail collectif (*touiza*) qui garantit la pérennité de ces aménagements en milieu rural.

Il apparaît donc intéressant aujourd'hui de privilégier, dans le cadre des nouvelles stratégies de conservation de l'eau et du sol, toutes ces techniques ancestrales qui ont prouvé leur efficacité à travers le temps. Les parcelles restaurées au niveau des trois sites choisis peuvent constituer une voie de développement durable en zone de montagne de la région de Tlemcen, mais les ressources en eau limitées demeurent le facteur déterminant de tout développement et sa gestion est un défi constant à relever.

Bibliographie

LAOUINA A., NAFAA R., COELHO C., CHAKER M., CARVALHO T., BOULET A. N., FERREIRA A., 2000 – Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc. *Bull Réseau Érosion*, 20 : 256-274.

MAZOUR M., 2004 – *Étude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen*. Thèse doct. d'État, université de Tlemcen, 184, 131 p.

MAZOUR M., BENMANSOUR M., 2002 – Effet de l'exposition des versants sur la production de biomasse et l'efficacité antiérosive dans le Nord-Ouest algérien. *Bull. Réseau Érosion*, 22 : 320-368.

MAZOUR M., MORSLI B., 2006 – « Analyse de l'efficacité de quelques techniques traditionnelles dans le Nord-Ouest algérien ». In : *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieu semi-arides*, Éditions AUF-Actualités Scientifiques-IRD Paris : 193-198.

MORSLI B., MAZOUR M., ARABI M., ROOSE É., 2005 – « Influences of land uses, soils and cultural practices on carbon eroded and carbon stocks in soils of Mediterranean mountains of northern Algeria ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. A. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Sciences*, CRC publisher, Boca Raton : 103-123.

ROOSE É., ARABI M., BRAHMIA K., CHEBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1997 – Recherche sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. *Cah. Orstom, sér. Pédol*, 28 (2) : 289-307.

ROOSE É., SABIR M., 2002 – Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé. *Bull Réseau Érosion*, 21 : 33-44.

Conclusions de la quatrième partie

Aménagements complexes

Éric ROOSE

Dans la première partie, on a vu que la dégradation de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens dépend des divers processus d'érosion et de la vitesse de minéralisation des MO du sol. Dans la seconde partie, on a souligné le rôle majeur d'amendements et de fertilisants joué par la matière organique (MO) pour conserver la fertilité physique, chimique et biologique des sols tropicaux. Par ailleurs, on a observé le manque de biomasse produit sur les champs ce qui force les paysans à puiser ailleurs de la biomasse, à déplacer les nutriments des parcours ou à introduire des engrais minéraux pour compenser les pertes. Dans la troisième partie, on a montré que le choix de diverses techniques culturales influe sur la dynamique des MO et des nutriments mais que, de toute façon, on aboutit tôt ou tard à la dégradation de la fertilité du sol si on ne fait pas un apport raisonnable de MO et de nutriments minéraux complémentaires pour compenser les exportations par les cultures et par l'élevage et les pertes par drainage et érosion. Au-delà de certains seuils de MOS, la structure du sol s'effondre, ce qui bouleverse rapidement le comportement du sol et des cultures.

Dans cette quatrième partie sont d'abord présentés deux études sur la création de champs cultivés dans des conditions de roches dures (granite, gneiss, cendres volcaniques indurées, marno-calcaires), six cas de sols complètement dégradés (vertisols, sols ferrugineux tropicaux) ou de vallons découpés par le ravinement. Ensuite, sont étudiés six cas de restauration de sols dégradés grâce à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

1. Dans les Monts Mandara au nord-ouest du Cameroun, les Mafa et les Mofou, sous la pression démographique (80 à 150 hab./km²), ont aménagé l'ensemble des versants en gradins isohypses renforcés par des murettes en blocs de granites pour infiltrer toutes les eaux de pluie (300 à 600 mm), les restituer progressivement dans les canaux drainés des bas-fonds où sont concentrées les cultures irriguées intensives sous un parc d'arbres soigneusement sélectionnés pour restituer des nutriments aux cultures. De plus dans les coulées de blocs, sont construites des murettes de roches derrière lesquelles sont accumulés les produits de l'altération des blocs de granite accélérée par le feu, le fumier, des racines et les feuilles d'arbres (*Acacia polyacantha* ou *albida*), diverses plantes fixant les blocs. Des cultures frugales adaptées à ces lithosols sableux (éleusine, mil, arachide, niébé) couvrent les sols et retiennent la terre qui évolue progressivement en champs cultivés (Seignobos et Tchotsoua). C'est l'intégration de divers aménagements hydrauliques, les apports de MO et les choix biologiques qui ont permis de lutter contre l'érosion sur ces pentes raides. Ce n'est pas toujours la forte densité humaine ni les fortes pentes qui entraînent le plus d'érosion, mais l'abandon des versants aménagés suite à l'émigration de la main-d'œuvre jeune.

2. Au nord du Mali, les Dogons se sont retranchés depuis le XIV^e siècle dans les falaises et le plateau de Bandiagara-Houmbori pour échapper aux conquérants musulmans et maintenir leur culture. Face aux difficultés du climat, à la pauvreté et au manque de terres cultivables, les Dogons ont développé des techniques de gestion de l'eau (cordons de pierres et mares de stockage) et de la fertilité des sols (fumier + arbres de restitution + buttes compostant les adventices). Ils ont aussi créé de nouveaux champs en apportant de la terre sur des dalles de grès à proximité de vallons où des petits seuils retiennent les eaux de nappe et de ruissellement. Sur ces surfaces ils ont délimité des « nids d'abeilles » (structures de 1 m²) où sont concentrés du sable, du fumier et les cultures maraîchères (en particulier, les oignons) irriguées à l'aide de calebasses. (Diallo, chap. 36)

3. Dans la zone soudano-sahélienne allant du Mali au Niger, pour résister à la sécheresse et à la pauvreté des sols, les paysans ont traditionnellement développé des micro-barrages perméables (cordons de pierres ou haies vives) pour ralentir les eaux de ruissellement et des techniques de stockage du ruissellement, des nutriments et des sédiments qu'elles véhiculent (paillis, zaï, cuvettes, demi-lunes, mares, diguettes dans les bas-fonds) (voir Roose *et al.*). Chacun de ces aménagements apporte sa contribution au développement de la végétation, au maintien de la nappe phréatique et à l'alimentation des troupeaux et des paysans. La technique traditionnelle du zaï mérite une mention spéciale, car elle a permis de récupérer des milliers d'hectares de terres complètement dégradées, de véritables déserts sur des glacis de faible pente recevant 400 à 800 mm de pluie en 5 mois. Il s'agit de creuser en saison sèche, des cuvettes (30 cm de diamètre et 10 à 20 cm de profondeur) tous les 80 à 120 cm en quinconce pour piéger le ruissellement, les sédiments et les nutriments véhiculés par l'érosion. Peu avant les premières pluies, le paysan enfouit dans ces cuvettes 1 à 3 t/ha de poudrette et une douzaine de graines de mil ou de sorgho (parfois du niébé).

Les galeries creusées par les termites transforment ces cuvettes en entonnoirs permettant d'infiltrer en profondeur l'humidité suffisante pour maintenir les jeunes semis pendant trois semaines de sécheresse. Les poudrettes apportent des graines d'adventices, mais aussi de légumineuses arbustives qui profitent de cette concentration en eau et nutriments pour croître à l'abri des tiges de sorgho : en trois ans, on peut ainsi reconstituer un système agro-sylvo-pastoral bien adapté au milieu semi-aride. Grâce aux poudrettes, on obtient dès la première année autant de grains que la moyenne régionale (600 à 800 kg/ha de grain) ; mais si on ajoute dans les cuvettes 30 kg de N et de P, on peut obtenir jusqu'à 1 500 kg de grain et 3 t de paille (dix fois le témoin). Protégés du ruissellement par des cordons pierreux et alimentés par le fumier, les résidus de culture et les feuilles des arbres, la restauration de la productivité de ces sols est durable depuis une trentaine d'années.

4. Dans l'altiplano du Mexique, se trouvent des sols sur cendres volcaniques composés de plusieurs horizons indurés, compacts, stériles et pauvres en nutriments. Suite à l'érosion, 31 000 km² de ces horizons affleurent et provoquent de graves problèmes agronomiques, environnementaux et sociaux. Ces tufs volcaniques imperméables et compacts peuvent être défoncés au bulldozer, affinés par un passage croisé de disques tractés à faible vitesse, enrichis en NPK associé à du fumier et semés en céréales et légumineuses. Au bout de 2 ou 3 ans le maïs et les haricots y donnent des rendements très honorables. Grâce au fumier et à l'enfouissement des résidus de culture, ces sols peuvent séquestrer près de 90 t de carbone par an qui pourraient aider les États à trouver le financement nécessaire au fractionnement du matériau de départ.

5. Au Mexique, dans l'État du Michoacán, 55 % des sols sont décapés par l'érosion et génèrent des inondations en aval. Un programme de recherche associant chercheurs, paysans et politiciens a développé un système de mise en valeur de ces terres arides dégradées comprenant des haies vives plantées en agaves pour ralentir le ruissellement et maintenir le sol, une plantation d'agaves pour produire du mezcal (alcool) associés à des arbres fruitiers et des herbes médicinales. L'ensemble de ces végétaux couvrent rapidement le sol et produit tous les 7 à 14 ans un revenu confortable qui permet aux paysans d'éviter de migrer pour subvenir aux besoins de leurs familles.

6. Dans le Haut Atlas au Maroc, s'observent le long des oueds, des séries de casiers entourés d'épis et de murettes de pierres où les paysans s'efforcent de « récupérer » les champs de la basse terrasse décapés lors de la dernière crue exceptionnelle. En amont vient une zone triangulaire captant les eaux et tous sédiments des crues normales. Ces eaux passent dans un deuxième casier où se déposent galets, sables et agrégats et se développent les premières touffes d'herbes et buissons sauvegardés. Dans le troisième casier, la pelouse est exploitée et les herbes enrichies en légumineuses captent des sédiments fins. Dès que ce sol alluvial atteint 20 centimètres d'épaisseur, il est labouré et semé en céréales et légumineuses (vesce avoine ou orge et trèfle ou luzerne). Une dizaine d'années plus tard, ce nouveau sol atteint 40 centimètres de profondeur

et se couvre d'arbres forestiers, fruitiers ou fourragers. Dès lors, il est couvert de sous-bois et protégé par les racines et souches des arbres. Ces sols sont ravagés par les crues exceptionnelles tous les 30 à 50 ans, mais les paysans reconstruisent courageusement les murettes, car les sols sont enrichis par les sédiments et nourris par la nappe et la fonte des neiges en été.

7. Dans les ravines des marnes de Draix, dans le sud des Alpes, une équipe de chercheurs de l'Irstea a suivi l'évolution de la végétation et du nouveau sol qui évolue au cours des cent premières années de la stabilisation des ravines. Au début de l'aménagement par des seuils, la végétation qui envahit le lit de la ravine est dominée par des graminées (> 60 %) et des arbustes (30 %). Au cours des cinquante années suivantes, les graminées diminuent pour laisser plus de place aux arbustes (35 %) et aux arbres (40 %).

Parallèlement, le sol s'enrichit en MO (de 0,7 à 4,5 %) et les amas sédimentaires deviennent plus stables et plus importants (de 0,8 à 2 mm de diamètre), tandis que le pH diminue légèrement montrant un début de décarbonatation au bout d'un siècle.

En conclusion, poussés par la croissance démographique, les paysans non seulement développent des cultures intensives (ex. oasis, cultures associées de légumineuses et de céréales, cultures maraîchères, vergers), mais inventent des systèmes ingénieux pour restaurer la production végétale et créer de nouveaux champs sur des terres incultes (ex. *tepetates* du Mexique, cendres des Canaries, cuirasses du Mali) soit en revitalisant les horizons stériles, tassés, encroûtés, dépourvus de MO, soit en fragmentant les horizons de cendres cimentées, les bancs calcaires en zones méditerranéennes, ou les blocs de granito-gneiss, soit en apportant le sable et les MO pour reconstituer un horizon humifère, soit en captant les sédiments transportés par l'érosion hydrique ou éolienne. L'association de techniques spéciales, d'apport de terre, d'eau, de MO et de nutriments et l'association de plantes adaptées permettent de reconstituer des sols capables de produire de façon rentable les cultures adaptées à ces milieux spéciaux en quelques années. La restauration de vieux sols dégradés et même la formation de jeunes sols sont possibles à court terme (1 à 5 ans), mais cela a un prix : du travail, des MO, des nutriments, de l'eau et des variétés cultivées bien adaptées.

8. Dans les collines semi-arides d'Haïti, un projet a adopté la même approche, mais de façon originale : au lieu de tenter de réduire d'abord l'érosion des versants, il a bloqué derrière de solides seuils cimentés le ruissellement et les sédiments humifères dans les vallons humides. À l'abri de ces seuils stockant les eaux précieuses pour l'irrigation et l'élevage, ce projet a développé une série de systèmes de production à la fois réduisant l'énergie du ruissellement (donc le ravinement) et rentabilisant le travail des paysans : cultures maraîchères devant les seuils, canne à sucre sur les colluvions de bas de pente, bananeraie avec sous-étages de légumes rapidement rentables, greffage d'arbres fruitiers, haies vives d'arbustes fourragers légumineuses, petit élevage transformant les résidus de culture en fumier, etc. Dans un deuxième temps sont organisés les versants

avec des arbres fruitiers en bas de pente, des bandes d'arrêt de cannes à sucre, des prairies améliorées sur les fortes pentes et des arbres à croissance rapide (seule énergie disponible) sur les sommets et les sols caillouteux.

9 à 12. Sur les sols ferrallitiques acides (ultisols) des hautes terres du Rwanda, du Burundi et de Madagascar, la productivité des terres diminue rapidement après défrichement, même avec l'apport de faibles quantités de fumier. Les chercheurs ont alors tenté de restaurer la productivité de ces sols pauvres soumis à des pluies abondantes (1 000 à 2 000 mm) en réintroduisant des arbres avec deux objectifs : d'abord réduire l'érosion sur les fortes pentes cultivées (parfois jusqu'à 40 à 80 %) et ensuite utiliser une partie de la biomasse produite pour restaurer la fertilité des sols (les haies sont des jachères permanentes, mais localisées). La plantation d'arbres isolés sur les champs ne suffit pas à réduire suffisamment le ruissellement et l'érosion sans l'appui de haies vives d'arbustes légumineuses plantées en courbe de niveau tous les 5 à 10 m. ($KR < 2\%$ et $E > 2\text{ t/ha/an}$ dès la deuxième année). En outre, la biomasse produite et taillée 3 à 4 fois par an remonte 105 kg d'azote, 5 à 10 kg de phosphore et 80 kg de $K + Ca + Mg$ par an. Les émondes peuvent servir de fourrage en saison sèche et de paillage au début des pluies. Les lignes d'herbes à croissance rapide sont encore plus efficaces la première année, mais épuisent rapidement les nutriments disponibles, disparaissent au bout de deux ans et ralentissent la croissance des arbustes destinés à transformer la pente en une série de terrasses progressives et durables. Cet aménagement est aussi efficace contre l'érosion qu'un bon paillage, mais ne suffit pas pour augmenter la production. Les essais de Rishirumuhirwa, Ndayizigiyé, König et les Malgaches démontrent que l'apport massif de fumier (10 t de MS/ha) permet d'atteindre 3 t de maïs-grain auquel il faut rajouter un complément d'azote et surtout de phosphate de calcium pour atteindre plus de 4 t/ha de maïs et nourrir la population très dense de ces régions. Les haies associées aux cultures associées et aux rotations avec des légumineuses, avec les pratiques agroforestières et aux apports systématiques de MO et nutriments minéraux permettent de restaurer durablement la productivité de ces terres acides. Il reste le problème de la maîtrise du pH. En dessous du seuil du pH de 4,8, l'aluminium des argiles devient échangeable et toxique pour plusieurs cultures vivrières. L'apport de dolomie ou de chaux n'a pas toujours amélioré la production végétale, mais l'apport de biomasse (fumier, compost, cendres, paillage des adventices) permet chez les paysans de maintenir le pH au-dessus de 5.

13 à 14. En milieu méditerranéen semi-aride du nord de l'Algérie ($P = 300$ à 600 mm), une équipe INRF + Univ + IRD a montré lors d'une enquête la faible efficacité des techniques mécaniques de terrassement (DRS) et la faiblesse de l'érosion en nappe par rapport au ravinement. Elle a testé sur 50 parcelles d'érosion de 100 à 460 mètres carrés des systèmes de culture ou de parcours améliorés avec deux objectifs : réduire les risques de ruissellement et d'érosion sur les pentes raides des montagnes et augmenter les revenus des paysans. Pour mieux couvrir le sol, les améliorations consistent à densifier les cultures, à réduire le travail du sol, introduire la fertilisation raisonnée, les cultures diverses

en rotation avec des légumineuses, l'enrichissement et la mise en défens des parcours. Dans une douzaine de grosses ravines sont comparés divers types de seuils et une collection d'espèces fourragères ou forestières (oasis linéaires). Non seulement l'intensification a réduit les risques d'érosion, mais elle a augmenté très significativement les revenus des paysans. Cette approche participative (la GCES) s'est montrée bien plus efficace que les interventions coercitives par les services de l'État (DRS). L'efficacité des techniques de CES traditionnelles ont été évaluées en moyenne montagne.

En conclusion, dès que les sols sont suffisamment fertiles, ils doivent être couverts par une végétation dense, entretenus par apport de MO et les cultures intensifiées par l'apport d'un complément minéral qui augmente la biomasse disponible pour l'élevage et l'entretien de l'humus. Comme les terres dégradées sont abondantes, on choisit d'abord de valoriser au mieux les meilleures terres, de capter le ruissellement et les sédiments fertiles, de les stabiliser en les couvrant (cultures associées ou litières de résidus), de développer la biomasse avant d'entamer la stabilisation des versants en fonction de leur potentiel de production et des risques d'érosion ou de dégradation encourus. Cette démarche, appréciée des paysans car elle produit rapidement des revenus, inverse les priorités des techniques classiques de CES/DRS qui visaient d'abord la protection des zones érodées produisant le plus de sédiments. On peut alors espérer que les gestionnaires des terrains de montagne respecteront les aménagements antiérosifs, car ils sont les garants de l'intensification du développement rural.

Conclusion générale

Six règles à respecter pour restaurer la productivité des sols

Éric ROOSE

D'après GUILLOU et MATHERON (2011), la population mondiale atteindrait 9 milliards de personnes à nourrir à l'horizon 2050. Non seulement ce défi de la lutte contre la faim renvoie à la pauvreté des pays tropicaux en développement, mais aussi aux techniques rudimentaires de production et à la dégradation généralisée des sols surexploités.

Trente années après le lancement en Inde de la « Révolution verte » qui consiste en un usage intensif d'intrants et de « techniques modernes », le bilan est mitigé. Après avoir augmenté très nettement la production agricole au niveau mondial, on s'aperçoit que les résultats de cette Révolution verte ne sont pas partout excellents. Les petits paysans se sont ruinés pour investir dans les engrais, les pesticides et les semences vendus par de grosses sociétés étrangères : ils ont dû emprunter et n'ont pas pu rembourser leurs dettes suite à des années sèches ou à la pullulation d'insectes ou de maladies. Ils ont alors été dépouillés de leur terre ancestrale et se retrouvent à l'état d'ouvriers au service des gros propriétaires, ou à l'état de migrants habitant des bidonvilles à la recherche d'un travail. Les famines ont refait surface, car ces pauvres n'ont pas les moyens d'acheter la nourriture produite en surabondance dans certaines régions des pays riches.

Devant les dégâts causés aux sols (érosion des terres fragiles dénudées, pollution des eaux ou acidification des sols surexploités, soumis aux engrais minéraux acides) et aux sociétés agraires (regroupements des terres, abandon des petits paysans, faillites des exploitations valorisant la polyculture familiale), des voix se sont exprimées pour revenir à la production d'aliments sains, produits à la ferme familiale avec le minimum d'intrants, recyclant indéfiniment les résidus des cultures et de l'élevage, alternant des cultures exigeantes et

d'autres plus résistantes, fixant l'azote de l'air ou récupérant les nutriments lixiviés grâce à un enracinement profond (agroforesterie), améliorant la structure du sol grâce à des cultures fourragères. L'agriculture bio, qui produit moins abondamment et exige beaucoup d'efforts, progresse doucement parmi les populations des pays riches soumises au stress des villes trépidantes : pour se protéger des multiples cancers et autres maladies propres aux pays développés, les populations aisées n'hésitent pas à payer 30 à 50 % plus cher pour consommer des aliments moins pollués. Actuellement, l'agriculture bio n'occupe que quelques pourcentages du marché alimentaire, ce qui lui permet de concentrer sur de petites surfaces la biomasse et les nutriments collectés ailleurs sur le terroir (transfert de fertilité). On n'a pas encore assez de recul pour faire une évaluation de ses conséquences sur l'épuisement des sols agricoles et des parcours.

L'agriculture de conservation (AC) est une autre tentative pour réduire l'érosion des sols en imitant le système forestier qui puise en profondeur les nutriments qui ont échappé aux racines superficielles des cultures annuelles et concentre à la surface du sol la litière, le carbone et les nutriments. Elle consiste essentiellement à réduire le travail du sol, à semer directement sous une litière de résidus des cultures précédentes, à maintenir le sol couvert soit par des plantes de couverture en rotation avec la culture principale, soit par des cultures dérobées semées entre les lignes de la culture principale, à introduire des rotations comprenant des légumineuses à enracinement profond pour ramener en surface les nutriments entraînés par les eaux de drainage et l'azote de l'air, réduisant la pression des adventices par le paillage et les herbicides.

La nouvelle Révolution verte des OGM (FOLGER, 2014). Entre les années 1960 et 1990, le rendement du blé et du riz a doublé en Asie, alors que la population a augmenté de 60 % : le prix du blé a chuté et le taux de pauvreté a été divisé par deux. Pour continuer à nourrir le monde, il faudrait une autre Révolution verte d'ici 2050. Deux conceptions s'opposent sur les moyens pour y parvenir. L'une poursuit le travail de Borlaug au moyen des OGM et des technologies modernes (dont les semences OGM et les herbicides Roundup de Monsanto) : 28 pays acceptent les OGM et les ont plantés sur 11 % des terres cultivées. Environ 90 % du maïs, du coton et du soja produits aux USA sont génétiquement modifiés. Mais en Europe et en Afrique, les débats sur les effets des OGM sur la santé et l'environnement font obstacle à leur utilisation.

Parallèlement, se développent des réflexions et des expérimentations sur l'agro-écologie. Il s'agit de réconcilier économie rurale et environnement (BRUN, 2014) :

- de nourrir une population urbaine croissante et pauvre ;
- de produire durablement des quantités importantes de produits agricoles en respectant les équilibres des cycles bio-géo-chimiques et la dynamique des nutriments observés en milieu naturel ;
- de créer des conditions favorables aux cultures sans découvrir le sol au point de créer des problèmes d'érosion ou de dégradation ;

- d’entretenir des conditions favorables à l’enracinement profond (comme celui des arbres) ;
- d’entretenir la diversité biologique pour maximiser les synergies entre les espèces cultivées (cultures associées, rotations, plantes de couverture, légumineuses et céréales, haies vives, arbres fruitiers, plantes fourragères et/ou forestières), de valoriser les relations élevage-agriculture ;
- de réduire les gaz à effet de serre en les séquestrant dans la MO du sol ou dans les arbres (bois énergie, bois d’œuvre, bois noble). Le concept d’agroécologie est né dans les années 1930, mais en l’an 2000 certains experts s’intéressent aux liens entre agriculteurs, consommateurs, ressources naturelles et agricoles bref aux systèmes alimentaires. L’agroécologie est devenue en Amérique latine un mouvement social d’agriculteurs et d’ONG en opposition à l’agriculture industrielle capitaliste. L’agroécologie se base sur cinq principes :
- la compréhension des agrosystèmes ;
- le recyclage de la biomasse et l’équilibre des flux des nutriments ;
- la sauvegarde du sol et de ses matières organiques ;
- la réduction des pertes grâce à la gestion des eaux et la couverture du sol ;
- le renforcement des interactions biologiques (ALLAVERDIAN *et al.*, 2014).

Bref produire plus et mieux (LEFOLL, 2014).

C’est aussi l’objectif de l’agriculture raisonnée qui cherche à répondre aux besoins des cultures en vue d’une production intensive, mais durable en recherchant les techniques les mieux adaptées à l’environnement, réduisant au minimum l’usage des pesticides et des engrais minéraux. C’est dans cette démarche que s’inscrit cet ouvrage qui rassemble une quarantaine de chapitres relatant des recherches sur la gestion conservatoire de l’eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), analysant leur efficacité en divers milieux tropicaux ou méditerranéens, non seulement au niveau des parcelles, mais englobant aussi les parcours en zones non labourables (sommets caillouteux), les ravines et les zones alluviales des oueds.

L’analyse des causes de dégradation de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens a montré l’importance de l’érosion, en particulier l’érosion en nappe sélective des particules légères, les plus fertiles, et du déséquilibre entre la restitution de biomasse au sol et la vitesse de minéralisation de l’humus dans les milieux chauds et humides.

Après un long parcours parmi les diverses techniques proposées par une centaine d’auteurs pour lutter contre la dégradation des terres et pour la restauration de la productivité des sols, il paraît clairement qu’il n’existe pas de solution unique ni de recette universelle pour valoriser la terre et le travail de façon optimale et acceptable par les paysans.

Quatre conclusions partielles se dégagent des études de cas présentées.

– Ni tout engrais minéral comme dans la Révolution verte. La disparition des MO du sol, l'érosion sélective, la lixiviation des éléments dissous et son acidification par l'apport de sels d'acides forts entraînent une dégradation de la structure du sol et une perte d'énergie vitale du monde vivant qui l'habite.

– Ni tout fumure organique comme en agriculture biologique. Même sur de petites surfaces, et à fortiori à l'échelle du terroir ou du monde, la biomasse est trop peu disponible et reflète les carences des sols. Si le sol est carencé, les plantes le seront aussi, de même que le compost et le fumier. Il faut donc optimiser la production de biomasse, la valoriser au mieux et compléter l'apport indispensable de matières organiques diverses par des compléments minéraux équilibrant raisonnablement les pertes minérales et organiques observées au niveau du terroir par l'exportation des récoltes (grains et pailles), le lessivage par les eaux de drainage et par l'érosion.

– Pas seulement la conservation de l'eau et des sols (CES). La lutte conventionnelle contre le ruissellement et l'érosion de la masse des sols (la CES) ralentit la dégradation des sols, mais ne restaure pas leur potentiel de productivité : les nutriments érodés, les MO minéralisées ou décapées ont déjà quitté les sols dégradés par l'érosion, la lixiviation et la minéralisation microbienne. Après avoir organisé des structures pour garder le sol en place et des techniques de travail du sol pour réduire le ruissellement, il faut encore revitaliser la couche superficielle du sol (structure, porosité, capacité de stockage de l'eau et des nutriments) par des apports de matières organiques, des microbes, du mycélium, des mycorhizes et la mésafaune et procurer aux plantes les nutriments complémentaires pour aider la production de biomasse à son niveau optimum.

– Enfin la lutte contre l'érosion et la restauration des sols n'est pas seulement un problème technique, mais aussi un problème humain complexe. En Afrique, la terre n'appartient pas nécessairement à celui qui la valorise. Traditionnellement, le terroir appartient à quelques familles fondatrices du village et la terre est « prêtée » par le chef de terre à ceux qui le demandent, jusqu'à son abandon à la jachère. Si la récolte appartient à celui qui a cultivé la parcelle, sitôt la récolte effectuée, le bétail de la communauté peut brouter les résidus de culture (droit de vaine pâture). Et les fruits des arbres (karité, néré, etc.) appartiennent souvent à diverses femmes. On voit la difficulté de vulgariser l'agroforesterie ! Il y a donc des problèmes fonciers à résoudre d'autant plus que les États africains ont décrété qu'ils étaient propriétaires de toute terre non valorisée (d'où des contrats de location pour 99 ans à des sociétés étrangères, sans compensation aux utilisateurs traditionnels).

L'analyse des résultats présentés dans 48 chapitres et les observations sur diverses techniques traditionnelles de restauration des sols par les paysans africains – en particulier le zaï – nous amènent à présenter six règles à observer simultanément pour obtenir la restauration rapide de la productivité des sols dégradés. Ces règles se déclinent en aménagements hydrauliques, en techniques culturales et en mode de fumure selon le climat régional.

Organiser des structures de gestion de l'eau et de lutte antiérosive adaptées au climat

En milieu aride (désert et steppes non cultivables, pluies < 300 mm) : élevage extensif sur les collines (boulis, citernes et mares piégeant l'eau pour le bétail) et cultures intensives localisées près des sources (terrasses irriguées et fumées) et dans les oasis (3 étages de végétations adaptées : arbres dominants, arbustes fruitiers, cultures de céréales, de légumineuses et de fourrages sur des planches irriguées et fumées). Protection contre l'érosion éolienne (brise-vents) et épandage des crues (seuils sur les oueds et canalisation des eaux strictement partagées entre les propriétaires).

En milieu semi-aride (sahel, pluies de 300 à 600 mm) : capturer le ruissellement des collines dans des canaux, puis aux champs dans des cuvettes (*microcatchment*, zaï, billons cloisonnés, demi-lunes) et la rugosité de la surface du sol, construire des petits barrages et des citernes dans les ravines et prévoir l'écoulement des excès vers le réseau de drainage (ROOSE *et al.*, 2010).

En milieu semi-humide (zone soudanienne : pluies de 700 à 1 200 mm avec une saison sèche) : protéger la surface du sol (litières, plantes de couverture, cultures associées à cycle court) et prévoir des chemins d'eau (aménager les ravines) et des barrières perméables (bandes enherbées, haies vives, lignes d'arbres, paysage de bocage) pour ralentir les crues lors des pluies intenses.

En milieu temporairement très humide (cyclones, pluies cévenoles, tempêtes tropicales) : couvrir le sol par un paillage de résidus de cultures, des plantes de couverture, l'agroforesterie, réaliser des barrières semi-perméables, terrasses, cordons de pierres, haies vives.

Sans ces pièges et ces freins, le ruissellement emporterait la fumure et empêcherait l'intensification.

En milieu hyper humide (forêt dense, pluies de 1 800 à > 2 500 mm), préserver la couverture du sol par une litière de résidus de culture, culture de couverture légumineuse, organiser le drainage des excès de pluie à travers des barrières perméables, favoriser le cloisonnement du paysage en bocage, éviter de travailler le sol (système de semis sous couverture végétale) et d'épandre les fumures organiques ou minérales (fractionnement) durant les périodes les plus humides, lutter tant contre l'érosion que contre l'acidification des sols et la lixiviation des nutriments.

Décompacter, ouvrir la macroporosité du sol pour améliorer la circulation de l'air et de l'eau

- Casser les couches indurées et les croûtes superficielles pour améliorer l'infiltration.
- Travailler aux dents localisées sur les lignes de plantation pour favoriser l'enracinement profond.
- Stabiliser la structure du sol par l'apport de MO, chaux, dolomie ou gypse.
- Une fois la porosité rétablie, un système de travail du sol limité à la ligne de plantation, et le semis sous litière (SCV) peuvent entretenir une bonne infiltration.

Revitaliser le sol

L'apport de paille ou de biomasse à rapport C/N élevé dans un sol dégradé entraîne forcément une faim d'azote pour les cultures car devant la masse de carbone enfouie, les microbes réquisitionnent tout l'azote disponible et ne le restitueront que quelques mois plus tard, au moment de la minéralisation des MO du sol généralement trop tard pour que les jeunes plantules en profitent. Par ailleurs, le décapage de l'horizon humifère et l'érosion sélective appauvrissent fortement la surface du sol en MO et en microbes. Il est donc profitable d'enfouir le fumier ou le compost riches en microbes transformant rapidement les matières carbonées en humus. Ces microbes sont par ailleurs indispensables pour améliorer l'assimilabilité des minéraux du sol (en particulier, les phosphates). L'apport de mycorhizes et de plantes fixatrices de l'azote de l'air peut participer à la disponibilité en nutriments dans les sols.

Corriger le pH

Le pH optimum est situé entre 5 et 7,5. Au-dessous du pH 4,8, l'aluminium des argiles devient échangeable et toxique. Au-dessus de 8, le phosphore forme des sels peu solubles avec le calcium, le fer et l'alumine. L'apport massif de chaux sur un sol pauvre, sableux, entraîne souvent des déséquilibres entre les ions qui sont nocifs à la production végétale. Traditionnellement, les apports progressifs

de biomasse (récoltée le long des pistes, mauvaises herbes des champs ou des forêts) arrivent à améliorer le pH de l'horizon superficiel en quelques campagnes par transfert de fertilité.

En zone semi-aride, le pH a tendance à être élevé bloquant divers oligoéléments et les phosphates. Par contre en zone humide ou à fort drainage pendant la saison des pluies, le pH du sol a tendance à s'acidifier : les pertes en bases par exportation des pailles et par drainage et érosion doivent être compensées par des apports de biomasse, de chaux ou de calcaire/dolomie concassés.

Nourrir les plantes cultivées

Il est difficile et coûteux de corriger les carences du sol et de restituer au sol tous les nutriments qui s'y trouvaient avant défrichement. En effet, les capacités de stockage des engrais par les sols (peu de MO et argile kaolinitique) et les risques de lixiviation et d'érosion sont énormes en régions tropicales et méditerranéennes, vu le volume du drainage et l'énergie des pluies tropicales. Par contre, il est important d'offrir aux plantes cultivées les nutriments indispensables à leur croissance en quantités et aux moments voulus en fonction des cultures, des pluies et des objectifs de production. Le sol et les MO en décomposition vont livrer progressivement les nutriments qu'ils contiennent, mais pour optimiser les effets des autres interventions, il convient d'apporter des compléments minéraux fractionnés en fonction des risques de lixiviation et des besoins physiologiques de chaque groupe de plantes. Trois éléments majeurs sont à surveiller. La potasse manque surtout en zones humides et sableuses : la carence potassique est moins souvent manifeste en zone semi-aride où le drainage est moins abondant. L'azote et le phosphore sont carencés presque partout dans les sols africains. L'azote peut être apporté par la culture associée de légumineuses, encore faut-il que le pH ne soit pas trop acide et que le phosphore soit suffisamment disponible. Le phosphore est souvent abondant sous des formes très peu solubles en relation avec le fer et l'alumine libres dans les sols ferrugineux et ferrallitiques et piégés dans les roches calcaires. Le débit de phosphore assimilable est très souvent trop faible pour assurer la demande des végétaux. Or il y a peu de phosphore dans les minéraux et les roches de phosphate de calcium sont localisées dans les zones d'évaporation des mers anciennes (Maroc, Sénégal, Togo, Burkina, etc.) : leur traitement demande un broyage très fin et une attaque aux acides. Localement, les phosphates broyés sont mélangés au fumier en fumure de fond.

Favoriser la biodiversité et la production d'une abondante biomasse

L'intensification de la production du sol appelle une plantation hâtive, dense, associant céréales et légumineuses et/ou agroforesterie, le choix d'espèces à forte production de biomasse, à développement vigoureux, mais pas invasive, d'espèces sélectionnées localement pour leur résistance aux maladies et prédateurs et pour leurs usages multiples. On peut remarquer que les populations rurales les plus denses du monde vivent dans des zones aménagées en parcs multi-étagés sur de petites parcelles fumées et irriguées (Rwanda, Burundi, Indonésie, Japon, etc.).

Globalement, cet ouvrage porte un message positif. Pas mal de sols dégradés peuvent être restaurés, non pas pour revenir au stade original des écologues, mais au moins à leur capacité à produire les cultures les plus demandées en un laps de temps très acceptable (un à trois ans). Mais cela a un coût : du travail, de la biomasse et des compléments d'engrais minéraux. Or le phosphore risque de manquer à moyen terme, si la production végétale doit être intensifiée pour répondre à la croissance démographique et si on ne découvre pas de nouvelles réserves (HINSINGER, chap. 26).

Bibliographie

ALLAVERDIAN C., FERRAND P., KIBLER J.-F., REYNAUD L., 2014 – L'agroécologie, un concept pour une diversité d'approches. *Grain de Sel*, 63-66 : 6-7.

BRUN G., 2014 – L'agroécologie, un projet politique pour l'agriculture française. *Grain de Sel*, 63-66 : 5.

FOLGER T., 2014 – La nouvelle révolution verte. *National Geographic Magazine*, 10 : 55-75.

GUILLOU M., MATHERON G., 2011 – *Neuf milliards d'hommes à nourrir en 2050 : un défi pour demain*. Paris, Édit. François Bourin, 425 p.

LEFOLL ST., 2014 – L'agroécologie est la réponse à l'enjeu de produire plus avec moins. *Grain de Sel*, 63-66 : 4.

ROOSE É., SABIR M., LAQUINA A., 2010 – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Marseille, IRD Éditions, 343 p.

ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2012 – Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 19 p.

Les auteurs

Alain Albrecht

pédologue, chercheur,
IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
alain.albrecht@ird.fr

Nicolas Andriamampianina

forestier, chercheur,
centre national
de recherche
pour le développement rural
(Fofifa),
département de recherche forestière et
piscicole,
université d'Antananarivo, Madagascar.

Edmond Andriambelomanga

géographe, enseignant chercheur,
faculté des lettres et sciences humaines,
département de géographie, université
d'Antananarivo, Madagascar.
eandriambelo@gmail.com

Mparany Andriamihamina

géographe, enseignant chercheur,
faculté des lettres et sciences humaines,
département de géographie, université
d'Antananarivo, Madagascar.

Mourad Arabi

géographe, chercheur GCES,
INRF, Ain Dheb,
Medea, Algérie.
almouraddz@yahoo.fr

Christine Aubry

chercheuse,
Inra, UMR SADAPT AgroParisTech
Paris, France.
christine.aubry@agroparistech.fr

Anastase Azontonde

agronome, chercheur,
LSSEE, Cotonou, Bénin.
anastase12000@yahoo.fr

Aurelio Báez

Inifap, Campo exp. Bajío, Celaya, Gto,
Mexique.
baez.aurelio@inifap.gob.mx

Bernard Barthès

pédologue, chercheur,
IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
bernard.barthes@ird.fr

Thierry Becquer

pédologue, géochimiste,
IRD, UMR Bio&Sol,
Montpellier, France.
thierry.becquer@ird.fr

Paul Belchi

enseignant-chercheur,
AgroParisTech,
Paris, France.
paul.belchi@agroparistech.fr

Malika Benmansour

chercheur hydrologie,
université de Tlemcen,
Tlemcen, Algérie.
malika_mazour@yahoo.fr

France Bernhard-Reversat (décédée)

botaniste, écologiste, chercheur,
Paris, France.

Alphonse Bilgo

chercheur,
Inera GRN/SP,
Ouagadougou, Burkina Faso.
a.bilgo@agrhyment.ne

Franck Bisiaux

chercheur, fondation Hanns Seidel,
Kinshasa,
République Démocratique du Congo.
mampu.fhs@gmail.com

Melchior Bizimana (décédé)

Chercheur forestier,
Institut de sciences agronomiques du Burundi,
Bujumbura.

Éric Blanchart

chercheur en écologie du sol,
IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
eric.blanchart@ird.fr

Zachée Boli

agropédologue, expert,
bureau d'études pédologiques,
Irad, Yaoundé, Cameroun.
z.boli2008@yahoo.fr

Lakhdar Bourougaa

géographe, chercheur GCES,
INRF, Ain Dheb,
Medea, Algérie.
blakhdar03@gmail.com

Ibrahim Bouzou-Moussa

géographe, enseignant-chercheur,
faculté des lettres,
université de Niamey,
département Géographie, Niger.
ibrahimoussabouzou@gmail.com

Khalef Brahamia

géographe, enseignant-chercheur,
université Badji Mokhtar, Aménagement du
Territoire,
Annaba, Algérie.

Michel Brochet

ingénieur général Gref honoraire,
conseiller projet Gros Morne, Castelnau-le-
Lez, France.
mibrochet@wanadoo.fr

V. Byizigiro

enseignant,
Kigali Institute of Education,
Kigali, Rwanda.
bolides72@yahoo.fr

Lauric Cécillon

chercheur,
Irstea, UR EMGR Écosystèmes montagnards,
Saint-Martin-d'Hères, France.
lauric.cecillon@irstea.fr

Lydie Chapuis-Lardy

chercheuse, IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
lydie.lardy@ird.fr

Saintil Clossy

Ingénieur génie civil, responsable des
chantiers de Gros Morne,
Port-au-Prince, Haïti.
clossying@yahoo.fr

Drissa Diallo

pédologue, enseignant-chercheur,
institut polytechnique rural (IPR)
de Katibougou,

Koulikoro, Mali.

drdiallo@ird.fr

Francisco Díaz

agro-pédologue, chercheur-enseignant,
département des sciences du sol et géologie,
faculté de biologie,
université de La Laguna,
Tenerife, îles Canaries, Espagne.
francisco.diaz@lalaguna.univ.es

Jean-Marie Douzet

agronome, chercheur,
Cirad, département Persyst,
UR SCA,
Montpellier, France.
jean-marie.douzet@cirad.fr

Émilien Dubiez

forestier, chercheur,
Cirad, UPR BSEF,
Montpellier, France.
emilien.dubiez@cirad.fr

Hervé Duchaufour

Agro-pédologue,
ambassade de France à Antananarivo.
herve.duchaufour@wanadoo.fr
herve.duchaufour@coopuniv-frmg.org

Patrick Dugué

agronome, chercheur,
Cirad, UMR Innovation,
Meknes, Maroc.
patrick.dugue@cirad.fr

Robin Duponnois

microbiologiste, chercheur,
IRD, laboratoire des symbioses tropicales et
méditerranéennes (LSTM),
Montpellier, France.
robin.duponnois@ird.fr

Amandine Erktan

post-doctorante,
Irstea, UMR Amap
Montpellier, France.
amandine.erkтан@gmail.com

Jorge D. Etchevers

agronome, chercheur,
Colpos, Lab Fertilidad Suelos, Montecillo,
Edomex, Mexique.
jetchev@colpos.mx

Pascal Jouquet

bio-pédologue, chercheur,
IRD,

UMR IEES, biophysique,
Bondy, France.
pascal.jouquet@ird.fr

Jean-Luc Farinet
chercheur, élevage,
Cirad, UR Recyclage et risque,
Montpellier, France.
jean-luc.farinet@cirad.fr

Christian Feller
sénior, pédologue, Dir. émérite,
IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
christian.feller@ird.fr

Clément Forkong Njiti
forestier, chercheur
Irad, Garoua, Cameroun.
cfnjiti@yahoo.co.uk

Claudine Franche
chercheuse,
IRD, UMR Diade,
Montpellier, France.
claudine.franche@ird.fr

Vincent Freyon
forestier, chercheur,
Cirad, UPR BSEF,
Montpellier, France.
vincent.freyon@cirad.fr

Juan F. Gallardo
géographe, chercheur,
CSIC, IRNASa,
Salamanca, Espagne.
juanf.gallardo@csic.es

Francis Ganry
agronome, sénior Cirad
Montpellier, France.
francis.ganry@cirad.fr

L.D. Gbaraneh
chercheur,
dept. of Crop/Soil Science,
Rivers State University of Science and
Technology,
Port Harcourt, Nigeria.

Hubert Guerin
Agronome zootechnicien, chercheur,
Cirad, UMR Selmet (Systèmes d'élevage
méditerranéens et tropicaux),
Montpellier, France.
hubert.guerin@yahoo.fr

Abdelkrim Hamoudi
forestier, chercheur,
INRF, Cheraga, Alger.
morbinrf@yahoo.fr

Jean-Michel Harmand
agroforestier, chercheur,
Cirad, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France,
Icraf, World Agroforestry Center,
West and Central Africa Regional Office,
Yaoundé, Cameroun.
jean-michel.harmand@cirad.fr

Edmond Hien
agropédologue, enseignant-chercheur,
UMR Eco&sol, université de Ouagadougou,
UFR SVT,
Burkina Faso.
edmond.hien@ird.fr

Philippe Hinsinger
chercheur,
Inra, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
philippe.hinsinger@supagro.inra.fr

S. Houot
Inra,
UMR EGC AgroParisTech Grignon, France.
houot@grignon.inra.fr

Felix Ikpe
agro-pédologue, chercheur,
Dept. of Crop/Soil Science, Rivers State
University of Science and Technology,
Port Harcourt, Nigeria.
fnikpe@yahoo.com

Conception Jiménez
agro-pédologue, chercheur,
département des sciences du sol et géologie,
faculté de biologie,
université de La Laguna, Tenerife, îles
Canaries, Espagne.
conception.jimenez@lalaguna.univ.es

Pascal Jouquet
bio-pédologue,
chercheur en écologie du sol,
IRD, UMR Bioemco,
équipe Transferts,
Bondy, France.
pascal.jouquet@ird.fr

Oum El khir Kedaid
chercheuse, CES
(conservation de l'eau et des sols),

INRF, Médea,
Ain Dheb, Algérie.
kedaid2@yahoo.fr

Benoît-Bounmanh Khamsouk
agronome, post-doctorant, expert,
Cirad, Ville Nouvelle,
Meknès, Maroc.
benoit.khamsouk@gmail.com

Dieter König
géographe, professeur-chercheur,
département de géographie,
université de Koblenz,
Koblenz, R.F.A.
dkoenig@uni-koblenz.de

Ernest Kouakoua
post-doctorant,
IRD Montpellier, France.
ernest.kouakoua@ird.fr

Charles Lilin
Ingénieur gén. Gref honoraire,
Montpellier, France.
charles.lilin@free.fr

Jean-Noël Marien
forestier, chercheur,
Cirad, UPR BSEF,
Montpellier, France.
jeannoel.marien@yahoo.fr

Alejandro Martínez Palacios
forestier, chercheur,
UMSNH, Instituto de Investigaciones
Agropecuarias y Forestales (IIAF),
Morelia, Mich., Mexique.
apalacios56@gmail.com

Dominique Masse
agro-pédologue, chercheur,
IRD, UMR Eco&Sols,
Montpellier, France.
dominique.masse@ird.fr

Mohamed Mazour
Professeur-chercheur
en hydrologie et CES,
centre universitaire de Aïn Temouchent,
Algérie.
mohamed_mazour@yahoo.fr

Nadia Mededjel
pédologue, chercheur,
INRF, Mansourah
Tlemcen, Algérie.

Canisius Mikokoro
chercheur forestier,
Institut de sciences agronomiques du Burundi,
Bujumbura.

Jan Moeyersons
géographe physicien, retraité,
Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren,
Belgique.
jan.moeyersons@africamuseum.be

Boutkhil Morsli
agropédologue, chercheur en CES
(conservation de l'eau et des sols),
INRF, Mansourah Tlemcen, Algérie.
morsli_boutkhil@yahoo.fr

Rachid Mrabet
agro-pédologue, enseignant-chercheur,
Inra, Tanger, Maroc.
mrabet@inra.org.ma

L. Nahimana
géologue, chercheur,
université du Burundi,
département géologique,
Bujumbura, Burundi.
lnahimana@yahoo.fr

François Ndayizigiye
géographe, professeur-chercheur en GCES,
département géographie,
Massey College,
University of Toronto,
États-Unis.
ndafranco@gmail.com

M. Ndiénor
agronome, fertilité des sols

Ndeye Yacine Badiane Ndour
microbiologiste, pédologue,
Isra, LNRPV, Centre Bel Air,
Dakar, Sénégal.
yacine.ndour@ird.fr

D. Nkurunziza
géologue,
ministère de l'Énergie et Mines, Bujumbura,
Burundi.
byrutazuyaza@yahoo.fr

Jean de Dieu Nzila
agr-pédologue, chercheur-enseignant,
École normale supérieure (ENS), Brazzaville,
Congo.
jddnzila@yahoo.fr

Jean-Pierre Olina

agronome, chercheur,
Irad, station polyvalente de Garoua, Cameroun.
olina_jp@hotmail.fr

Robert Oliver

agro-pédologue, chercheurs,
senior Cirad,
Cirad, UPR Recyclage et risques,
Montpellier, France.
rlaoliver@free.fr

Michel Omoko

pédologue, enseignant-chercheur,
université de Dschang, Fasa, département
des sciences du sol, Dschang, Cameroun.
omokomich@yahoo.fr

Juliana Padilla

agro-pédologue, chercheur,
Colpos, Lab Fertilidad Suelos, Montecillo,
Edomex, Mexique.
jpadic@colpos.mx

Lise Paresys

agronome,
UPR Cirad, UR Hortsys, AfricaRice and
Farming systems ecology group,
Wageningen UR, Bénin.
lise.paresys@wur.nl

Régis Peltier

forestier, chercheur,
Cirad, UPR BSEF,
Montpellier, France.
regis.peltier@cirad.fr

Christian Prat

agropédologue, chercheur,
IRD, laboratoire population, environnement,
développement (LPED),
université Aix-Marseille,
Marseille, France.
christian.prat@ird.fr

Lilia Rabeharisoa

agro-pédologue, chercheuse,
université d'Antananarivo,
LRI (laboratoire des radio-isotopes),
Antananarivo, Madagascar.
lrabehar@refer.mg

Tovonarivo Rafolisy

agronome, chercheur,
université d'Antananarivo,
LRI (laboratoire des radio-isotopes),
Antananarivo, Madagascar.
Tovonarivo.rafolisy@ird.fr

Jean-Chrysostôme Randriamboavonjy

agronome, enseignant-chercheur,
École supérieure des sciences agronomiques,
département forêt,
université d'Antananarivo, Madagascar.

Simone Ratsivalaka

géographe, enseignante-chercheuse,
faculté des lettres et sciences humaines,
département de géographie, Ankatso,
université d'Antananarivo, Madagascar.
baratsiv@wanadoo.mg

Marie-Antoinette Razafindrakoto

agronome, pédologue, enseignante-chercheuse,
dépt. Eaux et Forêts, École supérieure des
sciences agronomiques,
université d'Antananarivo, Madagascar.
maria-razaf@refer.mg

N.-C. Razafindramanana Rakotoniaina

agropédologue, chercheur,
École supérieure des sciences agronomiques,
université d'Antananarivo, Madagascar.
cnoroso_00389@yahoo.fr

Marine Rétif

Agronome,
AFD, Agence de Guinée,
BP 283 Conakry, Guinée.
marine.retif@gmail.com

Freddy Rey

forestier, chercheur,
Irstea, UR EMGR Écosystèmes montagnards,
Saint-Martin-d'Hères, France.
freddy.rey@irstea.fr

Eduardo Ríos Patrón

Semarnat Delegación Michoacán, Unidad de
Planeación y Política Ambiental,
Morelia, Mich., Mexique.
eduardo.rios@semarnat.gob.mx

Théodomir Rishirumuhirwa

enseignant-chercheur,
dir. de laboratoire,
Iraz, Kinindo,
Bujumbura, Burundi.
agrobiotec2002@yahoo.fr

Éric Roose

agro-pédologue, chercheur,
DR. émérite,
IRD, UMR Eco&Sol,
Montpellier, France.
Eric.Roose@ird.fr

Cornelia Rumpel

agronome, chercheure,
CNRS, université Paris VI, Bioemco,
Thiverval-Grignon, France.
cornelia.rumpel@grignon.inra.fr

Mohamed Sabir

professeur-chercheur en agroforesterie et CES,
École nationale forestière d'ingénieurs (Enfi),
Tabriquet, Salé, Maroc.
miloudsaadia@hotmail.com

Walere Sahani

université du Rift, Butembo,
République Démocratique du Congo.
sahaniwalere@yahoo.fr

Emmanuel Seh Ngounagronome

forestier, chercheur,
Cresa, Forêt-Bois-Environnement, Nkolbisson,
Yaoundé.
rockgroup2005@yahoo.fr

Christian Seignobos

géographe, sénior IRD,
IRD, UMR Dynamiques socio-
environnementales et gouvernement des
ressources, Montpellier, France.
christian.seignobos@wanadoo.fr

Thomas Francis Shaxson

agronome, expert en CES,
FAO Rome, Greensbridge, Winterborne
Kingston, Dorset, UK.
francisshaxson@btinternet.com

Serge Simon

agronome,
Cirad, représentation de l'Afrique centrale.
serge.simon@cirad.fr

Léo Stroosnijder

agro-pédologue,
Univ. Dept. Soil Physics., Wageningen,
The Netherlands.
leo.stroosnijder@wur.nl

Michel Tchotsoua

géographe, enseignant-chercheur,
département de géographie,
université de Ngaoundéré, Cameroun.
tchotsoua@yahoo.fr

Marisa Tejedor

agro-pédologue, senior,
département des sciences du sol et géologie,
faculté de biologie,
université de La Laguna, Tenerife, îles
Canaries, Espagne.
Marisa@lalaguna.univ.es

Laurent Thuriès

agro-pédologue,
chercheur,
Cirad, UPR Recyclage et risque, station de La
Bretagne,
Saint-Denis, la Réunion.
laurent.thuries@cirad.fr

Philippe Trefois

musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren,
Belgique.
Philippe.trefois@africamuseum.be

Serge Valet

consultant agro-pédologue,
Passerelles, 9 rue du Bât d'Argent, 69001,
Lyon, France.
valet.serge2@wanadoo.fr

Ines Vandecasteele

chercheure,
musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren,
Belgique.
ine.vandecasteele@yahoo.com

Nadine Vernumière

agronome,
parc naturel régional de Martinique.
MSP-PNRM@wanadoo.fr

Mohamed Zoubiri

forestier, doctorant,
ingénieur,
conservation des forêts de Tlemcen, Algérie.
zoubiri_forestier@yahoo.fr

Robert Zougmore

agro-pédologue,
CES,
Icrisat, Mali.
r.zougmore@cgiar.org

Résumés et *abstracts*

Chapitre I

Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion

Éric ROOSE, Zachée BOL, Théodomir RISHIRUMUHIRWA

Le sol, produit de l'altération des roches en fonction de l'atmosphère et de la biosphère, est un composé complexe de matières organiques (MO) et minérales ayant des propriétés propres, très différentes de celles des roches d'origine. On dit qu'un sol est dégradé quand il a perdu une ou plusieurs de ces qualités. La cause première de cette dégradation est liée à la minéralisation des MO du sol, suite au défrichement et à la mise en culture entraînant une faible restitution des MO. Mais l'érosion en nappe sélective des particules légères (MO, argile et limons) accélère cette dégradation douze fois plus vite que le simple décapage par érosion (ravinement) en rigole ou en masse (érosion aratoire). D'où l'importance de protéger la surface du sol par une couverture végétale abondante qui alimente la surface du sol en MO, élimine la battance des gouttes de pluie (E. en nappe), maintient une bonne infiltration (ravinement) et augmente la rugosité de la surface du sol (E. en masse).

Soils, produced by rocks alteration in relation to atmosphere and biosphere, are composed of various organic and mineral compounds developing properties very different from these of local stones. A soil is said degraded when it had lost one or some of these properties. The first original cause of degradation is related to organic matter mineralisation after deforestation and cropping. But sheet erosion being selective of light material (OM, clay, loam) accelerates the soil degradation twelve times faster than scouring effect (rill-gully erosion) or mass movements (tillage erosion). Therefore, authors insist on the importance of green coverage in order to feed the topsoil with OM, to protect the surface from the drops energy, to maintain a good infiltration capacity (against rills) and to increase the soil roughness (mass movements).

Chapitre 2

Influences du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale

Éric ROOSE

Les sols cultivés d'Afrique occidentale sont généralement épuisés au bout de 3 à 15 ans en fonction de leur texture, de l'agressivité des pluies et des techniques culturales.

Pour comprendre les mécanismes de dégradation des sols sous culture, des mesures de pertes de nutriments et de carbone par érosion et drainage ont été réalisées sur une séquence de sols à kaolinite entre les forêts denses humides de basse Côte d'Ivoire (sols ferrallitiques) et les savanes soudano-sahéliennes du plateau central du Burkina Faso (sols ferrugineux tropicaux).

Les résultats montrent que sous végétations naturelles, les pertes en carbone et nutriments (C, N, P, K, Ca, Mg) sont faibles par érosion : par contre, les pertes par drainage ne sont pas négligeables en milieu tropical humide. Sous cultures, les pertes par drainage sont du même ordre que sous végétations naturelles, sauf si on a apporté des doses importantes d'engrais (ex. sous bananeraie). Les pertes par érosion (1 à 700 t/ha/an) sont souvent multipliées par 10 à 1 000 sous culture : elles dépendent directement du poids de terre érodée. Cependant, la fertilité des sols à kaolinite est étroitement liée au taux de MO, lequel dépend de la minéralisation par les microbes et des restitutions par les litières. Il ne suffit donc pas de bloquer l'érosion des terres, il faut encore restituer les MO et les nutriments indispensables pour compenser les exportations et favoriser la croissance des végétaux cultivés.

Three to fifteen years after deforestation, cropped soils of Western Africa are generally exhausted depending on their texture, cultural practices and rain aggressivity. During seventeen years, carbon and nutrients losses by erosion and leaching have been measured in runoff plots and lysimeters on four stations on a climatic sequence between the moist forest of Southern Ivory Coast and the Sudano-Sahelian savannahs of central Burkina Faso. Under natural vegetation, losses by erosion are weak but losses by leaching are not negligible under humid tropics: therefore topsoils are acids. Under crops, losses by leaching are similar to these of natural vegetation except where a lot of fertilizers have been used, like under banana plantations. Losses by erosion (1 to 700 t/ha/an) are often 10 to 1,000 bigger than under natural vegetation: even if sheet erosion is selective, nutrient losses are directly related to the quality of the topsoil and the volume of eroded soil. Nevertheless, on kaolinitic soils the soil fertility is depending on soil organic matter (SOM). Because of the rapid mineralisation under hot and humid tropical conditions, the soil fertility degradation is depending mostly on litter and organic residues abandoned above and in the soil. In conclusion, soil erosion is generally not the initial cause of fertility degradation. Therefore soil and water conservation techniques are not sufficient to rehabilitate the soil productivity of the tropical soils: organic and mineral fertilizers must be included in the restoration systems in order to equilibrate the C and nutrients losses.

Chapitre 3

Nature et importance de l'érosion catastrophique dans la région du Kivu, Congo (RDC)

Jan MOEYERSONS, V. BYIZIGIRO, I. VANDECASTEELE, D. NKURUNZIZA, W. SAHANI, L. NAHIMANA, I. LUTUMBA (décédé), Philippe TREFOIS

Le rift albertin du Congo RDC connaît depuis les années 1980 des problèmes d'érosion dépassant le cadre agricole. Des inondations, des glissements de terrain, des ravinements géants freinent le développement durable de la région. La cause fondamentale de la croissance des risques hydrologiques réside dans le défrichement, l'augmentation généralisée du ruissellement et dans une infiltration localisée dans le sol. Le défi des gestionnaires est la réalisation d'une infiltration complètement diffuse des pluies afin d'éliminer en même temps le risque de ravinement, de glissement de terrain et les inondations associées. Le génie rural offre des solutions pratiques comme le terrassement radical ou progressif, la réalisation d'une bonne couverture végétale du sol, le paillage, l'agroforesterie, la gestion conservatoire des eaux et des sols.

Since the 1980's, the Albertine rift in the Congo RDC is increasingly affected by erosion events largely exceeding the agricultural context. Inundations, landslides and mega-gullies slow down the sustainable development of the region. The reason for the intensification of the hydrological risks is to be found in the deforestation, a general increase of the runoff rate and in management techniques leading to concentrated water infiltration in the soil. It is a managerial challenge to realize a complete diffuse water infiltration in the soil. This will eliminate in the same time the risk of gullying, landsliding and associated inundations. Agricultural engineering offers practical solutions like bench or progressive terracing, a good vegetation cover, mulch, agroforestry, and better land husbandry.

Chapitre 4

Une perspective écologique sur la restauration des sols dégradés

Francis SHAXSON, Éric ROOSE

La restauration des sols dégradés peut viser trois objectifs : reconstruire le potentiel de production de l'eau et des sols, améliorer leur résilience face aux risques futurs et augmenter leur durabilité. D'un point de vue écologique, les sols sont des entités vivantes dont les composantes sont en relation avec les principaux facteurs de la productivité des sols. De là on peut développer différentes approches pour déterminer les causes de leur dégradation actuelle, décider quel processus améliorant doit être mis en route et comment gérer ces processus de telle façon qu'on atteigne les objectifs. Cette approche nous conduit au développement de la gestion durable de l'eau et de la fertilité des sols (GCES ou Better land husbandry).

The objectives of restoring damaged rural soils are: to re-build their potentials for yielding plants and water; to increase their resilience in the face of future hazards and to raise their capacity for self-sustainability. From an ecological viewpoint, soils may be considered as living entities, of which the four key interacting components of soil/plant ecosystems are sketched, together with the main requirements for soil to function effectively as a productive medium. From these can be developed suitable approaches to determine the causes of the present damage, to decide what remedial processes need to be initiated, and how these should be managed most appropriately to reach the stated objectives. Taking such an approach leads to better land husbandry.

Chapitre 5

Influence de jachères améliorées et pâturées sur le rendement des cultures et les propriétés chimiques de sols ferrallitiques acides dans la région des forêts humides du Sud-Est du Nigeria

Felix N. IKPE, L.D. GBARANEH

Au sud-est du Nigeria, la durée de la jachère a été réduite à moins de 5 ans et les terres marginales ont été mises en culture à cause de la pression démographique. Il fallait donc trouver des techniques culturales capables d'améliorer la productivité des terres. Les recherches ont été conduites en zone de forêt humide, à 10 m d'altitude, avec une pluviosité monomodale moyenne de 2 400 mm. Le sol (Ultisol) est très acide (pH = 3,5 à 6,0), à argile kaolinitique à faible capacité d'échange de cations (CEC) et faible taux de saturation. Le taux de matières organiques (0,5-3 %) et la réserve en nutriments sont très faibles. Deux essais de jachère améliorée (*Tephrosia* et *Lablab*, pâturées ou non) ont été conduits entre 1996 et 2000. Les propriétés chimiques du sol et les rendements en manioc et maïs ont été améliorés en peu de temps. Le mulch de *Tephrosia* a entraîné une baisse du pH, mais la jachère de *Lablab*, pâturée ou non, a amélioré le pH, le carbone organique, l'azote, le phosphore et le potassium. Cependant, l'adoption de ce nouveau système par les paysans dépend du bilan économique et de la durabilité du système.

In southeastern Nigeria, fallow periods have been reduced to less than 5 years. Marginal lands are being brought under cultivation due to population pressure. Under these circumstances, there is need for soil and crop management options to improve productivity. The study site is in the humid forest zone with an altitude of 10 m, a mean annual rainfall of 2,400 mm, with a monomodal distribution. The soils are highly weathered and acidic with Ultisols of pH ranging from 3.5 to 6.0 and mineralogy dominated by low activity clays with low cation exchange capacity (CEC) and low base saturation, a low organic matter (0.5-3 %) and a low nutrient reserve. Two trials of improved short fallow were conducted between 1996

and 2000. Soil chemical properties under the improved fallow systems were significantly improved within a short period of time while cassava and maize yields were greatly increased. Although the Tephrosia mulch showed a tendency of soil acidification in the present study, the Lablab fallow either with or without sheep grazing, led to increases in soil pH, organic carbon (OC), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). The adoption of these fallow systems by farmers will depend on their profitability and sustainability in these fragile tropical ecosystems.

Chapitre 6

Influences de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar)

Marie Antoinette RAZAFINDRAKOTO

La région nord-ouest des hauts plateaux de Madagascar présente des problèmes d'érosion importants dus à l'agressivité climatique élevée et à la dégradation de la végétation et des sols par les cultures extensives et les feux de brousse annuels. Il en résulte une baisse de la productivité des sols engendrant la pauvreté du monde rural.

Une recherche a donc été menée dans cette région afin d'évaluer l'efficacité de diverses jachères arbustives pour l'amélioration de l'infiltrabilité, de la fertilité et de la productivité du sol. Les espèces étudiées ont été : *Tephrosia vogelii*, *Flemingia congesta* et *Calliandra calothyrsus*. Les résultats ont montré que les jachères arbustives légumineuses de longue durée (en particulier l'espèce *Tephrosia vogelii*) ont réussi à accroître fortement la dynamique d'infiltration de l'eau dans le sol et la fertilité du sol, engendrant une diminution importante de l'érosion et l'augmentation de la productivité des sols très dégradés.

The northwest region of the High Lands of Madagascar presents important erosion problems owed to the high climatic aggressiveness and the degradation of vegetation and soils by annual bushfires and extensive cropping. That involves a decrease of the soil productivity generating the poverty of the peasants.

*A research has been carried out in order to evaluate the efficiency of different types of leguminous shrubby fallows for the improvement of soil infiltrability, soil fertility and soil productivity. The studied species were: *Tephrosia vogelii*, *Flemingia congesta* and *Calliandra calothyrsus*. Results showed that the leguminous shrubby fallows installed during 5 or 7 years (particularly the species *Tephrosia vogelii*) succeeded to increase highly the dynamics of water infiltration and soil fertility, generating important reduction of erosion on very degraded soils, and inducing increase of soil productivity. These simple methods of soil fertility restoration can be applied in various tropical regions.*

Chapitre 7

La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central)

Hervé DUCHAUFOUR

Les paysans burundais ont su se préserver des nombreuses crises en développant la bananeraie agroforestière. Les agronomes belges considéraient déjà la « jachère » à bananiers comme une technique de conservation de l'eau et de restauration de la fertilité des sols qui présente le double intérêt d'être productive et totalement endogène. Les essais de l'Isabu, réalisés en milieu réel, montrent que la bananeraie a des répercussions économiques importantes sur l'exploitation et la préservation de la fertilité organo-minérale des sols. Une gestion optimale de tout le stock organique excédentaire de la bananeraie réduit en moyenne de 60 % le ruissellement et les pertes en terre par rapport à la bananeraie dont les déchets sont exportés vers la caféière. Les travaux de l'Iraz soulignent que la conservation des sols ne suffit pas pour maintenir la productivité. Une fumure organique de 3 à 9 t/ha/an de MS, complétée par des compléments minéraux, est apparue nécessaire pour réduire les carences du sol et produire plus de 4 t/ha/an de maïs.

D'autres études menées par l'Adeprina démontrent la forte valeur ajoutée/actif de la bananeraie. La caféière immobilise de trop grandes quantités de biomasse en raison du paillage obligatoire et consomme une quantité de main-d'œuvre (5,2 jours/are/an) bien supérieure à la bananeraie qui ne demande que 1,7 jour/are/an. La production fumière a toujours suscité l'intérêt des exploitants par laquelle ils valorisent leur journée de travail essentiellement par la concentration de la fertilité dont bénéficient les parcelles. Les associations arbre-bananier-culture-élevage, pratiquées depuis des siècles, sont paradoxalement les plus utilisées par les agriculteurs des régions où l'emprise sur la terre est la plus forte (300 à 600 habitants/km²). Par le jeu de la densification du couvert végétal, notamment à travers la juxtaposition des jardins multi-étagés qui ceinturent les habitations, les terres se trouvent mieux protégées et plus productives jusqu'à un seuil où peut s'amorcer un processus de décapitalisation irréversible, notamment dans les zones péri-urbaines (1 000 hab/km²), faute de capital productif et de moyens monétaires suffisants.

Influences of fertilization and biomass management of banana plantation on productivity of permanent covers in highly populated tropical mountain environment (Burundi)

Burundi farmers developed banana plantation within agroforestry system. At colonial time, Belgian agronomists already considered the banana fallow as a soil conservation and restoration technique which presents the double interest to be productive and totally endogenous. The Isabu trials showed that banana plantations have significant economic impacts on the farm and contribute to the preservation of organo-mineral soil fertility. An optimal management of the whole organic stock surplus from the banana plantation reduces runoff rate and erosion by 60 % compared to the same plantation conducted in a traditional manner (residues exported to the coffee plantation). Those results are confirmed by the works of Iraz, while underlining that soil conservation cannot in itself sustain productivity. Organic fertilizer (manure),

at a 3 to 9 t/ha/year (DM) application rate with complementary minerals, was necessary to reduce deficiency in NPK. Adeprina works, conducted throughout Burundi's territory, show the high-added value/assets of banana plantation as opposed to the other cropping systems, including coffee, the most preferred cash crop. This latter immobilizes too large amounts of biomass as a result of mandatory mulching and utilizes an amount of labor (5.2 days/are/year) well above the banana plantation that requires 1.7 days/are/year, observation that meets the most Burundi people's interest. Organic fertilizer production has always attracted farmers as it values their workday essentially by the concentration of fertility to their lands. Paradoxically, the tree-crop-livestock associations, in use since the most ancient times, are not only the most desirable, but also the most practiced by farmers where the control on lands is the highest (300 to 600 heures/km²). Thanks to the densification of the vegetation cover, notably through the juxtaposition of the multistoried gardens which surround the houses, the lands are better protected and more productive up to a threshold where an irreversible decapitalization process can start, notably in the suburban areas ($\geq 1,000$ people/km²), due to lack of production capital and sufficient monetary means.

Chapitre 8

Effets de jachères agroforestières sur la réhabilitation et la productivité des sols ferrugineux tropicaux des savanes soudaniennes du Nord-Cameroun

Jean-Michel HARMAND, Clément FORKONG NJITI,
France BERNHARD-REVERSAT, Robert OLIVER, Régis PELTIER

Différentes jachères arborées plantées d'*Acacia polyacantha*, de *Senna siamea* ou d'*Eucalyptus camaldulensis* et une jachère naturelle herbacée, ont été installées en comparaison, sur un sol appauvri en matière organique et en nutriments, dans la région de Garoua au Cameroun (1 050 mm de pluviosité). L'objectif était d'évaluer leurs effets sur la dynamique du carbone, les cycles des nutriments, les propriétés du sol et le rendement des cultures annuelles après jachère. Par rapport à la jachère herbacée, les jachères arborées de 7 ans ont augmenté considérablement l'accumulation de matière organique et de nutriments dans la biomasse aérienne et souterraine et aussi le prélèvement des nutriments de la profondeur du sol. Ces processus ont permis, lors de l'exploitation des jachères arborées et du brûlis des résidus, d'améliorer les caractéristiques du complexe absorbant (somme des cations échangeables, en particulier Ca) dans l'horizon de surface (0-10 cm) des jachères ligneuses par rapport à la jachère herbacée.

Par la fixation de l'azote et son recyclage, l'espèce fixatrice d'azote, *A. polyacantha*, a augmenté considérablement le bilan d'azote du système. L'espèce a accumulé dans son système racinaire autant d'azote qu'*E. camaldulensis* et *S. siamea* dans leur biomasse totale et leur litière. En outre, seul *A. polyacantha* a montré une augmentation significative des stocks de carbone et d'azote du sol (couche 0-20 cm) après 6 ans d'âge. Le stock d'azote plus élevé et facilement minéralisable et l'accumulation de matière organique du sol dans la jachère à *A. polyacantha*, ont été

associés à un triplement du rendement du maïs en première année de remise en culture par rapport aux précédents, et un doublement en deuxième année. Cette augmentation très importante des rendements des cultures après jachère n'a pas été observée après les autres précédents arborés. Ces résultats soulignent l'importance des compartiments organiques et le potentiel des arbres fixateurs d'azote dans la restauration de la fertilité des sols dégradés.

Different tree fallows planted with Acacia polyacantha or Senna siamea or Eucalyptus camaldulensis and an herbaceous fallow, were compared in an experimental setting on a -carbon – and nutrient-depleted soil, in the Garoua Region of Cameroon (1,050 mm of annual rainfall). The objective was to assess their effects on carbon and nutrient dynamics, soil properties and the production of subsequent crops. Compared to the natural herbaceous fallow, planted tree fallows of 7 year old greatly increased 1) the accumulation of organic matter and nutrients in total biomass and 2) the uptake of soil nutrients from depth. As a result, after clearing the fallows by logging and burning non-harvested residues, the pool of exchangeable cations (especially Ca) in the top 10 cm soil layer was increased in the tree fallows in comparison to herbaceous fallows.

The N₂ fixing species, A. polyacantha, increased the N budget of the system through N₂ fixation and N recycling. It accumulated in its root system as much N as E. camaldulensis and S. siamea accumulated in their total biomass and litter. Furthermore, only A. polyacantha showed a significant increase of soil carbon and nitrogen content (layer 0-20 cm) after 6 years of age. The build-up of soil organic matter and the higher content of mineralizable N in the A. polyacantha fallow were associated with tripling and doubling maize yields during the first and the second year after fallowing, respectively. This significant increase in yields of subsequent crops was not observed after the other tree fallows. These results highlight the importance of organic compartments and the potential of N₂ fixing trees in soil fertility replenishment.

Chapitre 9

Agriculture sur brûlis de jachères à acacias. Est-ce durable sur les sables du plateau Batéké (République Démocratique du Congo) ?

Régis PELTIER, Franck BISIAUX, Émilien DUBIEZ, Jean-Noël MARIEN, Vincent FREYCON

Au Congo Kinshasa, le bois est la principale source d'énergie : or il y a très peu de forêts autour de la capitale. À partir de 1994, la plantation d'*Acacia auriculiformis* de 8 000 ha du projet Mampu a été divisée en lots de 25 ha attribués à 320 familles d'agriculteurs qui doivent gérer leur plantation suivant le modèle traditionnel de culture par abattis-brûlis. Au niveau du massif, la production est d'environ 10 000 t/an de charbon de bois, 10 000 t/an de manioc et 1 200 t/an de maïs. Le projet peut donc être considéré comme un succès au niveau de la production et de la création d'emplois ruraux. Cependant, la durabilité de ce système est incertaine. En effet, l'alternance entre plantation d'acacias et cultures permet un enrichissement du sol en matière

organique, une amélioration de la CEC, mais engendre une acidification. Seul le brûlis des branchages et de la litière, après récolte du bois et carbonisation, permet de remonter le pH des horizons superficiels pendant les deux ans de culture. Un épandage sur les parcelles des particules de charbon trop fines pour être commercialisables et un apport de phosphates calciques devraient être testés pour vérifier l'amélioration de la durabilité du système. Enfin, d'autres modèles de systèmes agroforestiers méritent d'être testés sur d'autres sols en gérant la « biodiversité utile » du recrû naturel d'espèces locales à usages multiples.

*In 1994, the plantation of *Acacia auriculiformis* in Mampu was divided into lots of 25 ha, assigned to 320 families who need to manage their lots following the traditional shifting cultivation. The total production is about 10,000 tons/year of charcoal, 10,000 t/y of cassava and 1,200 t/y of corn. The project can be considered a success in terms of production and rural employment. However, the sustainability of this system is uncertain. In fact, the alternation between acacia plantation and crops cultivation allows enrichment of the soil organic matter, improving the CEC, but causes acidification. Only the burning of the branches and litter after harvesting of wood can raise the pH of topsoil during the two years of cultivation. An application on the parcels of coal particles too small to be marketable, making calcic phosphate amendments, and better control of forest regeneration should be tested for improving the sustainability of the system. Finally, other models of agroforestry systems need to be tested on other soils, managing "useful biodiversity" of multipurpose native species.*

Chapitre 10

Influences de l'écobuage sur la restauration de la productivité des sols argileux acides de la vallée du Niari (Congo)

Jean de Dieu NZILA

L'écobuage de type maala est une variante de la culture sur brûlis qui consiste à façonner de longs billons (10 à 20 mètres) dans lesquels sont enfouies des herbes de savane entrelacées, préalablement séchées et entassées en andains, soumises par la suite à une combustion à l'étouffée. Sur le plan morphologique, les températures observées à l'intérieur du billon pendant la combustion (variant entre 95 et 418 °C) ont permis de définir quatre principales phases homogènes qui se distinguent par leurs couleurs (brun, rouge ou noir) et les particules qui les constituent (agrégats intacts, terre cuite, cendres, charbon ou débris végétaux). Sur le plan minéralogique, l'élévation des températures à l'intérieur du billon conduit à des agrégats très consistants formant des pseudosables et l'amorce d'une amorphisation de la kaolinite. Sur le plan chimique, on note une baisse globale de 30 % de la matière organique dans le billon écobué après la combustion. Les pertes d'azote total sont moins importantes (20 %) ; elles seraient compensées par une augmentation d'azote ammoniacal. Par ailleurs, on observe dans les billons écobués une nette augmentation des cations échangeables (4,86 à 8,29 cmol.kg⁻¹ de sol), du taux de saturation du complexe absorbant (35 à 65 %) et du pH (de 5,1 à 6,5), réduisant ainsi la toxicité manganique

observée sur ces sols. Les teneurs en phosphore total sont peu variables dans tous les échantillons (voisines de 3 ‰), alors que celles du phosphore assimilable augmentent progressivement dans les phases soumises à des fortes élévations de température (de 0,44 à 1,47 ‰). Les rendements des cultures de manioc et d'arachide sur les champs écobués sont nettement supérieurs à ceux obtenus par d'autres systèmes de culture sur brûlis ou en culture mécanisée. La durée de la période cultivée est prolongée.

The maala burn beating is a variant of shifting cultivation which is to shape long ridges (10 to 20 meters) in which are buried the grass savanna interlaced, previously dried and piled in windrows, subsequently submitted to combustion stifled. Morphologically, the observed temperatures inside the ridge during combustion (ranging between 95 and 418°C) have identified four main homogeneous phases which are distinguished by their color (brown or black) and the particles (intact aggregates, cooked clay, ash, coal or plant debris). In the mineralogical terms, rising temperatures inside the ridge lead to stable aggregates forming pseudosand and the beginning of amorphization of kaolinite. In chemical terms, there is an overall decrease of 30% of the organic matter in the ridge weeding party after combustion. The total nitrogen losses are less important (20%), they would be offset by an increase of ammonia nitrogen. Instead, we see in the burned logs a net increase of exchangeable cations (4.86 to 8.29 cmol.kg⁻¹ soil), the saturation rate of the absorbing complex (35-65%) and pH (5.1 to 6.5) reducing manganese toxicity observed in these acid soils. The total phosphorus contents are constant in all samples (adjacent to 3‰), while those available phosphorus increase gradually in phases subject to high elevations in temperature (from 0.44 to 1.47‰). Crop yields of cassava and groundnuts on burn beating fields are higher than those obtained by other systems of shifting cultivation or mechanical cultivation. The cultivation period is prolonged.

Chapitre II

Importance des charbons de bois dans la restauration de la fertilité des sols tropicaux : une revue

Cornelia RUMPEL

L'enfouissement de grandes quantités de matières organiques peu sensibles à la dégradation microbienne pourrait être une solution simple, efficace et facile à mettre en œuvre pour amender les sols tropicaux pauvres en nutriments, sableux, séquestrer du carbone, et en même temps pour améliorer leur fertilité. L'objectif de ce chapitre est d'analyser si les charbons de bois (biochar) dans les sols tropicaux peuvent améliorer leurs qualités chimique, physique et biologique. En effet, la présence des biochars augmente la capacité des sols d'adsorber des nutriments, de retenir de l'eau et de stocker du carbone. La capacité des biochars à améliorer la qualité des sols dépend de nombreux facteurs (matière première et processus de pyrolyse utilisés, climat, types et pH des sols, profondeurs d'enfouissement, variétés cultivées, etc.), dont les rôles respectifs et les interactions sont encore très mal connus. Toutefois, dans des sols tropicaux pauvres, l'utilisation des biochars pour améliorer leur fertilité

en utilisant la technique de brûlis sous butte de terre (*slash and char*) ou combinés avec des engrais minéraux et d'autres substrats organiques (composts) semble une technique économiquement viable, qui mérite des études plus détaillées.

The incorporation of significant amounts of organic matter stable upon microbial decay may be a simple solution as an amendment of nutrient-poor, tropical sandy soils, to sequester carbon and at the same time to improve their fertility. The objective of this chapter is to analyse if charcoal (biochar) could be used as an organic amendment in tropical soils. The presence of biochar in soil could improve their chemical, physical and biological qualities. It increases the soil capacity to adsorb nutrients as well as their water holding capacity and their carbon storage potential. However, the efficiency of biochar depends on numerous factors such as feedstock, pyrolysis process, climate, soil type, etc. The respective influence of these different factors is badly known. However, in degraded tropical soils, the use of biochar to ameliorate their fertility might be feasible and application techniques such as slash and char or co-application with complementally fertilisers and compost seem to be economically viable and should be tested in further studies.

Chapitre 12

Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale : points de vue d'un zootechnicien et d'un agro-pédologue

Hubert GUERIN, Éric ROOSE

Sans accès aisé aux engrais chimiques, la jachère et la fumure animale sont les principaux moyens d'entretenir la fertilité des sols dans les régions d'élevage d'Afrique occidentale. La fumure est pratiquée depuis des siècles par la conduite des animaux sur parcours, leur parage sur des surfaces destinées à la culture, dans des enclos ou au piquet pour accumuler des excréta, mais en Afrique, rarement en fabriquant du vrai fumier. La restitution de nutriments par l'animal est le résultat de l'ingestion de fourrages (1,8 à 2,5 t MS/UBT/an¹²), de leur digestion et de l'excrétion des fèces, ainsi que des urines et des gaz. Sur parcours extensifs, les matières fécales contiennent 40 à 60 % des biomasses consommées, donc du carbone, dont une grande proportion de fibres riches en lignine. Avec les urines, les fèces réunissent 75 à 90 % de l'azote et des minéraux (P, Ca, K, Mg) ingérés par le bétail, les minima correspondant à des jeunes animaux en croissance ou des vaches laitières, les maxima à des animaux adultes à l'entretien qui retiennent donc peu de nutriments. Ce texte vise principalement à expliquer, sur la base des processus digestifs, la variabilité quantitative et qualitative des excréta et de ses facteurs. Ceux-ci sont liés à la diversité des systèmes fourragers suivant le milieu naturel, les systèmes de culture, les saisons et les régimes différenciés des bovins, ovins ou caprins ; en particulier, les teneurs en azote des

12. UBT : Unité Bovin Tropical correspondant à un bovin de 250 kg de poids vif.

fèces de petits ruminants (3 à 4 % de la matière organique fécale) sont plus élevées que celles des bovins (1 à 3 %). Les teneurs en fibres lignifiées sont également plus importantes dans les fèces de caprins en relation avec leur importante consommation de fourrages ligneux. Les ovins sont intermédiaires entre les caprins et les bovins. Le texte rappelle aussi la compétition pour l'usage de la biomasse, trop peu abondante, entre la production fourragère, l'enfouissement, le paillage et les brûlis. La distribution spatiale des excréta et leur concentration, du fait de la conduite des troupeaux au pâturage, de leur parage, de la technologie fumière mise en œuvre, sont les principaux déterminants de la restitution des nutriments et de leur qualité humifère. Il est aussi souligné que toute innovation en fumure animale n'a de chance de s'étendre que si elle s'intègre au fonctionnement global et au projet des exploitations. Enfin, dans des contextes en rapide évolution de densification agricole des terroirs, de disparition des jachères et des réserves foncières, les transferts de fertilité par les animaux depuis les parcours non cultivés sont de moins en moins importants alors que les exportations par les produits animaux et végétaux en réponse à la demande urbaine s'amplifient. Il est donc nécessaire d'intégrer les engrais minéraux dans les stratégies d'intensification écologique durable.

Without easy access to fertilizers, fallow and animal manure are the main means of maintaining soil fertility in Western Africa. Fertilization has been practiced for centuries by herding animals on rangelands, their gathering on fields at stakes or in fenced parks, raising it in confinement, but rarely by producing real manure. The return of nutrients by the animal is the result of the ingestion of feed (1.8 to 2.5 t DM/TLU/year¹³), their digestion and excretion of faeces and urine. On rangelands, faeces contain 40 to 60% of biomass consumed -so carbon-including a large proportion of lignin-rich fibers. With urine, faeces meet 75-90% of the nitrogen and minerals (P, Ca, K, Mg) ingested by cattle, the minima corresponding to young growing animals or to dairy cows, and the maxima to adults on maintenance. This text is to explain, on the basis of nutritional processes, quantitative and qualitative variability of excreta and its factors. These are related to the diversity of forage systems according to the natural environment, farming systems, seasons, and diets of animals. In particular, the nitrogen content in faeces of small ruminants (3-4% of fecal organic matter) is higher than those of cattle (2-3%). The contents of fibers and lignin are also higher in the feces of goats in relation to their high consumption of browse. Sheep are intermediate between goats and cattle. It recalls the competition for the use of biomass (too scarce) between forage production, ploughing and mulching. It also recalls that the spatial distribution of excreta and concentration because of the herding conduct of grazing animals and their park, the manure technology implementation, are the main factors for the return of nutrients and humus quality of these refunds. Finally, in rapidly changing contexts of increasing pressure of agriculture on land and livestock production, fertility transfers by animals from uncultivated lands are less important while exports by crops and animal products are growing in response to urban demand. It is therefore necessary to integrate mineral fertilizers in strategies for sustainable intensification.

13. TLU : Tropical Livestock Unit – 250 kg Live Weight.

Chapitre 13

Intérêt des fumiers pour restaurer la fertilité des sols en zone semi-aride d'Afrique

Francis GANRY, Laurent THURIÈS

Le maintien de la fertilité des sols tropicaux en zone semi-aride est conditionné par l'apport de matières minérales et organiques, mais des MO peu fermentescibles et riches en précurseurs d'humus. En plus de l'augmentation de la productivité, les effets attendus de ces MO, sont : une réduction du risque de sécheresse et de phytotoxicité, une augmentation : (i) de la valeur nutritionnelle des céréales, (ii) de la fixation de N_2 des légumineuses, (iii) de la résistance des plantes aux maladies. On distingue en gros trois types de fumier : (1) les poudrettes de parc traditionnel, (2) le fumier de parc avec litière, (3) le fumier d'étable à stabulation composté. Pour améliorer l'efficacité du fumier, il faut intervenir à trois niveaux : (a) estimer son effet fertilisant et son effet amendement et vérifier si le processus de fermentation (compostage) s'est réalisé, (b) ajouter des compléments phosphatés et une biomasse riche en lignine, (c) définir le mode d'application au sol, la dose et la place dans la rotation de ce fumier. Les contraintes majeures à la production de fumier sont la ressource fourragère et le transport ; cependant, un espoir est permis dans les zones cotonnières, avec l'apparition de la stabulation saisonnière au Mali ou des parcs d'hivernage au Burkina.

Tropical soil fertility in the Sudan-Sahel region of Africa is depending on addition of mineral and organic matter (OM), slightly fermentable and rich in humus precursors (manure). In addition to the increased productivity, the expected effects of manure are: a reduction in the risks of drought and phytotoxicity of some fresh OM as sorghum straw, an increase in the nutritional value of cereals, in biological N_2 fixation of legumes and in plant resistance to diseases. A distinction is made between three types of manure: (1) traditional dry manure resulting from stock pen also called "poudrette", (2) manure resulting from stock pen with litter (3) manure resulting from loose housing barn (called farmyard manure). To enhance the manure, three directions: (a) measure of fertilizer and amendment effect to increase the "agronomic value" which is achieved by composting, (b) addition of phosphate rock and biomass rich in lignin, (c) improve its application, dose and place in the rotation. The main constraints on manure production are transport and forage availability; however, there is some hope in cotton producing regions, with the advent of seasonal stalling in Mali or wintering pens in Burkina.

Chapitre 14

Restauration des sols cultivés mais dégradation des parcours par l'élevage au Maroc

Mohamed SABIR, Éric ROOSE

Au Maroc, le troupeau constitue l'essentiel de la trésorerie des paysans : il produit le lait, la viande, le cuir, mais aussi le fumier qui assure un transfert de fertilité des sols des parcours vers les champs cultivés : les engrais minéraux sont encore peu utilisés

par les petits paysans. Cependant, le surpâturage peut avoir des effets négatifs sur la diversité biologique, la couverture végétale, le tassement et l'encroûtement des sols et sur le ruissellement. Les pertes annuelles par minéralisation de l'humus des sols atteignent 1 t/ha dans les sols irrigués et 0,65 t/ha sur les champs en culture pluviale. Les doses moyennes de fumier dépassent rarement 6,7 t/ha/an (soit 2,3 t de MS/ha et 6,2 millions de tonnes pour les sols cultivés du Maroc). Le fumier, constitué des fèces, de litière et des déchets de l'exploitation, est souvent entassé dans des endroits trop drainés et ensoleillés près de l'étable : desséchés, mais mal fermentés, les fumiers perdent une grande partie des éléments fertilisants (N, C, K), tout en conservant un stock de graines d'adventices et de germes de maladies. Pour faire un bon fumier composté, il faudrait ajouter aux fèces de la paille pour stocker l'azote, les urines (riches en N et K) et de l'eau pour faciliter le compostage de la biomasse. Le fumier est apporté aux cultures maraîchères, aux vergers (oliviers et fruitiers) et parfois aux céréales.

Pour atténuer les effets négatifs du pâturage sur les sols et permettre leur conservation, les paysans ont développé des stratégies de gestion des parcours et des troupeaux. Les agdals, les contrats entre éleveurs et agriculteurs et la transhumance entre la montagne et la plaine, sont des techniques très efficaces pour le maintien d'un certain équilibre entre les ressources et les prélèvements.

Livestock is an important source of cash for Moroccan farmers: it produces milk, meat, leather and manure. To maintain the soil productivity, poor farmers use mainly manure that provides fertility transfer between grazing land and cultivated fields. However, grazing can have negative effects on biodiversity, vegetation cover, soil compaction and sealing, increasing runoff. The annual loss of humus by mineralization attained 1 t/ha of irrigated soils and 0.6 t/ha/year in rainfed areas. The average applied doses were 6.7 tonnes/ha/year (or 6.25 million tons for the cropped fields of Morocco). Manure consists of faeces, some litter and field/home wastes. These organic residues are often crowded in sunny places near the barn: this non-fermented manure lost 70 % of its moisture and much of nutrients (N, C, K), but maintains a stock of weed seeds and disease germs. To make good manure, it should be added to the faeces straw to fix nitrogen and urine plus water to facilitate the transformation of biomass in soil humus manure. Manure is sprayed especially for grain and vegetable crops and traditional olive orchards. To mitigate the negative effects of grazing on soil and water conservation, farmers have developed strategies for rangeland management. The agdals, manure contracts between farmers and holders and transhumance between the mountains and the plains are very efficient techniques for maintaining a certain balance between exportation and nutrients resources.

Chapitre 15

Érosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi

Théodomin RISHIRUMUHIRWA, Éric ROOSE

Les hauts plateaux du Burundi sont soumis à une forte pression démographique (> 250 hab./km²) et à une dégradation rapide des terres entraînant une baisse continue de la production agricole. Dans ce contexte, l'impact de l'érosion hydrique

et la réponse de trois méthodes de restauration des terres sur les rendements et la rentabilité économique du maïs ont été étudiés à la station de recherche de l'Iraz à Mashitsi, sur un sol ferrallitique très acide de 8 % de pente. L'étude a porté sur trois années de mesure sur six parcelles d'érosion dont les pertes cumulées sont respectivement de 154 t/ha/3 ans sur le témoin (jachère nue travaillée), de 0,14 t sur la parcelle totalement paillée et de 17 à 58 t/ha/3 ans sur les parcelles sous bananeraies de moins en moins denses. Le ruissellement a diminué de 15 à 1 % pour une pluviosité de 1 200 mm en fonction du taux de couverture du sol. La quatrième année, chaque parcelle a été divisée en 4 parties soumises à 3 modes de restauration (6 t de fumier, fumier + NPK 60-60-40, idem + 500 kg de chaux) et semée en maïs. Les résultats montrent que les terres les plus érodées sont les plus dégradées et sont beaucoup plus difficiles à restaurer que les sols bien protégés : leur restauration nécessite des moyens plus importants (fumier et NPK), difficiles à mobiliser par les agriculteurs burundais. Ils montrent aussi que la fumure organique est la clé de toute restauration et qu'un complément en engrais NPK en renforce l'efficacité. Le chaulage, par contre, semble déprimer les rendements du maïs.

In central Burundi, the yield of various crops is low and still decreasing while the population density is very high (250 up to 800 people/km²). Erosion was measured on six runoff plots (300 m²) and three treatments: the standard bare fallow, the fully mulched with local grass, and 4 densities of bananas trees partially mulched with their leaf residues. Annual runoff varied from 15 to 1% of the rains (around 1,200 mm/year) and cumulated erosion on 8% slope decreased from 154 t/ha/3 years on the bare plot to 0.14 t/ha/3 years under full mulch. Under banana plantation, erosion decreased (58 t/ha to 17 t/ha/3 years) with higher banana trees density and higher rate of mulched surface. During the fourth year, each runoff plot was divided into 4 parts on which the following soil restoration methods were tested: 1/ the control with no restoration, 2/ restoration with 6 t/ha of manure, 3/ restoration cumulating 6 t/ha of manure (D.W.) and N60, P60, K40, 4/ the same treatment + 500 kg/ha of lime. All the plots were planted with maize (Bambou variety). The results showed that it is very difficult to restore soil productivity of very eroded ultisoils. Combining manure and mineral nutrients improved yields up to 3 to 4 t/ha of maize grains the first season on protected plots. Liming seems to have a negative impact on yields. The economical analysis showed that the most economic system of restoration is the use of manure and a few NPK complement.

Chapitre 16

Effets de la gestion des résidus de culture sur un sol brun tropical volcanique. Tests sur divers systèmes intensifs de cultures d'exportation sous pluies naturelles et simulées en Martinique

Benoît KHAMSOUK, Éric ROOSE

En Martinique, les cultures d'exportation (banane, ananas, canne à sucre) peuvent présenter un risque de dégradation pour l'environnement (érosion, pollutions des sols et des eaux) en raison du relief accidenté, des pluies cycloniques et des pratiques

culturelles très consommatrices d'intrants. Une étude sur dix parcelles d'érosion de 200 m² a été mise en place (1998-2001) sur un sol brun tropical volcanique. Elle a démontré que les systèmes intensifs de cultures à gestion superficielle des résidus de culture protégeaient le sol de l'érosion hydrique, à l'opposé du sol nu et de la culture traditionnelle d'ananas billonné. Sur sol nu labouré de pente croissant de 10-25 à 40 %, l'érosion augmente linéairement de 86 à 147 t.ha⁻¹.an⁻¹, alors que le ruissellement diminue de 7 à 4 %, le type d'érosion passant de l'érosion en nappe, aux rigoles et au creeping. Afin d'approfondir les connaissances sur ces processus, une campagne de simulation de pluies cycloniques (19 tests sur des micro-parcelles de 1 m² arrosées par une pluie artificielle d'intensité de 100 mm.h⁻¹ durant trois heures) a été réalisée *in situ* pour mieux comprendre le fonctionnement hydrique du sol.

Les résultats des pluies simulées sur 1 m² se sont avérés conformes aux mesures observées en parcelles d'érosion (200 m²) sous pluies naturelles. Le sol brun tropical sur cendres volcaniques présente une forte capacité d'infiltration et même après trois heures de simulation de pluie très intense, la saturation du sol superficiel n'est jamais atteinte ($H_p < 58\%$). Le paillage protège efficacement le sol du ruissellement (et de l'érosion hydrique) en accentuant l'infiltration totale de la pluie artificielle, même après 300 mm de pluie en trois heures. Par contre, les billons concentrent un ruissellement abondant après 40 minutes de pluie de même intensité. D'autres résultats remarquables sont soulignés : (i) une grande stabilité des agrégats sur les sols nus où la désagrégation n'est que partielle avec des mottes émoussées reposant sur une croûte inférieure formée à partir de particules fines désagrégées ; (ii) un changement de processus hydrodynamique sur le traitement « sol nu » avec une diminution du ruissellement sur les plus fortes pentes (25 et 40 %), provoquée par le maintien de l'ouverture des macropores superficiels due à l'énergie décapante de la lame de ruissellement.

In Martinique Island, intensive plantations of bananas, pineapple or sugar cane present a risk of erosion and soil + water pollution in relation to steep slopes, intensive cyclonic rainstorms and cultural practices. A study on ten runoff plots (200 m²) on a volcanic brown tropical soil demonstrated that intensive cropping systems with complete mulching (with crop residues) protected the soil against erosion when the conventional cropping system of pineapple on ridges lost more than 17 t.ha⁻¹.year⁻¹ of topsoil. On bare plots, on slopes increasing from 10 to 25 and 40%, soil erosion increased linearly from 86 to 128 and 148 t.ha⁻¹.year⁻¹ when runoff decreased from 7 to 4%, the type of erosion varying from sheet to rill and even creep erosion. In order to better understand erosion processes, 19 tests of cyclonic simulated rainfalls on micro-plots of 1 m² were irrigated during three hours with 100 mm.hour⁻¹ intensity.

Conclusions under intensive simulated rainfalls confirmed those under natural rainfalls on 200 m² runoff plots, particularly concerning runoff and soil losses under different treatments. This volcanic brown soil kept a strong infiltration capacity even after three hours of simulated heavy rainfalls: the soil saturation was never attained ($H_p < 58\%$). Mulching protects the soil surface very efficiently against rainfall and runoff energy and against erosion, even during a very intense cyclonic rainstorm. It was not the case for the ridges of denuded soil where runoff became very active after 40 minutes of simulated rain. The rain simulation tests have demonstrated the

strong stability of aggregates on bare plots where the structure degradation was only partial with rounded clods sitting on a crust built with fine particles infiltrated. It was also observed a change of erosion processes on bare plots with a decreasing runoff on the steepest slopes (25 and 40%), due to scouring of the topsoil opening continuously macro-pores.

Chapitre 17

Potentiel du paillage pour réduire l'érosion et restaurer la productivité des sols tropicaux : une revue en Afrique francophone

Éric ROOSE

Les agronomes préfèrent traditionnellement enfouir les matières organiques disponibles par un labour profond pour accélérer leur humification et la restitution des nutriments suite à leur minéralisation. Mais ce mode de gestion de la biomasse entraîne quelques inconvénients comme la « faim d'azote » et l'exposition des terres nues et peu cohérentes à l'agressivité des gouttes de pluies, la formation de pellicules de battance et l'augmentation sensible du ruissellement et de l'érosion. La disposition à la surface du sol des résidus des cultures précédentes (bananier, ananas, cannes à sucre, céréales, etc.), ou des herbes ou des branchages disponibles sur ou autour des parcelles, permet de couvrir au moins partiellement la surface du champ, d'absorber temporairement l'énergie des premiers orages et du ruissellement, de maintenir en surface les activités biologiques (comme sous la litière forestière) et la capacité d'infiltration, de réduire le ruissellement et l'érosion tout en redistribuant progressivement le carbone et les nutriments dans l'horizon superficiel. Cependant, bien que le paillage soit un des moyens les plus efficaces pour conserver l'eau et la terre, les résultats aux champs durant 2 à 5 ans n'ont pas montré un fort potentiel pour restaurer la productivité végétale des sols dégradés, en raison de leur faible disponibilité (feux de brousse, besoin de fourrage et vaine pâture en saison sèche) et de leur pauvreté en nutriments.

Traditionally, agronomists prefer to plough available organic matter into the soil in order to speed up their humification and their mineralisation. But this biomass management has some disadvantages like nitrogen fixation in microbes and bare incoherent soils exposition to the energy of rainfall drops and runoff, sealing crust and increasing runoff and erosion. Spraying on the soil surface crop residues (banana trees, pineapples, sugar cane, cereal straws, etc.) as well as herbs or wood branches available on or around the fields allows to cover partially or completely, to absorb temporarily the energy of the first rainstorms, to maintain the fauna activities and the infiltration capacity of the topsoil like in the forest litter and therefore to reduce drastically runoff and erosion. Simultaneously, litters restore progressively carbon and nutrients in the topsoil and improve the topsoil structure. Nevertheless, even if mulching is one of the best systems reducing runoff and erosion, trials in the fields did not show an increase of crop production because of the low biomass availability, the priority of forage need for breeding, the traditional use of savannas burning and the right of common grazing.

Chapitre 18

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)

Éric ROOSE, Nadine VERNUMIÈRE, Bounmanh KHAMSOUK

Pour protéger la baie du Trésor de l'envasement, le PNRM et l'IRD ont décidé d'unir leurs moyens pour évaluer les risques d'érosion d'un versant complètement décapé aménagé mécaniquement (dosses) et l'efficacité d'un apport de litière constituée de bagasse de canne à sucre, ainsi que la plantation de quatre espèces locales d'arbustes dans un système de cuvettes enrichies en compost urbain et en nutriments minéraux. La première année, l'érosion résiduelle a été évaluée à 30 t/ha/an sur un risque d'érosion potentielle calculé selon USLE de 120 t/ha/an. Mais dès que la surface des ravineaux a été couverte de 15 à 70 t/ha de bagasse peu décomposée, le ruissellement a été réduit de 50 % et l'érosion de 98 %. Dès la 3^e année, la litière s'étant décomposée, l'érosion a repris progressivement de l'importance. Dans les cinq ravineaux furent plantés simultanément quatre arbustes locaux dans 121 cuvettes enrichies à trois niveaux : rien, compost ou compost + NPK. Au bout de trois campagnes, ce système de plantation en milieu rocailleux acide et pauvre, en concentrant le ruissellement, l'apport de MO et de NPK dans des cuvettes de 60 litres, a nettement augmenté le nombre de survivants et leur vigueur.

De même le sol s'est progressivement amélioré : la surface est plus foncée (humus et humidité), la faune perforatrice a réduit la surface compacte et l'infiltration est plus élevée. Pour réduire le coût de revient de l'épandage, il a été suggéré de réduire la dose de paillis à 6 t/ha, de l'épandre en bande sur la ligne de plantation et de semer dans cette litière des plantes pionnières, si possible des légumineuses rampantes.

In order to protect the "Thesorus Bay" from sedimentation in the Martinique Island, PNRM and IRD administrations decided to evaluate erosion of a hillside completely eroded but stabilised by planks, the efficiency of sugarcane residues mulch and the plantation of four indigenous shrubs. The first year, residual erosion was evaluated to 30 t/ha/year on a potential of 120 t/ha/year along the USLE Wischmeier model. As soon as the soil surface was covered by 15 to 70 t/ha of sugarcane residues, runoff decreased by 50% and erosion by 98%. But after three years, the litter was partially mineralised and erosion increased again.

In the five plots (~ 100 m²), were planted simultaneously four indigenous shrubs in 121 micro-basins (60 litres). After three years, this system concentrating runoff water, compost and NPK increased clearly the number of survivals and their vigour.

The topsoil was also improved by humus, infiltration and fauna activities. In order to reduce the cost, it was suggested to limit the residue doses to 6 t/ha, to spread it only on the plantation lines and to sow pioneer creeping leguminous.

Chapitre 19

Valorisation agricole des déchets domestiques et industriels dans les agrosystèmes en Afrique de l'Ouest et à Madagascar

Dominique MASSE, M. NDIÉNOR, Edmond HIEN, Tovonarivo RAFOLISY, Yacine NDOUR, Alfonse BILGO, S. HOUOT, Christine AUBRY

L'urbanisation croissante des pays du Sud entraîne une place importante des agri-cultures urbaines ou péri-urbaines, répondant à la demande alimentaire et créatrice de richesse et d'emploi. Ces villes produisent également d'importantes quantités de déchets domestiques ou autres produits résiduels organiques issues des industries agroalimentaires qui constituent un enjeu environnemental (pollution) et économique (coûts de traitements élevés). Relativement riches en éléments fertilisants pour les sols, ces déchets sont une opportunité pour améliorer durablement la production agricole et la qualité des sols cultivés, notamment aux abords des villes.

Depuis 2006, des équipes pluridisciplinaires en Afrique subsaharienne mènent des travaux de recherche sur le compostage de déchets urbains et l'utilisation des criblés de décharge municipale au Sénégal, au Burkina Faso et à Madagascar. Ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les connaissances acquises à partir de ces expériences.

À Ouagadougou, différents composts de déchets urbains ont été testés sur des cultures de sorgho. L'apport de compost a significativement augmenté les rendements (de 2 à 5 fois par rapport à un témoin) au cours de deux années culturales. L'analyse par régression linéaire entre les rendements obtenus et les caractéristiques des composts a mis en évidence l'importance de leur teneur en phosphore, notamment lorsque les apports de ces intrants organiques sont concentrés au niveau des plantes. En revanche, lorsque les apports sont épanchés sur la surface de l'unité expérimentale, le taux de minéralisation (90 jours) mesuré en laboratoire a déterminé le rendement du sorgho.

Les criblés de la décharge municipale constituent des gisements de produits organiques. Des expériences menées à Madagascar, l'une pour la culture de tomate en condition paysanne et l'autre en station, ont clairement montré que le terreau issu de l'ancienne décharge d'Andralanitra, malgré son caractère très minéralisé et sa relative pauvreté, était un produit qui pouvait avoir une valeur d'amendement, voire de fertilisant. Il convient cependant de définir les principes d'apport et de s'assurer de l'innocuité totale de ce produit. En revanche, des criblés de la décharge municipale de Dakar testés sur des cultures de tomate n'ont pas permis d'égaliser les rendements obtenus avec des apports de fumier de cheval. Les faibles teneurs en matière organique et en azote de ce produit pouvaient expliquer l'absence d'effets pour cet essai mené en périphérie de Dakar.

L'effet des divers intrants organiques sur la production végétale est apparu très variable en fonction des situations. Il semble donc nécessaire de caractériser les propriétés d'un produit organique potentiellement valorisable et de confronter ces propriétés à celles des fertilisants ou amendements organiques utilisés dans les systèmes de culture. Seule cette condition garantira la réussite d'un projet de valorisation agricole des déchets municipaux ou industriels.

Urbanization in developing countries leads to prominence of agriculture urban or peri-urban areas, to meet the demand for food, wealth and employment. These cities also produce large amounts of wastes which constitute a major environmental (pollution) and economic (treatment costs) issue. Relatively rich in nutrients for soil, these wastes could be an opportunity to improve agricultural production particularly around cities.

Since 2006, multidisciplinary teams in sub-Saharan Africa have been conducting research on municipal wastes recycling in agricultural systems as composting or the use of screened materials from municipal landfills in Senegal, Burkina Faso and Madagascar. This chapter aims to present some results from these experiments.

In Ouagadougou, different composts of municipal wastes were tested on sorghum crops. The addition of compost significantly increased yields (2 to 5 times compared to control) measured on two years of crop. The linear regression between yields and composts characteristics highlighted the importance of the compost phosphorus content when the addition of the organic product was localized near the plant. The 90 days mineralization rate measured in laboratory conditions determined the sorghum grain yields when the same amount of organic products was spread over the experimental unit.

In Madagascar, organic matters extracted from municipal landfills by sieving, locally named “terreau”, are sold as fertilizers by local economic operators. The uses of this organic product for the tomato production and for the cultivation of ferralsol on the Highlands of Madagascar were tested. The results showed that this “terreau” had a positive effect on plant production as it was also observed with animal manure use. However, it is necessary to identify the practices to ensure the best efficiency and the total health safety of this product. In contrast, organic products extracted from the municipal landfill of Dakar tested on tomato crops have failed to match the yields obtained with conventional horse manure amendment. This could be explained by the low organic matter and nitrogen contents in these particular organic inputs.

The effect of various organic inputs, from recycling waste, crop production tested in these studies appeared highly variable depending on local circumstances. It therefore seems necessary to accurately characterize the properties of an organic product potentially recyclable and compare these properties to those of fertilizers or organic amendments used in cropping systems. Only this condition will ensure the success of agricultural projects of recycling municipal or industrial waste.

Chapitre 20

Performances des engrais minéraux et organiques sur la production de laitue et sur la fertilité d'un sol maraîcher à Nkolondom (Yaoundé, Cameroun)

Emmanuel SEH NGOUN, Michel OMOKO, Serge SIMON

Dans le souci de mettre au point des techniques de valorisation des déchets urbains au Cameroun, les impacts agronomiques, environnementaux et économiques de deux amendements organiques (fumier de poulet et compost d'ordures ménagères) ont été

évalués sur la culture de la laitue (*Lactuca sativa*). Pour y parvenir, un essai au champ a été conduit pendant deux cycles de culture en milieu paysan dans la zone maraîchère de Nkolondom, bas-fond péri-urbain de Yaoundé. Huit fertilisations ont été comparées dans un dispositif à quatre blocs complètement randomisés. Des analyses en laboratoire ont évalué l'évolution de la fertilité du sol maraîcher et les risques environnementaux.

Les fertilisations ont amélioré le rendement en laitue de manière très hautement significative pendant les deux cycles de culture. Les rendements ont varié de 1,7-1,2 kg/m² sur les parcelles témoins à 3,1-4,4 kg/m², suite à un apport combiné de fumier + NPK. Les amendements organiques donnent de meilleurs résultats lorsqu'ils sont associés aux engrais minéraux complémentaires.

L'épandage du fumier ou du compost permet de restaurer la fertilité du sol, notamment en azote, en matière organique, en somme de base échangeable et en CEC. Cependant, il a été observé une baisse de la teneur en phosphate du sol malgré les différentes fertilisations. Contrairement au compost, l'épandage du fumier a amélioré la teneur en potasse des parcelles.

La rentabilité économique des amendements organiques est très faible comparativement à celle de l'engrais minéral : le recours au fumier coûte 2 fois plus et celui du compost 20 fois plus que l'emploi de l'engrais minéral. Les compost et fumiers ne présentent pas de danger pour la santé des utilisateurs.

*In order to valorize the urban waste in Cameroon, agronomic, environmental and economic impacts of two organic amendments (poultry manure and compost of household waste) were estimated on the lettuce yield (*Lactuca sativa*). A trial was conducted during two cycles in the peri-urban valley of Nkolondom, (Yaounde, Cameroon). Eight treatments were compared in a device with four completely randomized blocks. Laboratory soil and amendments assessments were added to estimate the environmental and pedological impacts. Treatments improved highly the yield of lettuce during both cycles of cropping: the yields varied from 1.7-1.2 kg/m² (control) to 3.1-4.4 kg/m² (combination of manure + mineral fertilizer). Organic amendments give better results when they are associated to mineral fertilizers.*

The organic manures restored the soil fertility, in particular increasing nitrogen, organic matter and CEC. Potassium is also higher with animal manure, but a lower rate of phosphate was observed in the soil of the fertilized plots. However, the economic profitability of manure and compost is very weak compared to mineral fertilizer. No environmental impact was observed for the users of amendments.

Chapitre 21

Rôle des cultures associées pour restaurer la productivité des sols du nord-ouest du Cameroun

Serge VALET

Le XXI^e siècle doit faire face au grand défi d'alimenter à moyen terme 9 milliards d'humains, tout en réduisant la dégradation de sols. Cette étude, basée sur des essais et des enquêtes en milieu paysan des montagnes de l'Ouest du Cameroun, explique

comment les cultures associées peuvent restaurer la productivité des sols tropicaux et assurer une production soutenue supérieure de 10 à 200 % aux monocultures intensifiées, tout en réduisant l'utilisation des engrais minéraux. L'agriculture agroforestière (AF) consiste à prendre la nature comme modèle : les arbres recyclent les nutriments récupérés en profondeur et leur litière protège la surface du sol de l'agression des gouttes de pluie. Elle renforce les systèmes de cultures associées traditionnelles (3 à 47 espèces concernées) et innovantes par des techniques biophysiques pour atteindre de façon plus efficace et durable la résilience des agroécosystèmes aux effets du changement climatique et de la baisse de la ressource hydrique et nutritionnelle. En augmentant le couvert végétal et en diversifiant l'enracinement, elle exploite mieux le sol, l'eau et la lumière, produit plus de biomasse et protège mieux le sol de l'érosion, des adventices et des attaques des insectes et des maladies. Les Indices d'efficacité d'équivalence (IEE) du N varient de plus de 2,5 à plus de 3,6 pour le maïs des associations bi et trispécifiques. Elle table sur les services écosystémiques fournis par ces associations plurispécifiques.

The 21th century has to face big problems: how to feed 9 billions of humans and simultaneously improve the soil qualities. This study, based on trials and inquirement with the farmers of the NW Cameroon mountains, explains how mixed/intercropping can restore the tropical soil productivity and ensure a sustainable production superior (10 to 200%) to the same pure cultures. The agroforestry tries to copy the nature: the trees recycle nutrients that their roots catch in the deep soil horizons and their litter protects efficiently the topsoil against erosion. This complex system reinforces innovative mixed peasant cropping systems by biophysical techniques to reach with the most sustainable and efficient manner the resilience of the climatic change, the water and nutritional resource falling. Developing a larger canopy and a deep rooting system mixed-cropping exploits better soil nutrients, water and light, products more biomass and protects more efficiently the soil against erosion and invaded weeds, insects and diseases. The Efficiency Equivalent Ratio of N varies about 2.5 to 3.6 for tri and bispecific associations. Mixed cropping produced security and numerous ecosystemic services.

Chapitre 22

Gestion des micro-organismes symbiotiques pour une restauration durable de la productivité des agrosystèmes tropicaux et méditerranéens

Claudine FRANCHE, Robin DUPONNOIS

Une des principales conséquences de la surexploitation des sols et de la paupérisation du couvert végétal est une augmentation des processus d'érosion qui entraîne une baisse de la fertilité physique, chimique, mais également biologique (ex : microflore tellurique). Parmi les composantes microbiennes particulièrement sensibles à ces phénomènes d'érosion, figurent les micro-organismes symbiotiques (*rhizobia*, *Frankia*, champignons mycorhiziens) connus pour être des composantes clés dans le fonctionnement des principaux cycles biogéochimiques telluriques (C, N et P).

De nombreux travaux ont montré l'importance de la gestion de ces micro-organismes symbiotiques dans les pratiques culturales visant à améliorer la productivité des agrosystèmes. Dans ce chapitre, nous décrirons les différentes stratégies de gestion du potentiel des sols en agents microbiens symbiotiques *via* l'inoculation contrôlée de micro-organismes ou d'amélioration d'itinéraires culturaux par l'introduction de plantes nures à travers différents exemples d'expérimentations réalisées en milieu tropical et méditerranéen.

Degraded ecosystems are usually characterised by a disturbed vegetation cover accompanied by a rapid erosion of soil surface. The desertification process involves a loss or reduction of major physicochemical and biological soil properties and significantly alters the inoculum potential of symbiotic soil microbial communities, more particularly the symbiotic microorganisms (rhizobia, Frankia, mycorrhizal fungi) known to be key components in the main terrestrial biogeochemical cycles (C, N and P). Many studies have shown the importance of the management of these symbiotic microorganisms in agricultural practices to improve agroecosystem productivity. In this chapter, we describe the different strategies for managing the soil potential of symbiotic microbes via the controlled inoculation of symbiotic microorganisms or the improvement of crop management by introducing nurse plants through various examples of experiments carried out in tropical and Mediterranean areas.

Chapitre 23

Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux

Éric BLANCHART, Pascal JOUQUET

Les invertébrés de la macrofaune du sol, comme les vers de terre et les termites, jouent un rôle clé dans le fonctionnement des sols. Ils décomposent la litière et l'incorporent au sol, ils construisent et maintiennent la structure du sol en creusant des galeries et en modifiant l'agrégation du sol, ils contrôlent en partie la diversité et les activités microbiennes, ils protègent les plantes contre les maladies et les pathogènes. En modifiant l'agrégation et la porosité du sol, en décomposant la matière organique, ces organismes participent à l'infiltration et au stockage de l'eau dans les sols, au recyclage des nutriments, à la régulation du ruissellement de l'eau, au stockage du carbone. Ces processus sont à la base des services écosystémiques. Pourtant, le rôle bénéfique de ces organismes dans la productivité des sols et la fourniture de services écosystémiques est encore mal connu et peu utilisé par les gestionnaires du sol (agriculteurs, etc.). Ils sont pourtant des indicateurs de la qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant de mieux gérer et améliorer la fourniture de services par les agroécosystèmes tropicaux.

Invertebrates of soil macrofauna, such as earthworms and termites, are key organisms regarding soil functioning. They are involved in litter decomposition and incorporation in soil, they build and maintain soil structure through burrowing and modification of soil aggregation, they partly control microbial diversity and activities, and they

protect plants against disease and pests. Doing this, they contribute to water infiltration and storage in soil, to nutrient recycling, to the regulation of water runoff, and to carbon sequestration. These ecosystem processes are at the roots of ecosystem services. Nevertheless, the beneficial roles of these ecosystem engineers in soil productivity and the supply of ecosystem services are still very poorly used by farmers and soil stakeholders. But they are relevant indicators of soil quality and should be considered as a resource potentially allowing a better soil management and promoting the provision of ecosystem services by tropical agroecosystems.

Chapitre 24

La valorisation agro-énergétique des déchets d'abattoir par méthanisation

J.L. FARINET

En zone soudano-sahélienne les abattages contrôlés des viandes engendrent la production d'une grande quantité de déchets essentiellement organiques facilement mobilisables par méthanisation. Les déchets sont transformés par voie anaérobie dans un réacteur fermé. Le résidu de digestion après maturation donne un compost utilisable par les agriculteurs. En Afrique les déchets des carcasses sont généralement bien valorisés sauf le sang et le contenu des panses et intestins, qui vont constituer 80 % de la charge des eaux usées d'un abattoir. Avec les fumiers récupérés sur les parcs d'attente des animaux, ces déchets représentent 280 kg/tonne de carcasse avec 15 % de matières sèches soit 18 300 Tc/an pour l'ensemble du Sénégal. En les laissant sécher en tas à l'air, ces déchets donnent un compost riche en MO (52 %), en azote (2 %), en phosphore (2,4 %) et en bases (5,2 %).

Chapitre 25

Valorisation des urines humaines et animales pour la fertilisation des sols tropicaux : une revue

Éric ROOSE, Ernest KOUAKOUA

Vu le manque de biomasse nécessaire pour assurer l'élevage, le fumier et le paillage, les auteurs recherchent comment améliorer l'efficacité de la valorisation des déchets animaux et humains. Les apports par les urines humaines (550 l/he/an) sont limités (N 4 à 10 kg/an + K 1,5 + P 0,5 + 0,5 kg/an de Ca + Mg + oligoéléments + hormones). Appliquées sur de petites surfaces en maraîchage et combinées aux fèces, les urines peuvent entretenir la fertilité de la surface nécessaire pour produire ces légumes ou servir d'accélérateur de compost. Les urines animales sont plus abondantes, mais répandues pour moitié sur le parcours et l'autre sur le lieu de repos. L'action des urines (forme soluble) est beaucoup plus rapide et fugace que celle des fumiers qui comprend une majorité de nutriments piégés avec les matières organiques (MO) non digestibles. Les urines augmentent de 50 à 70 % la production végétale du lieu de chute et favorisent les graminées et nitrophiles aux dépens des légumineuses fixatrices

d'azote (inhibition des racines) en augmentant localement le pH du sol. L'apport des urines sur la litière est fondamental pour la maturation du fumier et son enrichissement en azote et potasse.

Authors try to evaluate the efficiency of urines and faeces from human origin. They bring limited quantity of nutrients (N 10 + K 1.5 + P 0.5 + 0.5 of Ca + Mg + various oligo-elements and hormones). Applied on little surfaces of market gardening (300 m²) they bring enough nutrients to maintain the productivity of the ground or to accelerate composting. Animal urines are more abundant but sprayed on the grazing land and 50 % on watering or resting areas. The effects of urines are rapid but transient on the increasing yield. On the spots (0,5 m²) they felled, urines increase the grass production as much as 50-70 % during three months. They increase the development of nitrophiles grasses but reduce the production of leguminous and the fixation of atmospheric-N. Bringing urines on the litter covering the farmyard is essential to accelerate the maturity and the richness of manure.

Chapitre 26

Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux

Philippe HINSINGER, Yacine NDOUR, Thierry BECQUER, Lydie CHAPUIS-LARDY, Dominique MASSE

Ce chapitre résume les enjeux autour du cycle biogéochimique de P, les déterminants de la biodisponibilité du P des sols pour les cultures, et les moyens mobilisables pour gérer de façon durable leur nutrition phosphatée. De nombreux sols des régions intertropicales sont limitants en P, en raison de leur fort pouvoir fixateur et de leur faible teneur en P. Les ressources en phosphates naturels utilisés pour fabriquer les engrais phosphatés sont finies, remettant en cause la durabilité des pratiques de fertilisation à l'échelle mondiale. L'augmentation inéluctable des prix de ces fertilisants minéraux risque de condamner les agriculteurs des pays du Sud à fertiliser insuffisamment. La valorisation de l'ensemble des ressources (roches, déchets et déjections) disponibles localement et l'intensification écologique des agroécosystèmes sont donc nécessaires. Cette dernière repose sur l'exploitation de la diversité végétale, au travers de la sélection de variétés efficaces dans leur capacité d'acquisition et d'utilisation de P, et de l'utilisation de rotations ou d'associations de cultures qui permettent de mieux utiliser les différents pools de P du sol, minéral et organique. Il s'agit également de mieux utiliser les intrants organiques comme source alternative de P, ou les biofertilisants (inoculants microbiens). La nécessité de préserver le P des sols tropicaux et de minimiser ses pertes par érosion renforce, en outre, le besoin de développer des approches telles que celles de l'agriculture de conservation et la GCES.

This chapter summarizes the issues around the biogeochemical cycle of P, the drivers of soil P bioavailability for crops, and the possible means for the sustainable management of their P nutrition. Many soils of tropical regions are P-limiting, due to their high P fixation capacity and low P content. Rock phosphate resources that are used to make P fertilizers are finite, which questions the sustainability of P fertilization at the global level. The consequent increase of P fertilizer prices is

a major limitation for P fertilization in developing countries. Making use of all the P resources (rocks, wastes and effluents) that are available locally and implementing an ecological intensification of agroecosystems are thus necessary. The latter is based on better exploiting crop diversity, through breeding P-efficient crop genotypes, and using crop rotations or intercropping systems that make better use of the various pools of soil P, both organic and inorganic. Making use of organic inputs as alternative sources of P, or biofertilizers (microbial inoculants), is also part of the strategy. It is necessary to preserve the P resources in tropical soils and minimize the erosion losses through developing approaches such as conservation agriculture and land husbandry.

Chapitre 27

Le semis direct sous couverture végétale. Une voie de restauration durable de la productivité des sols semi-arides du Maroc

Rachid MRABET

La dégradation de la qualité des sols et l'érosion hydrique sont des sujets de préoccupation croissante dans la région méditerranéenne. En effet, la mauvaise gestion des résidus de récolte et les faibles quantités restituées aux sols se traduisent par un appauvrissement de la matière organique, une détérioration de la fertilité physique et chimique des sols et des niveaux d'érosion supérieurs aux taux de tolérance. Le semis direct sous couverture végétale (SD/CV) a des conséquences favorables sur ces phénomènes en réduisant l'efficacité érosive des pluies. En effet, la suppression des labours et le maintien du couvert végétal permettent de dissiper l'énergie des pluies et du ruissellement et de diminuer les pertes en sédiments et nutriment. SD/CV favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. En plus de l'effet protecteur du SD/CV, les recherches entreprises aussi bien en station expérimentale que chez des agriculteurs ont permis de conclure que généralement ces systèmes améliorent les taux et la qualité des matières organiques des sols, particulièrement en surface. Ces augmentations de stocks organiques des sols sous SD/CV ont été liées aux réductions des pertes de CO₂. Ces mêmes recherches ont montré que les propriétés physiques (agrégation, porosité) hydrodynamiques et chimiques (teneurs en éléments nutritifs) s'améliorent progressivement au cours du temps et en fonction des apports de résidus de récolte. De nombreux essais mis en place dans différentes conditions pédoclimatiques ont permis des améliorations substantielles des productivités et des efficacités d'utilisation de l'eau de plusieurs cultures stratégiques pour le pays. L'augmentation de rendement du blé varie de 2,4 à 146 % selon la rotation, le type de sols et la durée d'installation du SD/CV.

Moroccan drylands are characterized by an unfavorable climate, marked by spatio-temporal irregularities, coupled with growing tensions on soil and water resources, which stresses the importance of a progressive orientation towards an economically feasible and environmentally viable agriculture. Rational use of no-tillage (NT) technologies, conservation cropping systems and crop residue management have noticeable impacts on crops and soils. Agronomic benefits from no-tillage systems

compared to traditional and conventional tillage systems are well shown from research sites, either at the experimental or farmer level. There is an increase in wheat yield under no-tillage systems varying from 2.4 to 146% depending on NT history, cropping system and soil type. The efficiency of a no-till system for carbon sequestration is enhanced when used in combination with high intensity wheat rotation and maintenance of residue cover. In other terms, while soil organic matter (SOM) levels in Morocco are low, i.e. < 1–2%, conservation cropping systems managed under no-tillage technologies caused sustainable increases in crop yields associated with higher SOM. No-tillage system increased organic matter labile fraction and soil pool in nitrogen, phosphorus and potassium. Water conservation and soil quality improvements were found proportional to residue cover level under no-tillage. As an important option for implementing no-tillage in farmer's system, combining partial straw exportation and elimination of tillage practices was found to satisfy both water storage for stabilizing wheat yield and enhancement of soil organic matter. Reductions in soil erosion and carbon emissions under no-tillage systems were obvious from recent research studies.

Chapitre 28

Potentiel du semis direct et des matières organiques pour restaurer durablement la productivité des sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun et du Sud-Mali

Zachée BOLI, Drissa DIALLO, Éric ROOSE

Pour comparer le labour conventionnel aux divers systèmes de semis direct (non-labour ou travail à la dent sur la ligne de plantation) et diverses utilisations des matières organiques, deux ensembles de parcelles d'érosion de 100 à 1 000 m² (17 au Mali et 57 au Cameroun) ont été aménagées sur des sols ferrugineux sableux fragiles dans la zone des savanes soudaniennes arborées. Après 3 à 4 ans où il a plu entre 900 et 1 500 mm par an, il est évident que le semis direct sous litière de légumineuse ou d'adventices réduit le risque de ruissellement (- 20 %) et d'érosion (- 70 %). Cependant, comme les engrais NPK ont été distribués généreusement, les plus hauts rendements ont été observés sur le labour conventionnel (+ 30 à 50 % de grains de maïs et 10 % de coton en plus ou en moins selon le déroulement de la saison des pluies). Il semble que le coton soit moins sensible sur ce sol sableux au lessivage de l'azote durant les deux premiers mois que le maïs. La séquestration du carbone par le système du semis direct dans la litière n'est pas évidente sur les sols très sableux, mais elle est plus importante sur des sols contenant plus de 25 % d'argile en surface. Le système du semis direct utilisant du glyphosate comme herbicide fut vite adopté par les petits paysans, car il leur a fait gagner du temps durant la période critique du semis et des sarclages. Le problème réside dans la faible couverture de la surface du sol par la litière en début de cycle à cause des traditions africaines de la vaine pâture et des feux de brousse durant la saison sèche qui suit la récolte. L'apport de 3 t/ha de poudrette de chèvres, bien qu'il n'ait guère influencé le ruissellement ni l'érosion, a toujours produit les meilleurs rendements par rapport à l'enfouissement des résidus de culture, au mulch de paille ou d'ombrière en plastique ou même aux courtes jachères de légumineuses.

To compare conventional tillage to various direct drilling systems (no-tillage or tooth tillage reduced to the sowing line), two sets of runoff plots (100 to 1,000 m²) (57 in Cameroon and 17 in Mali) were built on fragile sandy Alfisols under aggressive Sudanese savannah areas. After 3 to 4 years with 900 to 1,500 mm of rainfall, it was clear that the litter/legumes/weeds cover of “no-till” reduced the runoff (- 20%) and erosion risks (to 1/3) compared to the conventional tillage system. But as a consequence of intensive mineral fertilisation, the highest yields were observed in the plowed fields (30 to 50% more of maize grain + or - 10% for cotton). It seems that cotton is less sensitive to excess of drainage and nitrogen leaching than maize during the first two months. Carbon sequestration by direct drilling system was not systematic on very sandy soils but more important if the clay content is over 25%. The direct drilling system with Roundup was very fast adopted by small farmers as a system alleviating the labour during the sowing and weeding period, but the soil surface was not well covered because of the traditional African habits of free grazing and bushfires during the dry season. Bringing 3 t/ha of goat faeces did not decrease the erosion risks but produced better crop residues ploughed in the soil or even short fallows of leguminous.

Chapitre 29

Influence de diverses techniques culturales (SCV-labour) sur l'érosion et sur le rendement en maïs, riz, haricots sur les ferralsols des Hautes-Terres malgaches

Norosoa RAZAFINDRAMANANA RAKOTONIAINA, Jean-Marie DOUZET,
Bernard BARTHÈS, Lisa RABEHARISOA, Alain ALBRECHT

Vu la dégradation de la productivité des sols labourés, il fallait tester l'effet du semis direct sous litière végétale pour contrôler l'érosion hydrique et améliorer le rendement des cultures pluviales sur les Hautes-Terres centrales malgaches. L'essai a été entrepris sur un dispositif de parcelles d'érosion à Andranomanelatra, sous pluies naturelles. Le dispositif compare plusieurs traitements en semis direct au labour conventionnel (bêchage à l'*angady*). Des mesures du ruissellement, de l'érosion et du rendement des cultures principales ont été effectuées durant quatre campagnes culturales. Les résultats ont confirmé l'effet positif des systèmes de semis direct pour contrôler le ruissellement et l'érosion. Par contre, les systèmes en semis direct n'améliorent pas automatiquement les productions. En effet, les rendements en grain de haricot sont significativement plus élevés sur les parcelles en semis direct que labourées. Alors que pour les rendements en maïs et en riz pluvial, d'une manière générale, ils sont significativement plus faibles en semis direct avec couverture vivante à base de *Brachiaria ruziziensis* que pour les parcelles labourées. Au fil du temps, il y a une nette augmentation des rendements en grain de riz et de maïs pour l'ensemble des traitements étudiés, avec une hausse encore plus visible sous systèmes en semis direct.

The purpose of this study was to test the potential of no-tillage management to control erosion and improve crop yields in the Central Highlands of Madagascar. This study was carried out in Andranomanelatra under natural rainfall conditions.

*Conventional tillage and direct seeding system were imposed and compared in the experimental design. Runoff, erosion rates and crop yield were measured during four cropping periods. The results showed that direct seeding systems were significantly better to control erosion rates as compared to conventional tillage system. But direct seeding system does not systematically improve crop yield after 4 years. Indeed, common bean grain yields were greatest on direct seeding system than conventional tillage system. On the other hand, maize and rainfed rice yield were significantly lower in direct seeding mulch-based systems using living mulches (*Brachiaria ruziziensis*) than conventional tillage system. Over time, there is a real increase in rice and maize grain yields for all treatments studied with a larger increase in direct seeding system than conventional tillage system.*

Chapitre 30

Usages agropastoraux des biomasses végétales et conséquences sur l'adoption du semis direct sous couvert végétal au nord du Cameroun

Patrick DUGUÉ, Paul BELCHI, Lise PARESYS, Marine RÉTIF, Jean-Pierre OLINA

La couverture végétale du sol constitue un moyen efficace de réduire le ruissellement et l'érosion en Afrique soudano-sahélienne. Elle contribue aussi à enrichir le sol superficiel en matière organique et en nutriments. Cette pratique constitue un élément central du système de culture sous couvert végétal (SCV) qui a été vulgarisé au nord du Cameroun. Mais il existe de fortes concurrences entre les usages des biomasses mobilisables pour cette couverture, en premier lieu l'alimentation du bétail qui reste en saison sèche une préoccupation majeure des producteurs de cette région. L'introduction du *Brachiaria ruziziensis* en culture pure ou associée aux céréales donne de nouvelles perspectives pour accroître l'offre en biomasse pour le bétail, mais aussi pour la couverture du sol. L'usage des émondes des arbres ou des haies vives et des légumineuses herbacées comme paillis existe, mais plus rarement. Il apparaît comme une voie d'amélioration possible de l'offre en biomasse fourragère et de couverture. Par ailleurs, il convient d'associer aux innovations techniques des innovations organisationnelles indispensables pour modifier les modes de gestion des ressources naturelles et des espaces et assurer un partage équitable de la biomasse disponible entre les différents usages (paillage, fourrage-vaine pâture, feux).

*Green cover is an effective way to reduce runoff and erosion in Sudano-Sahelian Africa. It also helps to enrich the topsoil with organic matter and nutrients. This practice is a central element of direct seeding mulch-based cropping (DMC), which is promoted in northern Cameroon. But there is a strong competition between those different uses of biomass available for this coverage, primarily as livestock feeding in the dry season, which remains a major concern for producers in the region. The introduction of *Brachiaria ruziziensis* offers new opportunities to increase the supply of biomass for livestock but also for the soil cover. The use of living hedges and tree prunings and leguminous as mulch exists but much more rarely. It appears as a possible way to improve the supply of feeding biomass and cover. Moreover, it is*

advisable to associate with technical innovations the organizational innovations required to change natural resources management and assure an equitable sharing of the available biomass between different uses.

Chapitre 31

Effets du *Mucuna* sur la production et la durabilité de systèmes de culture à base de maïs au Sud-Bénin

Bernard BARTHÈS, Anastase AZONTONDE, Christian FELLER

La matière organique du sol conditionne la productivité et la durabilité des systèmes de culture, mais maintenir son niveau est problématique dans les régions agricoles densément peuplées. Les travaux présentés avaient pour objectif d'évaluer l'effet de la légumineuse de couverture *Mucuna pruriens* var. *utilis* sur la fertilité et la conservation des sols dans un système à base de maïs au Sud-Bénin. L'étude a été conduite en parcelles d'érosion (240 m², pente 4 %) de 1988 à 1999 sur sol ferrallitique sableux devenant argilo-sableux en profondeur, sous climat tropical subhumide. Trois traitements étaient comparés, tous avec travail du sol à la houe : culture pure de maïs sans apport (notée Trad) ou avec fertilisation minérale (notée NPK) ; association maïs-*mucuna* (notée Muc), le *mucuna* étant semé un mois après le maïs. Le rendement en grain du maïs était équivalent pour les trois traitements en 1988 (500 kg.ha⁻¹) ; en fin d'essai il avait diminué sur Trad (200 kg.ha⁻¹), et augmenté sur NPK (2,5 Mg.ha⁻¹) et surtout Muc (3,5 Mg.ha⁻¹). De même, le stock de carbone du sol à 0-40 cm de profondeur ne différait pas entre traitements en 1988 ; en 1999, il avait varié de - 2, + 2 et + 15 MgC.ha⁻¹ sur Trad, NPK et Muc, respectivement. En moyenne, le taux de ruissellement annuel était de 28, 12 et 8 % sur Trad, NPK et Muc, et l'érosion annuelle de 34, 9 et 3 Mg.ha⁻¹.an⁻¹, respectivement. Le mulch épais de *mucuna* enrichit le sol en matière organique et en azote, et permet d'améliorer le rendement et de diminuer le ruissellement et l'érosion.

*Soil organic matter determines the productivity and sustainability of cropping systems, but its maintaining is challenging in densely populated rural areas. The experiment presented here aimed at assessing the effects of the legume cover crop *Mucuna pruriens* var. *utilis* on soil fertility and conservation in a maize-based cropping system in southern Benin. The study was carried out in runoff plots (240 m², 4% slope) from 1988 to 1999 on a sandy Ultisol becoming more clayey with depth, under subhumid tropical climate. Three cropping systems were compared, all hand-hoe tilled: pure maize without any input (denoted Trad) or with mineral fertilizers (denoted NPK); maize-*mucuna* association (denoted Muc), *mucuna* being sown one month after maize. Maize grain yield was similar for the three treatments in 1988 (500 kg ha⁻¹); by the end of the trial it had decreased on Trad (200 kg ha⁻¹), but had increased in NPK (2.5 Mg ha⁻¹) and Muc (3.5 Mg ha⁻¹). Similarly, carbon stock at 0-40 cm depth did not differ between treatments in 1988; in 1999 it had varied by - 2, + 2 and + 15 MgC ha⁻¹ on Trad, NPK and Muc, respectively. Mean runoff rate and soil losses were 28, 12 and 8%, and 34, 9 and 3 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ in*

Trad, NPK and Muc, respectively. The thick mulch of mucuna enriched the soil in organic matter and nitrogen, and resulted in yield increase and runoff and erosion decrease.

Chapitre 32

Restauration des terres de parcours dans les monts de Beni Chougrane (NO Algérie) par la mise en défens et l'enrichissement en légumineuses

Boutkhil MORSLI, Abdelkrim HAMOUDI

La restauration des terrains de parcours pose un problème d'actualité préoccupant en Algérie. L'appauvrissement des sols, la diminution de la phytomasse et l'amplification de l'érosion constituent des indices caractéristiques de la dégradation des parcours. La dégradation des couvertures pédologiques et végétales sur ces zones de parcours est attribuée aux conditions climatiques, mais surtout aux activités humaines et animales.

Les résultats obtenus par les expérimentations effectuées sur ces zones ont montré les grandes possibilités de restauration des couvertures végétales et pédologiques. Une technique, comme la mise en défens, a donné des résultats positifs sur la régénération et la production de biomasse. Elle a permis d'une manière significative d'améliorer la fertilité du sol (augmentation de 5 à 20 % des MOS), les caractéristiques biophysiques du sol, la biodiversité (le nombre d'espèces est multiplié par 2,5), l'infiltration et de renforcer la résistance à l'érosion (réduction de l'érosion de 2 à 14 fois). L'ensemencement et les plantations fourragères aussi ont permis une augmentation du taux de couverture et de la biomasse qui ont un effet positif sur l'amélioration de la productivité des sols (augmentation de plus de 5 fois). Ces interventions n'auront des résultats concrets que si elles sont réalisées dans un cadre global de développement agropastoral et avec l'adoption d'une approche participative.

Rangelands restoration is a topical preoccupation in Algeria. Soil depletion, biomass plant reduction and erosion amplification are typical of rangeland degradation. Degradation of soil and plant cover on these rangelands is partially attributed to climatic conditions but mainly to human activities.

In these areas, the experimental results on runoff plots have shown great potential for soil and plant cover restoration. The protected grazing areas gave positive results on the regeneration and biomass production and significantly helped to maintain soil fertility (increasing 15 to 20% of SOC), enhance biodiversity (the number of species is multiplied by 2.5), improve infiltration and soil resistance to erosion (erosion reduction from 1/2 to 1/14). Enrichment and fodder plantations have also increased the coverage and biomass and have a positive effect on improving soil productivity (increase of more than 5). These interventions will have concrete results only if they are conducted in a comprehensive framework for agropastoral development and adoption of a participatory approach.

Chapitre 33

La lutte antiérosive, la GCES et la restauration de la productivité de sols dans les montagnes du nord de l'Algérie

Éric ROOSE, Mourad ARABI, Lakhdar BOUROUGAA, Abdelkrim HAMOUDI,
Boutkhil MORSLI, Nadia MEDEDJEL, Mohamed MAZOUR, Khalef BRAHAMIA

Face aux graves problèmes d'érosion observés dans les montagnes des zones méditerranéennes du nord de l'Algérie, de gros moyens ont été développés dès 1925 pour terrasser les versants fragiles, reforester les têtes de vallée et restaurer les ravines et les oueds (DRS). Devant le manque d'efficacité de cette stratégie, une nouvelle approche (la GCES) a été proposée et testée sur 50 parcelles, une dizaine de ravines situées dans trois wilayas pour évaluer les risques d'érosion, de ruissellement et le potentiel de restauration de la productivité des principaux sols et systèmes de production. Globalement, les résultats d'une dizaine d'années de recherche montrent que l'érosion en nappe reste modérée, car les sols sont peu érodibles (argileux, saturés en calcium et caillouteux), les pluies généralement peu agressives mais parfois saturantes, ce qui provoque du ravinement et des inondations. Sur des pentes de 10 à 45 %, l'érosion est plus décapante (érosion en rigole et aratoire) qu'appauvrissante en particules fines. L'intensification des systèmes de production (travail du sol réduit, l'adaptation raisonnée de la fumure, la protection du sol par une litière ou par des résidus de culture) a permis de réduire les risques de ruissellement et d'érosion, même lors des averses les plus importantes. En outre, ils ont augmenté remarquablement la production des récoltes (grains et fruits) et de biomasse (herbe et pailles), ce qui entraîne une forte amélioration des revenus nets des fermiers et des propriétés du sol liées à l'apport de matières organiques (séquestration du carbone). Il s'avère que la réhabilitation de la couverture végétale est plus rapide que la restauration des principales propriétés des sols : c'est tout le système de production qu'il faut repenser à l'échelle du versant et du terroir.

Facing great erosion problems in the Mediterranean mountains of northern Algeria, heavy equipments were used since 1925 in order to grade terracing the hill slopes, regreening the upper valleys and restoring the gullies and wadies: this approach was called "defense & soil restoration" (DRS). Because of the inefficiency of this top-down approach, a new approach was experimented on 50 runoff plots, a dozen of gullies located in three wilayas in order to evaluate the erosion risks and the possibility to restore the productivity of the main soils and production systems in northern Algeria. Globally the ten-year data obtained by the research show that sheet erosion is moderate because soils have low erodibility (high rate of clay, saturated in calcium, and stony), the rains are not very aggressive but sometimes so abundant that they cause gullies and inundations. On 10 to 45% slopes tested, erosion is more scouring (tillage erosion, rills & gullies) than fine particles eroded selectively. Intensification of farming systems (reduced tillage, rational fertilizing, soil surface protection by a litter of crop residues) allowed the erosion risk reduction, even during the main storms. More interesting for farmers, these systems increased the yield of grains & biomass, producing a large improvement of the net income,

but also the soil qualities related to organic matters (carbon sequestration). It appeared that the vegetation cover is easier to restore than the soil qualities. All the farming system must be thought again.

Chapitre 34

Adaptations de l'agriculture à l'aridité dans les îles Canaries De la collecte du ruissellement au mulch de pierres volcaniques

Marisa TEJEDOR, Conception JIMÉNEZ, FRANCISCO DÍAZ

Dans les régions extrêmement arides (Pluie = 150 mm, ETP = 1 800 mm) des îles Canaries, à l'est de Fuerteventura et de Lanzarote et au sud de Tenerife, l'agriculture a été maintenue depuis des décades par divers systèmes traditionnels de gestion du ruissellement. Ces systèmes ont montré leur efficacité durable pour augmenter la production agricole dans cet environnement peu favorable sans entraîner la dégradation des ressources en eau et en sols. Parmi d'autres, les techniques de capture du ruissellement (*gavias*) et de mulch de gravier (*arenados*) jouent encore localement un rôle important dans l'agriculture de certaines îles. Bien que le rôle majeur de ces systèmes est d'augmenter la disponibilité en eau pour les cultures hors irrigation, ces techniques permettent aussi la production agricole sur des sols naturellement salés et, pour certaines d'entre elles, sans apport d'engrais minéraux ou organiques. Dans ce chapitre sont décrits deux de ces techniques montrant leur intérêt pour résoudre certains problèmes de contraintes de l'agriculture en zones arides telles que le manque d'eau, la salinité et la sodicité, la faible fertilité des sols.

In arid lands (Rain = 150 mm, PET = 1 800 mm) of Canary Islands (Fuerteventura, Lanzarote, Tenerife), agriculture has been sustained for decades by several traditional rainfed agricultural systems. These systems have been sustainable as a means to increase the crop production in very unfavourable environment without degradation of soil & water resources. Among these techniques, those based on runoff-capture (gavias) or on lithic-mulch (arenados) remain today a significant component of the agriculture on some islands. Although the primary goal is to increase the water supply for crops, making unnecessary conventional irrigation, equally important factors are that these techniques permit crop production in natural saline soils and sometimes without addition of mineral or organic fertilizers. In this chapter, the main techniques are described and data reported in order to show its efficiency solving environmental constraints such as lack of water, salinity and low fertility.

Chapitre 35

Création de champs cultivés en terrasses dans les monts Mandara et réhabilitation des vertisols dans la plaine du Diamaré (nord du Cameroun)

Christian SEIGNOBOS, Michel TCHOTSOUA

Le nord du Cameroun est, avec les monts Mandara, une référence en Afrique en matière d'aménagement en terrasses. Ces réseaux de terrasses en gradins isohypses, qui cisèlent l'intégralité des pentes et infiltrent toutes les pluies, se voient complétés, généralement dans les talwegs plus menacés par l'érosion, par des dispositifs de canaux-drains souvent dédiés à des cultures particulières attirées par l'eau. Dans les plaines du Diamaré, ce n'est plus l'entièreté du terroir qui, comme en montagne, suit un modèle cohérent d'aménagement. Les techniques antiérosives n'intéressent que certaines parties des terroirs. Il s'agit des vertisols, voués à une culture stratégique en ce qu'elle est réputée prévisible, celle des sorghos repiqués de contre-saison dont la part dans l'agrosystème n'a cessé de croître depuis les années 1950. Ces stratégies de lutte contre l'érosion et l'entretien de la fertilité, en dépit de leur degré de sophistication et de leur efficacité par le passé, ont perdu de leur pertinence avec les mutations démographiques, sociales et techniques. Aujourd'hui, la lutte antiérosive est devenue un impératif pour l'ensemble des communautés agricoles et pastorales du nord du Cameroun, mais les recettes proposées par les agents du développement n'ont pas jusqu'ici entraîné l'adhésion attendue.

The Northern Cameroon, along with the Mandara Mountains, is a reference to Africa in terms of terracing. These networks of curvilinear terraces, which carve the entire slope, are completed, generally in the valleys more threatened by erosion, by either channel-drain often dedicated to specific crops living near water. In the plains of Diamaré, it is not the entirety of the land, like in the mountains, following a consistent pattern of development. Erosion control techniques concern only certain parts of the land. These lowland Vertisols, dedicated to a strategic culture as it is deemed foreseeable, that of off-season transplanted sorghum whose share in the agro-ecosystem has grown steadily since the 1950's. These strategies against erosion and maintenance of fertility, despite their sophistication and effectiveness in the past have lost their relevance with the demographic, social and technical pressure. Today, erosion control has become an imperative for all agricultural and pastoral communities in northern Cameroon, but the solutions suggested by the development officers have not so far gained support.

Chapitre 36

Création de champs cultivés et gestion de l'eau et de la fertilité des sols sur le plateau Dogon au Mali

Drissa DIALLO

Pour protéger leurs cultures, les Dogons ont migré au XIV^e siècle sur le plateau de Bandiagara qui était alors un excellent refuge contre les multiples agressions

découlant de la constitution des grands empires. Ils ont développé dans cette zone hostile et aride des techniques de gestion des matières organiques, de l'eau (zaï, billonnage, terrasses et cordons de pierres, création de surfaces irriguées sur des dalles de grès dans des niches en nid d'abeilles) pour produire des céréales (mil en particulier) et des légumes (surtout échalote).

In order to protect their way of living, Dogon people migrated from the "Mandé" region, south-west Mali to the Bandiagara Plateau which was considered as an excellent refuge against Peulh extending their empire in the XIVth century. In this hostile and arid area, the Dogon developed progressively numerous systems to manage soil organic matter, soil fertility and water availability (zaï, ridging, stone bunds and terraces, irrigated areas on sandstone rocks, ground barrages in gullies, etc.) in order to produce cereals, onions and greens.

Chapitre 37

Techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols dégradés en régions semi-arides d'Afrique occidentale

Éric ROOSE, Robert ZOUGMORE, Leo STROOSNIJDER, Patrick DUGUÉ, Ibrahim BOUZOU-MOUSSA

Le développement agricole de la zone soudano-sahélienne africaine souffre de deux carences principales : la sécheresse climatique et la pauvreté des sols. Pour faire face à la pression démographique, les paysans ont développé deux séries d'aménagements : des micro-barrages semi-perméables pour ralentir les eaux de surface (alignements et cordons de pierres ou de végétaux) et des techniques de stockage localisé du ruissellement, des nutriments et sédiments qu'elles véhiculent (paillis, zaï, cuvettes, demi-lunes, mares, seuils et diguettes dans les bas-fonds, etc.). Chaque aménagement et techniques culturales sont décrits, analysés et des améliorations proposées (en particulier l'adaptation des fumures organiques et minérales). Aucune ne suffit à résoudre tous les problèmes, mais leur combinaison permet d'améliorer le milieu et la vie des paysans, tout en rétablissant une plus grande biodiversité dans des systèmes agro-sylvo-pastoraux.

The rural development of the semi-arid areas of Africa is limited by two main deficiencies: the rain amount and the soil fertility. To face the demographic pressure, the farmers developed two series of management: semi-permeable micro-dams like vegetation lines and stone bunds, living hedges, etc. and micro watershed to store runoff and sediments rich in nutrients and organic matter (mulch, zaï, basins, half-moon, pound, etc.). Each technique is described, analysed and improved (mainly by manure and mineral fertilizers). Alone, each of them is not sufficient to solve the soil degradation and societal poverty problems, but their combinations allow to improve the water and nutrients availability and to restore the biodiversity within an agro-sylvo-pastoral system.

Chapitre 38

Habilitation agricole de tufs volcaniques indurés au Mexique Le cas des tepetates de l'altiplano central

Christian PRAT, Jorge D. ETCHEVERS, Aurelio BÁEZ, Juan F. GALLARDO, Juliana PADILLA

Le long de l'axe transvolcanique mexicain qui traverse le pays d'est en ouest, se trouvent des sols d'origine volcanique possédant un ou plusieurs horizons indurés, appelés localement *tepetates*. Sous l'effet de l'érosion hydrique, ils peuvent affleurer à la surface. Du fait de leur compacité, de leur stérilité biologique et chimique, tout usage agricole est alors impossible. Couvrant près de 31 000 km², ces « sols » constituent un grave problème environnemental, agronomique et social. C'est pourquoi, au cours des dernières décennies, ont été menés de nombreux travaux pluridisciplinaires de recherche, associant notamment des équipes mexicaines à des équipes européennes. Les résultats ont montré que les *tepetates* étaient des tufs volcaniques datant de 10 000 à 40 000 ans, argilo-limoneux, compacts, pratiquement imperméables, dépourvus des principaux éléments nutritifs, et affleurant généralement au niveau des ruptures de pente des piedmonts. De par leur nature géologique, les *tepetates* peuvent être défonçés et mis en culture, sans risque de voir se reformer cette induration. Il est possible d'obtenir un nouveau sol très productif dès la première année et un véritable sol vivant, en l'espace de 3 à 5 ans. Ainsi, le défonçage au bulldozer à 30-40 cm de profondeur doit être croisé, suivi d'un passage croisé de disques passés au tracteur à faible vitesse. Un apport d'engrais minéraux est indispensable lors des premiers semis, de préférence associés à celui de fumier (12 t.MS/ha). Ensuite, il faut gérer les résidus de culture, effectuer des rotations avec des légumineuses. Quelques cultures, comme le maïs et le haricot, ne sont toutefois productives que 2-3 ans après la formation du nouveau sol. Ces apports de matières organiques sont essentiels pour le sol, les cultures et l'environnement. En effet, en capturant près de 90 t de C/ha sur les 20 premiers centimètres du sol, on lutte contre le réchauffement climatique. Au vu des quantités de C séquestré, l'incorporation des *tepetates* à des pratiques culturales adéquates pourrait être une source de financement international.

Along the Mexican transvolcanic belt that crosses the country from east to west, there are soils of volcanic origin with one or more hardened horizons, locally called tepetates. Under the effect of water erosion, tepetates appear on the surface. Due to their compactness, biological and chemical sterility, any agricultural use is practically impossible under its natural conditions. Covering nearly 31,000 km², these "soils" are a serious environmental, agricultural and social problem. That is why, in recent decades, many multidisciplinary researches have been conducted by Mexican and European teams. Results showed that tepetates are volcanic tuff that emerged 10,000 to 40,000 years ago – silty clay, compact, waterproof, virtually devoid of carbon, nitrogen and phosphorus, and generally appearing at slope foothills ruptures. Due to their geological origin, tepetates can be broken and cultivated without risk of seeing hardening again. It is possible to obtain a new highly productive substrate ("soil") since the first year and almost a regular "soil", in 3 to 5 years. To achieve this status, tepetates must be ripped by a bulldozer at 30-40 cm depth, followed by a cross passage with discs done by a tractor at low

speed. An input of mineral fertilizers is essential during the first sowing year, preferably associated with manure (12 t. DM/ha). Then crop residues must be managed and rotations with legumes performed. Some crops, such as corn and beans, however, are productive only 2-3 years after the formation of the new "soil". These inputs of organic matter are essential for the new "soil" being formed, crops, and environment. Indeed, capturing nearly 90 t C/ha in the first 20 cm depth means fighting against global warming. Due to the quantities of C captured, the creation of a soil from tepetates managed according to good agricultural practices can be a source of international funding.

Chapitre 39

Restauration des sols volcaniques dégradés de l'altiplano mexicain par plantation d'agaves, d'herbes et d'arbres

Christian PRAT, Alejandro MARTÍNEZ PALACIOS, Eduardo RÍOS PATRÓN

Dans l'État du Michoacán au Mexique, 55 % des terres sont dégradées, dont 27 % à cause de l'érosion hydrique. Le bassin versant de Cointzio situé en amont de Morelia, la capitale régionale, au cœur de l'altiplano mexicain, est représentatif de cette situation. Au cours de la dernière décennie, des programmes de recherches pluridisciplinaires ont été menés dans cette région. Sur la base des résultats obtenus, un programme participatif (Desire) a été mené, associant chercheurs, communautés paysannes, institutions et politiques afin d'aboutir à des propositions visant à limiter l'érosion hydrique et à restaurer des terres déjà dégradées. La proposition retenue est une association entre un agave endémique (*A. inaequidens*), des arbres locaux à usages multiples et des annuelles médicinales. Ces plantes grandissent pendant un an sous serres, gérées par les communautés. Ensuite, les agaves sont plantés d'une part, de façon dense en courbes de niveau afin de créer un système antiérosif qui s'auto-entretiendra et d'autre part, de façon plus espacée en association avec des arbres et des plantes annuelles. Ces agaves seront coupés au bout de 7 à 14 ans, remplacés par de nouvelles plantes. Après transformations, ils fourniront du mezcal (alcool) dont le prix est 10 fois plus élevé que celui du maïs cultivé traditionnellement ! Grâce à ces revenus confortables, les communautés paysannes n'auront plus besoin de fuir leurs terres et auront les moyens de gérer leurs ressources de façon durable, de sauvegarder la biodiversité, protéger et restaurer les sols.

*On the Michoacán state in Mexico, 55% of the surface is degraded, 27% due to water erosion. The Cointzio watershed, located upstream of Morelia the regional capital, in the middle of the Mexican altiplano, is representative of this situation. During the last decade, multidisciplinary research programs have been conducted in this area. Based on these results, a participatory program (Desire Desertification mitigation and remediation-land) was conducted, involving researchers, farmer communities, institutions and politics to lead to proposals to reduce erosion and restore soils already degraded. The selected proposal is the agave-forestry based on the association between an endemic agave (*A. inaequidens*), multipurpose local trees and medicinal annuals. These plants grow for a year in greenhouses, managed*

by communities. Then, agaves are planted, some in dense contour lines to create a self-maintained anti-erosion system and the others, with more space, in association with trees and annuals. These agaves are harvested after 7 to 14 years, replaced by new ones. After processing, they provide mezcal (alcohol) whose price is 10 times higher than traditionally grown corn! With these comfortable incomes, rural communities will no longer need to leave their land and have means to manage their resources in a sustainable way, preserve biodiversity, protect and restore their soil.

Chapitre 40

Restauration des basses terrasses dévastées par les torrents du Haut Atlas

Éric ROOSE, Mohamed SABIR

Les basses terrasses des oueds du Haut Atlas sont dévastées plusieurs fois par siècle par des crues brutales. Pourtant, les paysans restaurent les épis et les murs protégeant ces terres alluviales bien irriguées et enrichies par les apports de sédiments. Leurs petits champs sont progressivement colonisés par des herbes fourragères, puis par des pâturages, puis cultivés en céréales et légumineuses et finalement par des arbres fruitiers ou forestiers.

The lowest terraces of the wadies in the « Haut Atlas » in Morocco are destroyed many times a century by hard floods. Nevertheless, the farmers rebuild stone bunds and walls in order to protect these alluvial soils well irrigated and enriched by sediments. Their little fields are progressively colonised by forage grass, enriched by animal residues, then cultivated in cereals and leguminous and finally by fruit or forage trees.

Chapitre 41

Évolution des propriétés des sols de lits de ravines marneuses au cours de leur restauration écologique (Draix, France)

Amandine ERKTAN, Lauric CÉCILLON, Freddy REY

L'importance du transfert sédimentaire fin de l'amont vers l'aval du bassin de la Durance est aujourd'hui essentiellement due à la présence de ravines érodées. Le colmatage des retenues hydro-électriques et d'autres conséquences négatives de ce transfert stimulent et justifient la restauration de ces terrains ravinés. Une stratégie d'ingénierie écologique, développée par l'Irstea, consiste à mettre en place des barrières végétales dans le lit des ravines pour favoriser la sédimentation, puis à terme, le développement d'un système sol-plante stable et fertile. Une expérience grandeur nature, menée depuis l'an 2000 dans les Alpes du Sud, a permis de montrer que des barrières de saules implantées en amont de seuils en bois retiennent efficacement les sédiments. Par ailleurs, les atterrissements sédimentaires ainsi formés en

amont des barrières sont des zones privilégiées de colonisation végétale. Afin de prédire l'évolution possible sur le long terme du système sol-plante dans ces lits de ravines, un gradient de végétation se développant spontanément dans des lits de ravines a été étudié. Ceci a permis de montrer que, dans le cas où l'activité érosive des ravines ne perturbe pas significativement la dynamique végétale spontanée *via* des crues trop intenses ou trop régulières, celle-ci est caractérisée par une diversification des strates végétales et favorise la stabilité des agrégats, ainsi que la fertilité du sol. Cette stratégie d'ingénierie écologique semble donc pouvoir faire basculer l'écosystème d'un cycle de dégradation vers un cycle de restauration.

In the Durance catchment, gullies activity is responsible for the majority of fine sediment transfer, causing downstream negative consequences. Silting of hydroelectric dams is one of these consequences which lead to the development of various strategies for gullies restoration. An ecological engineering approach, developed by Irstea, consists in using vegetative barriers in gully beds to first promote sediment retention, and then to establish a real soil-plant system, with suitable soil stability and fertility in gully beds to sustain plant biomass production. A real-size experiment, launched ten years ago, showed that Salix cuttings barriers are efficient to retain sediment. In addition, phytogenic mounds, formed upslope plant barriers, are suitable areas for plant colonization. So as to assess the evolution of these gully beds in the next century, a vegetative gradient, meant to reproduce the vegetative succession which may occur in the future, has been studied. It unveiled that in the case of such a dynamics, vegetative cover becomes pluri-stratified and influences soil properties, with a significant increase in aggregate stability and soil fertility along the gradient. This ecological engineering approach thus seems to enable the shift of this ecosystem from a degradation cycle toward a restoration cycle.

Chapitre 42

Aménagements hydro-agricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols Cas du bassin de Gros Morne en Haïti

Michel BROCHET, Saintil CLOSSY, Charles LILIN, Éric ROOSE

Haïti étant soumise à une forte orogénèse a connu depuis longtemps des problèmes d'érosion qui ont été exacerbés par les pentes, les cyclones, la pauvreté des paysans, la pression démographique, le surpâturage et le défrichement. Aussi de très nombreux projets de développement rural ou de protection environnementale se sont succédé pour tenter de stabiliser les versants, de réduire les inondations et de lutter contre la pauvreté.

Dans ce chapitre, nous décrivons un projet original de développement agricole durable de Gros Morne (Haïti) : la priorité est donnée simultanément à la gestion de l'eau, à l'amélioration de la production agricole et à la stabilisation du milieu (GCES). Dans une première phase, ce projet a privilégié la construction de solides seuils en maçonnerie dans les ravines moyennes, en vue de diminuer la contrainte constituée par la pénurie en eau et de développer une agriculture intensive

et rémunératrice dans les vallons frais où s'accumulent le ruissellement et les sédiments riches en matières organiques. Le surgreffage des manguiers, l'irrigation, les cultures associées, le maraîchage et la plantation d'arbres fruitiers sont des volets complémentaires. Une deuxième phase du projet donne une place plus importante à l'utilisation de techniques biologiques (haies vives fourragères, bocage d'arbres fruitiers, canne à sucre, pâturages enrichis en légumineuses, taillis de bois de chauffe sur les plus mauvaises terres) pour traiter les versants. L'originalité de ce projet réside autant dans les objectifs et les principes affichés que dans les modalités de sa mise en œuvre, dans une adaptation permanente des aménagements sur le terrain et dans des actions de formation continue des Haïtiens développant les compétences pratiques nécessaires.

Haiti having an intense orogenesis, has to battle against erosion exacerbated by cyclonic rainstorms, steep slopes, demographic pressure, poverty, overgrazing and deforestation. Thus numerous projects are concerned by erosion & environmental protection. The objectives of this project related to sustainable agricultural development of Gros Morne (Haiti) are to improve the agricultural production and, at the same time, to reduce hydric erosion (= land husbandry). In its first stage, emphasis has been given to the construction of small masonry dams in the gullies, in order to improve water supply for agricultural production during the dry season. Other aspects of the project are the grafting of existing mango trees, intercropping and the plantation of fruit trees. In the stage starting now, more emphasis is given to the construction of biological structures on the slopes and in the gullies: living hedges, sugar cane, agroforestry, intercropping & irrigation.

According to authors, the way the project has been implemented is as important as the adopted objectives and principles. The handcrafted technical decisions have always been finely fitted to the characteristics of the landscapes and to farmers' situation. Training of practitioners and the implementation of a national resource center will also be necessary.

Chapitre 43

Amélioration de la productivité des sols cultivés des collines du bassin versant de Maniandro (Madagascar)

Edmond ANDRIAMBELOMANGA, Simone RATSIVALAKA, Nicolas ANDRIAMAMPINANINA,
Jean-Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY, Mparany ANDRIAMIHAMINA

Ce travail présente les résultats d'une étude de l'amélioration de la fertilité des terres des flancs cultivés des collines dans le bassin versant de Maniandro, situé à 25 km au nord d'Antananarivo, sur les Hautes Terres centrales de Madagascar. Les observations, les mesures d'érosion sur parcelles et les essais de fertilisation organo-minérale permettent de souligner l'importance des problèmes d'érosion hydrique et de la pauvreté physico-chimique des sols. Cette situation est aggravée par des contraintes socio-économiques. La stratégie traditionnelle de gestion extractive de la fertilité des sols ne permet que la survie des paysans. Elle renforce

la dégradation du milieu écologique et la précarité de la vie de la population. La technique culturale sous couverture végétale morte ou vivante et l'utilisation des engrais à base de fumier de parc, de dolomie, de guano et de troncs de bananiers hachés sont des solutions proposées. Mais l'initiative des chercheurs a ses limites économiques et spatiales : elle nécessite l'intervention de l'État et des autres acteurs de développement rural.

This paper reports the studies about improvement of soil fertility of tanety in the watershed of Maniandro, located at 25 km North of Antananarivo in the Central Region of Madagascar Highland. The observations on runoff and measurements of soil erosion underline the importance of soil degradation problems, the physicochemical soil poverty and the socio-economic constraints of poor farmers. The traditional strategy of management of soil fertility only allows farmers to survive. It reinforces population's poverty and ecological degradation. The recommended solutions are the farming technique under vegetation cover and the organic manures used: manure collected on parks, dolomite, and guano and trunks of banana trees. But the researchers initiative has economic and space limits and requires the intervention of State and other rural stakeholders.

Chapitre 44

Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda

François NDAYIZIGIYE

Traditionnellement, pour maintenir ou restaurer la productivité de leurs champs, les agriculteurs rwandais ne disposaient que de la biomasse produite sur leurs exploitations (fumier, résidus de culture et déchets ménagers), sur les jachères, les côtés des routes et les forêts. Aujourd'hui, face à une forte pression démographique, l'agriculteur se heurte à trois contraintes majeures : l'exiguïté des terres arables, la minéralisation rapide des matières organiques et l'érosion persistante sur les parcelles ayant comme conséquence la destruction de la fertilité du sol et la diminution des rendements des cultures. Pour répondre à la demande croissante des besoins alimentaires, il devient alors indispensable de restaurer la fertilité des sols et intensifier la production des cultures par tous les moyens. Ainsi, compte tenu du contexte physique des exploitations (morcellement et dispersion des parcelles sur fortes pentes) et socio-économique des agriculteurs (main-d'œuvre insuffisante et moyens financiers faibles), une étude comparative des différentes techniques antiérosives combinées avec des méthodes culturales a permis de montrer que des haies vives de *Leucaena* et *Calliandra* bien gérées réduisent efficacement le ruissellement et l'érosion, et aident à améliorer la fertilité des sols par l'utilisation, sous diverses formes, de la biomasse produite. Mais malgré une lutte antiérosive efficace et une bonne gestion de la biomasse, l'utilisation raisonnée de fumier et d'engrais chimiques s'avère indispensable pour réussir l'intensification des cultures et nourrir une population en forte croissance.

Traditionally, to maintain or restore the productivity of their fields, the Rwandan farmers had only the biomass produced on their farms (manure, crop residues and household waste), on fallows, sides of roads and forests. Today, with a strong demographic pressure, the farmer faces three major constraints: the smallness of arable land, the quick mineralization of soil organic matters and the persistent erosion on the plots, having as a consequence the reduction of soil fertility and crop yields. And to meet the increasing demand for food needs, it becomes necessary to restore the fertility of the soil and increase the production of crops by all means. Thus, given the physical context of farms (fragmentation and dispersion of the plots on steep slopes) and socio-economic of farmers (insufficient labour force and low financial resources), a comparative study of different conservation tillage techniques combined with farming methods allowed to show that hedges of *Leucaena* and *Calliandra* well managed effectively reduce runoff and erosion, and help to improve the soil fertility through the use of biomass produced in various ways. But, despite an effective erosion control and good management of biomass, it is clear that the use of manure and reasonable chemical fertilizers is essential to lead to the intensification of crop.

Chapitre 45

Efficacité des haies mixtes, du fumier et du paillage pour la conservation de l'eau et la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique argileux acide du Burundi

Hervé DUCHAUFOUR, Melchior BIZIMANA, Éric ROOSE, Canisius MIKOKORO

Les haies vives mixtes combinant des légumineuses arbustives (*Calliandra calothyrsus*) et des graminées (*Setaria sphacelata*) sont efficaces dès la seconde année pour réduire le ruissellement et l'érosion sur des pentes fortes. Cependant, les touffes de graminées se dispersent et disparaissent rapidement, si elles sont exploitées comme fourrage : elles épuisent rapidement les faibles réserves en nutriments de ces sols ferrallitiques. Par contre, les légumineuses arbustives puisent en profondeur ou dans l'air les nutriments qui leur sont nécessaires pour produire une forte biomasse aérienne (excellent fourrage) et un enracinement profond qui stabilisent les talus. Les émondes utilisées comme paillage protègent le sol contre les pluies et le ruissellement pendant un mois, après quoi les feuilles sont minéralisées. Des apports réguliers de fumure organique et minérale restent nécessaires pour intensifier la production du versant.

Living hedges combining leguminous shrubs (Calliandra calothyrsus) with herbs (Setaria sphacelata) are efficient from the second year to runoff and erosion reduction, even on very steep slopes. But herbs are disappearing fast if they are exploited as forage: they take off all the nutrients stored in poor ferralitic soils. But leguminous shrubs take their nutrients in the air or deeply in the soil: they produce much biomass (excellent forage) and deep roots who maintain the embankments on the slopes. The cuttings used as mulch protect the soil against the energy of rains and runoff; after one month the leaves are mineralized but the branches can be used for the kitchen. To intensify the production, it is necessary to bring regularly organic and mineral fertilizers on these very poor ferralitic soils.

Chapitre 46

Potentialités de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda

Dieter KÖNIG

Depuis 1985, différents systèmes agroforestiers ont été testés en vue de l'amélioration de la productivité des sols sur le plateau central rwandais. Les études ont été menées sur un sol ferrallitique fortement dégradé, très acide ($\text{pH} < 4$) et pauvre en éléments nutritifs. La station est située sur un versant à une altitude de 1 700 m qui reçoit en moyenne 1 280 mm de pluies en deux saisons ; la température annuelle moyenne atteint 20 °C. Huit parcelles d'érosion ont été cultivées selon les méthodes de l'agriculture écologique agroforestière : intégration des arbres et des haies vives dans les parcelles, cultures associées, substitution de la jachère par l'emploi de légumineuses comme engrais verts, intégration de l'élevage dans le système de culture, recyclage de la biomasse et intégration des mesures de conservation de l'eau et des sols. Malgré une érosivité des pluies relativement faible (facteur R d'après Wischmeier et Smith autour de 350), on a constaté sur une pente de 28 % une érosion énorme sur les parcelles non protégées : $E = 440 \text{ t/ha/an}$ sur sol nu, avec un ruissellement de 15 % et 226 t/ha/an sous manioc avec un ruissellement de 9 %. Sous ces conditions, l'intégration des arbres et surtout des haies isohypses de *Calliandra calothyrsus* permet une réduction du ruissellement, de l'érosion et des pertes en matière organique et en éléments nutritifs, à un niveau tolérable (1-3 % des valeurs initiales). L'agroforesterie permet en outre une haute production de biomasse même sur des sites dégradés et une remontée importante de nutriments dans la litière. Des relevés dendrométriques sur 32 espèces d'arbres plantées en novembre 1985 montrent que les meilleurs résultats ont été obtenus avec les arbres autochtones *Maesopsis eminii* et *Polyscias fulva*. Si les arbres exotiques (ex. *Grevillea robusta*, *Cedrela serrata*) montrent une bonne croissance initiale, les espèces autochtones sont, à la longue, plus productives et concurrencent moins les cultures vivrières. L'agriculture agroforestière contribue non seulement à la conservation des sols, mais aussi à la séquestration du carbone (stockage de 10 à 20 tonnes de carbone par hectare dans la biomasse superficielle) et à son approvisionnement en matières organiques et en nutriments ($\text{N}_{105} + \text{P}_4 + \text{K}_{21}$). Néanmoins, les méthodes biologiques seules ne sont pas capables d'améliorer suffisamment la fertilité du sol sur des sites déjà fortement dégradés. Pour rétablir la fertilité de ces sols, un apport complémentaire en éléments nutritifs (surtout P et cations) est inévitable pour remplacer ceux qui ont été emportés par l'érosion, par lessivage et par exportation des produits agricoles pendant des décennies. L'article présente les effets positifs d'une application des cendres volcaniques et du travertin sur le rendement des cultures vivrières dans des systèmes agroforestiers.

In densely populated areas in Rwanda, soil erosion and degradation are severe threats to agriculture. In this situation, agroforestry can help to achieve a sustainable agricultural production ("ecofarming"). Based on measurements of runoff and soil loss, of biomass production and nutrient fluxes, the author summarises more than twenty years of research experience from Projet agricole et social interuniversitaire (Pasi) at Butare, Rwanda (1,700 m a.s.l., mean annual rainfall: 1,280 mm, mean temperature: 20°C) on a severely degraded ferrallitic soil (pH 4). With a relatively low rainfall

erosivity (R after Wischmeier and Smith around 350), 440 t/ha/year were eroded from a standard plot without any soil cover and 226 t/ha/year were eroded from a cassava plot (on a 28% slope) and with runoff rates contour strips of *Calliandra calothyrsus* can reduce runoff, soil erosion and loss of organic matter and nutrients to tolerable levels (1-3% of the levels recorded under cassava). Agroforestry allows a high biomass production even on degraded sites and a significant nutrient recycling. Dendrometric measurements of 32 tree species planted in November 1985 revealed that the best results were obtained with native trees like *Maesopsis eminii* or *Polyscias fulva*. Exotic tree species (e.g. *Grevillea robusta*, *Cedrela serrata*) showed strong initial growth but, in the long run, native trees were more productive and less competitive with food crops. Agroforestry does not only contribute to soil conservation, but may also play an important role in climate change mitigation by storing important quantities of carbon (10-20 t C/ha, which is equivalent to 35 to 70 t CO₂/ha) in the standing biomass. Agroforestry is also able to provide an important part of the nutrient supply of the production system. However, biological methods alone are not able to improve soil fertility on sites already severely degraded. To restore the fertility of these soils, a supplementation of mineral nutrients (especially P and cations) is unavoidable to compensate for losses through erosion, leaching and export of agricultural products which took place during the last decades. Therefore, the paper also presents the positive effects of an application of volcanic ashes and travertine on crop yields in agroforestry systems.

Chapitre 47

Lutte antiérosive et intensification de l'agriculture en milieu steppique (Boughezoul, Algérie)

Mourad ARABI, Lakhdar BOUROUGAA, Oum El kir KEDAID

Cette étude présente les effets bénéfiques d'un système de production amélioré dans trois parcelles expérimentales de 460 m² sur siérozem de piémont de 10 % de pente, fragile et pauvre en matière organique, installées sur les hauteurs du bassin versant du Chélif en milieu semi-aride algérois. Les résultats obtenus de 2000 à 2004 puis actualisés en 2011 mettent en évidence l'efficacité remarquable des pratiques culturales biologiques et des cordons de pierres sur la réduction du ruissellement et de l'érosion. Le versant évolue en terrassettes derrière les cordons empierrés. Le ruissellement et les apports en matières organiques modifient positivement l'état de surface du sol, assurent la rétention hydrique et permettent un bon enracinement, ainsi que l'augmentation des rendements et des revenus.

This study presents the beneficial effects of production system improved in three experimental plots of 460m² on piedmont sierozem, poor in organic matter, very fragile, unstable of 10% slope installed on the high plains in the Chelif River basin, in semi-arid Algiers. The results obtained from 2000 to 2004 and updated in 2011 show a remarkable efficiency of a few soil and water conservation techniques easily implemented by peasants: (i) cultural biological practices and (ii) stone bunds reducing runoff and erosion. The slope changes in small terraces

behind the stone bunds. Runoff and organic matter input positively alter the surface of the soil, providing water retention and allowing good rooting and consequently better yield and net income.

Chapitre 48

Gestion du ruissellement et restauration de la productivité des terres de montagne au Nord-Ouest algérien (Beni Snouss)

Mohamed MAZOUR, Mohamed ZOBIRI, Malika BENMANSOUR

Les auteurs ont évalué la capacité de certaines techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans les montagnes du Nord-Ouest algérien où les risques de dégradation sont élevés. Les analyses et les observations effectuées sur le terrain montrent que les aménagements traditionnels utilisés aujourd'hui qui donnent le plus de satisfaction sont surtout les terrasses et terrassettes avec des murets en pierres agencées qui permettent une accumulation progressive de sédiments et une bonne protection des dispositifs d'irrigation. Les agriculteurs ont développé plusieurs techniques pour gérer l'eau (bassin d'accumulation, canaux traditionnels, ouvrages de dérivation), le sol et la biomasse y compris, les cultures favorisant une meilleure diversité écologique. La dynamique de l'érosion a été ralentie et la production agricole nettement améliorée. Cette étude a permis de mieux comprendre l'environnement agroécologique de la région et de développer un bon dialogue avec les agriculteurs en vue de la préservation de leur environnement.

Authors have estimated the efficiency of some traditional techniques of soil restoration developed in very degraded areas of north-western Algeria. Field observations showed that traditional terraces with stony embankments allow a progressive accumulation of ground and a good protection of irrigation systems. Farmers have developed numerous irrigation systems (earth channels, basins, divisor systems) and numerous cropping systems maintaining a good biodiversity. This inquiry showed that erosion has been reduced, the production improved and the rural environment better understood during the discussions with farmers.



Depuis le milieu du XX^e siècle, du fait de la forte croissance démographique, les sols et la végétation des zones tropicales et méditerranéennes subissent d'importantes dégradations. Actuellement, plus de 20 % des terres cultivées sont dégradées chimiquement, physiquement et biologiquement. En effet, malgré la mise en œuvre de grands projets tels la conservation de l'eau et des sols (CES), la production agricole ne peut être maintenue à un niveau suffisant pour nourrir une population qui double tous les vingt ans dans les pays du Sud. Cet ouvrage a ainsi pour objectif de présenter les principaux résultats de la recherche dans le domaine de la restauration de la productivité des sols.

Les causes de la dégradation des sols des régions chaudes sont présentées dans un premier temps. On évalue ensuite les divers modes de gestion de la biomasse et des nutriments, puis les techniques culturales et les systèmes de gestion de l'eau.

Les nombreuses données expérimentales présentées montrent que la restauration durable des systèmes agroécologiques est possible, moyennant le respect de six règles : une bonne maîtrise de l'eau, l'apport de matières organiques, l'utilisation de compléments minéraux, la revitalisation du sol (fumier / compost), la correction du pH du sol et le choix judicieux de cultures à fort développement de biomasse.

L'ouvrage, qui présente de nombreuses études de terrain originales, s'adresse tant aux chercheurs qu'aux enseignants, aux étudiants, aux décideurs et aux différents acteurs en charge du développement rural.

Éric Roose, à la fois agronome-forestier et pédologue, est directeur de recherche émérite à l'IRD. Il a d'abord consacré ses recherches à la pédogenèse des sols tropicaux, il s'est ensuite spécialisé dans la lutte antiérosive et a développé une nouvelle approche de la gestion durable de l'eau et des sols. Ses travaux récents portent sur la restauration de la productivité des sols.


Éditions

44, bd. de Dunkerque
13572 Marseille cedex 02
editions@ird.fr

www.editions.ird.fr



45 €

ISBN 978-2-7099-2277-7

