ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/301358861

La gestion de la matière organique et ses effets sur la conservation de la fertilité du sol dans le nord-ouest de l'Algérie

Article · January 2008

CITATIONS
7

READS
2,692

1 author:

Mostafia Boughalem
University of Ain Temouchent, Algeria

43 PUBLICATIONS **74** CITATIONS

SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by Mostafia Boughalem on 25 April 2016.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

actualité scientifique

EFFICACITÉ DE LA GESTION DE L'EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS EN MILIEUX SEMI-ARIDES

Sous la direction de :

Eric ROOSE
Jean ALBERGEL
Georges DE NONI
Abdellah LAOUINA
Mohamed SABIR

IRD Institut de recherche pour le développement

ENFI

AGENCE UNIVERSITAIRE DE LA FRANCOPHONIE

éditions des archives contemporaines

EFFICACITÉ DE LA GESTION DE L'EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS EN MILIEUX SEMI-ARIDES

EFFICACITÉ DE LA GESTION DE L'EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS EN MILIEUX SEMI-ARIDES

Actes de la session VII
organisée par le Réseau E-GCES de l'AUF
au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc),
du 14 au 19 mai 2006

Sous la direction de

Eric ROOSE, Jean ALBERGEL, Georges DE NONI
Abdellah LAOUINA et Mohamed SABIR

AGENCE UNIVERSITAIRE DE LA FRANCOPHONIE

IRD
Institut de recherche pour le développement

ENFI

éditions des archives contemporaines

Copyright © 2008 Éditions des archives contemporaines et en partenariat avec l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF).

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit (électronique, mécanique, photocopie, enregistrement, quelque système de stockage et de récupération d'information) des pages publiées dans le présent ouvrage faite sans autorisation écrite de l'éditeur, est interdite.

Éditions des archives contemporaines
41, rue Barrault
75013 Paris (France)
Tél.-Fax : +33 (0)1 45 81 56 33
Courriel : info@eacgb.com
Catalogue : www.eacgb.com

ISBN : 978-2-914610-76-6

Référence bibliographique :

Roose E., Albergel J., De Noni G., Sabir M., Laouina A., 2008., *Efficacité de la GCES en milieu semi-aride*, AUF, EAC et IRD éditeurs, Paris : 425 pages

Crédit iconographique de la couverture :

Oued Rhéraya*, Haut-Atlas : terrasses permettant de reconstituer des sols dans le lit majeur, d'irriguer des pentes fortes grâce aux seguias et fertiliser le sol en place autours d'un village*.

Avertissement

Les textes publiés dans ce volume n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. Pour faciliter la lecture, la mise en pages a été harmonisée, mais la spécificité de chacun, dans le système des titres, le choix de transcriptions et des abréviations, l'emploi de majuscules, la présentation des références bibliographiques, etc. a été le plus souvent conservée.

Avant-propos

La diffusion de l'information scientifique et technique est un facteur essentiel du développement. Aussi, dès 1988, l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF), mandatée par les Sommets francophones pour produire et diffuser livres, revues et cédéroms scientifiques, a créé une collection d'ouvrages en français. Lieu d'expression de la communauté scientifique de langue française, elle vise à instaurer une collaboration entre enseignants et chercheurs francophones en publiant des ouvrages, coédités avec des éditeurs francophones, et largement diffusés dans les pays du Sud grâce à une politique tarifaire adaptée.

La collection se décline en différentes séries :

- *Manuels* : mis à jour régulièrement, ils suivent l'étudiant tout au long de son cursus en incluant les plus récents acquis de la recherche. Cette série didactique est le cœur de la collection ; elle porte sur des domaines d'études intéressant l'ensemble de la communauté scientifique francophone, tout en répondant aux besoins particuliers des pays du Sud ;

- *Savoirs francophones* : cette série accueille les travaux individuels ou collectifs des chercheurs du Nord et du Sud, impliqués dans les différents réseaux thématiques ;

- *Savoir plus universités* : cette série se compose d'ouvrages de synthèse qui font le point sur des sujets scientifiques d'actualité ;

- *Actualité scientifique* : dans cette série sont publiés les actes de colloques et de journées scientifiques organisés par les réseaux thématiques de recherche de l'Agence ;

- *Prospectives francophones* : s'inscrivent dans cette série des ouvrages de réflexion donnant l'éclairage de la Francophonie sur les grandes questions contemporaines ;

- *Dictionnaires* : ouvrages de référence sur le marché éditorial francophone.

La collection de l'Agence universitaire de la Francophonie, en proposant une approche plurielle et singulière de la science, adaptée aux réalités multiples de la Francophonie, contribue à promouvoir la recherche dans l'espace francophone et le plurilinguisme dans la recherche internationale.

Bernard Cerquiglini
Recteur de l'Agence universitaire de la Francophonie

Le réseau Érosion francophone

POUR QUOI FAIRE ?

Depuis un siècle, la dégradation des sols est un phénomène préoccupant au niveau mondial : dix millions d'hectares de terres cultivables sont perdus chaque année. En 1990, le projet GLASOD a établi une première carte de répartition des processus de dégradation des terres : 16 % des terres exploitables étaient déjà dégradées, 55 % par érosion hydrique et 28 % par érosion éolienne. La destruction des grands massifs forestiers tropicaux entraîne une perte irrémédiable de la biodiversité et une modification du bilan hydrique mondial. Mais c'est au sein des zones semi-arides que la dégradation du couvert végétal entraîne le plus de problèmes tant sur le plan de l'érosion des terres, de l'envasement des barrages, que sur la disponibilité en eau de qualité. D'ici vingt ans, la plupart des pays des zones sahéliennes et méditerranéennes vont manquer d'eau et de terre pour faire face aux besoins élémentaires des populations en pleine croissance.

LE RÉSEAU ÉROSION FRANCOPHONE A VINGT ANS

Devant l'urgence des problèmes de développement durable des systèmes de production en milieux tropicaux, méditerranéens et même tempérés, l'Institut de recherches pour le développement (IRD, ex-ORSTOM), avec l'aide de la Coopération française et de quelques partenaires (CTA, OSS, GTZ) a lancé en 1983 un réseau multidisciplinaire regroupant des chercheurs, des enseignants et des développeurs francophones de 55 pays en vue d'accélérer la circulation des informations dans le domaine de l'érosion, de donner la parole aux jeunes équipes autant qu'aux développeurs, et d'encourager les recherches appliquées à la gestion durable des ressources en eau et en terres cultivables (GCES). Ce réseau a organisé 12 réunions thématiques, 3 colloques internationaux et publié 23 bulletins de 50 pages à 600 pages, trois *Cahiers ORSTOM Pédologie* et un *ORSTOM Actualités*, participé à diverses revues dont *Sécheresse* (numéro spécial *Erosion*, 2004, 15, 1) et *Agricultures*. L'ensemble forme une base documentaire francophone qui est disponible sur le site Internet de l'IRD (www.bondy.ird.fr/ pleins textes/index.htm).

LE NOUVEAU RÉSEAU ÉROSION-GCES DE L'AUF

En 2003, l'AUF (Agence universitaire de la Francophonie) a accepté de reprendre l'héritage de ce réseau très actif, de se charger de son financement, de lui donner une structure plus internationale (la Francophonie) et de recentrer ses activités sur cinq thèmes choisis par des représentants de quatre continents :

- méthodologie : mesurer ou tout au moins estimer à l'aide d'indicateurs les risques de divers processus d'érosion dans l'espace ;
- analyser les aspects socio-économiques des problèmes d'érosion et de gestion durable des ressources en eau et en sol fertile ;
- améliorer les stratégies traditionnelles ou modernes de gestion durable des terres en pente ;
- améliorer la gestion des eaux et de leur qualité ;
- estauration de la productivité des terres et de la biodiversité.

Le nouveau réseau a repris les objectifs du réseau Érosion/IRD tout en en développant de nouveaux :

- aider au désenclavement des équipes de chercheurs, développeurs et enseignants francophones, en leur rendant plus accessible l'information sur l'érosion et la GCES ;
- favoriser les échanges entre tous les chercheurs utilisant le français comme langue de travail, quelle que soit leur zone géographique (coopération Nord-Nord, Nord-Sud, Sud-Sud, Est-Ouest) ;
- diffuser les résultats originaux au travers des moyens d'audience internationale ;
- promouvoir la mobilité et la formation des chercheurs en francophonie, en particulier pour la rédaction de leur production scientifique à travers les revues *Sécheresse* et *Cahiers Agricultures.*

Le réseau E-GCES organise des journées scientifiques tous les ans : les premières eurent lieu à Antananarivo (Madagascar) en octobre 2005, les secondes à Marrakech (Maroc) au cours d'une session du congrès ISCO en mai 2006, et la troisième à Hanoi (Vietnam) en novembre 2007.

Il publie les actes sous forme de CD-ROM ou de manuscrit : fin 2007, les actes d'Antananarivo sont disponibles à l'AUF ; ceux de Marrakech et Hanoi sont en fabrication.

Le réseau E-GCES finance sept actions de recherche chargées de préparer des synthèses sur les problèmes abordés par ce réseau. *Le manuel de GCES au Maroc*, à paraître en 2008, en est un exemple. Il a profité de deux financements bilatéraux franco-marocains PRAD et du soutien de l'IRD et du réseau E-GCES pendant sept années. Devant l'échec des stratégies conventionnelles de lutte antiérosive, les auteurs de ce manuel tentent d'analyser les techniques traditionnelles, de les améliorer et de proposer des grappes de techniques adaptées aux régions agro-écologiques et à l'environnement socio-économique.

D’autres suivront sur les régions soudano-sahéliennes africaines, sur les Andes américaines et sur les pays asiatiques tropicaux humides.

Profitant des journées scientifiques internationales, des ouvrages scientifiques spécialisés sur des sujets d’actualité seront réalisés.

Le nouveau réseau bénéficiera largement de l’expérience du réseau antérieur. Une nouvelle dynamique se développe avec les moyens et l’esprit de l’AUF, avec le soutien de l’IRD et un fort souci d’échange d’experts francophones ouverts sur les problèmes internationaux.

Pour plus d’informations sur l’inscription à ce réseau AUF contacter :

Eric Roose, coordonnateur du Réseau, Centre IRD, B.P. 64501, F 34394 Montpellier CEDEX 5 ; tél. 33 (0) 467 416 265 ; roose@ird.fr

Khalef Boulkroune ou Pascale Sartori, 4 place de la Sorbonne, F 75005 Paris ; khalef.boulkroune@auf.org ou pascale.sartori@auf.org

S’inscrire sur le site internet de l’AUF : www.chercheurs.auf.org

Suivre les activités du Réseau E-GCES : www.egces.auf.org

SOMMAIRE

Efficacité des techniques traditionnelles de GCES pour la restauration de la productivité des sols : introduction et éléments de conclusion
Eric ROOSE **17**

SYNTHÈSES

Évolution des techniques antiérosives dans le monde
Eric ROOSE **25**

Place des petits barrages dans la mobilisation des eaux de surface et dans la lutte contre l'érosion au Maghreb et au Moyen-Orient
Jean ALBERGEL **35**

La GCES : la lutte antiérosive et le profit économique
G. DE NONI, E. ROOSE, G. TRUJILLO et M. ARABI **48**

Spatialisation de la Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc, les facteurs écologiques, sociaux et culturels
Abdellah LAOUINA, Eric ROOSE et Mohammed SABIR **53**

L'évaluation du coût économique de la dégradation des terres
Marc BIED-CHARRETON **59**

GESTION DE L'EAU SUR LES VERSANTS ET PETITS BASSINS

Impacts hydrologiques des banquettes antiérosives sur un versant semi-aride en Tunisie centrale
S. NASRI, M. LAAROUSSI, Y. EL ALI et H. HABAIEB **65**

Efficacité des banquettes sur l'érosion des terres, le remplissage et l'envasement d'un lac collinaire en zone semi-aride tunisienne
N. BACCARI, S. NASRI et M. BOUSSEMA **70**

Fonctionnement hydro-sédimentaire d'un aménagement de banquettes antiérosives en courbes de niveau en zone semi-aride (El Gouzine, Tunisie Centrale)
Y. AL ALI, S. NASRI, P. ZANTE, J. TOUMA et J. ALBERGEL **74**

Impact de l'aménagement des terres de culture par les cuvettes individuelles sur l'humidité et la fertilité du sol (Tunisie du Centre)
Mohamed BERGAOUI, Jalel EL FALEH et Ali HENDAOUI **80**

Traditional agricultural water management in Tunisia : contributions to environmental sustainability
Jennifer HILL et Wendy WOODLAND **86**

Réflexions sur les stratégies traditionnelles de gestion conservatoire de l'eau pratiquées en Ardèche depuis le XIXe siècle
Alain MOREL **92**

Gestion de l'eau et des sols sur toposéquences cuirassées en Afrique occidentale : limites des méthodes traditionnelles et perspectives
Drissa DIALLO et Eric ROOSE **97**

GESTION DE LA BIOMASSE ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS

De l'agroforesterie traditionnelle à l'agriculture écologique moderne. Stratégies pour la conservation de la fertilité des sols des Hautes Terres de l'Afrique de l'Est
Dieter KÖNIG **105**

Efficacité des jachères légumineuses arbustives sur l'amélioration de la fertilité des sols dégradés et de leur résistance à l'érosion — Région de Manankazo-Tampoketsa (N.-O. de Madagascar)
M.-A. RAZAFINDRAKOTO, J.-C. RANDRIAMBOAVONJY et N. ANDRIAMAMPIANINA **111**

Stratégies traditionnelles de gestion conservatoire et de restauration des sols au Vietnam
Ha PHAM QUANG, Simon POMEL, Nguyen VAN THIET, Didier ORANGE, Pascal PODWOJEWSKI et Tran DUC TOAN **116**

Stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols autour de la ville de Mokolo, monts Mandara (Nord-Cameroun)
Michel TCHOTSOUA et Jean-Marie FOTSING **122**

Rentabilité économique de la combinaison des mesures de conservation des eaux et des sols avec la gestion des nutriments en zone semi-aride du Burkina Faso
R. ZOUGMORE, O. MANDO, L. STROOSNIJDER et E. OUEDRAOGO **126**

Indigenous Technical Knowledge for Soil and Water Conservation and Soil Fertility Restoration in Foothill region of the Himalayas in North-West India
Sanjay ARORA et M.S. HADDA **133**

Le coût des nutriments de sol s'accumulant dans les lacs de retenues au Tigré (Éthiopie septentrionale)
N. HAREGEWEYN, J. POESEN, K. PARIDAENS, J. NYSSEN, J. MOEYERSONS, J. DECKERS, G. VERSTRAETEN G., WOLDE MEKURIA, M. HAILE, G. GOVERS **139**

Restauration de la productivité des sols ferrugineux en zones agropastorales du Nord-Cameroun (*résumé*)
Henri-Dominique KLEIN **148**

Les associations culturales traditionnelles améliorées : une alternative écologique à l'intensification agricole face au changement climatique, démographique et à la « mondialisation »
S. VALET **152**

Érosion et stockage du carbone sous l'effet de l'utilisation des terres en zone de savane soudanienne Bassin de Djitiko (Sud-Mali)
Drissa DIALLO, Didier ORANGE et Eric ROOSE **164**

La gestion de la matière organique et ses effets sur la conservation de la fertilité du sol dans le Nord-Ouest de l'Algérie
M. MAZOUR, M. BOUGHALEM, et N. MEDEDJEL **175**

Rainfall, livestock and soil management practices: factors affecting nutrient cycling in the west african semi-arid tropics (wasat)
F. IKPE, J.M. POWELL, P. HIERNAUX, S. FERNANDEZ-RIVERA et S. TARAWALI **182**

GESTION EAU + SOL : TECHNIQUES CULTURALES ET STRUCTURES LAE

Analyse de quelques techniques traditionnelles de conservation de l'eau et du sol dans le nord-ouest algérien
Mohamed MAZOUR, Boutkhil MORSLI et Eric ROOSE **193**

Érosion et effet des techniques culturales sur les versants semi-arides de l'Algérie Cas des monts de Beni Chougrane
B. MORSLI, A. HALITIM, M. MAZOUR **199**

Caractérisation et analyse des aménagements de DRS en zone est de l'Algérie
Abdelkrim HAMOUDI, Boutkhil MORSLI et Eric ROOSE **204**

Influences des aménagements antiérosifs sur deux couples de micro-bassins expérimentaux en milieu semi-aride algérien (Bassin versant du Haut-Chélif)
Mourad ARABI **210**

Influence de la mise en défens ou en culture sur la dynamique des flux érosifs en milieu dégradé de Tunisie centrale
Hattab BEN CHAABANE et Hédi HAMROUNI **217**

Les techniques de GCES dans un système agro-sylvo-pastoral du plateau central du Maroc
M. ADERGHAL, A. WATFFEH, J. AL KARKOURI, M. TAILASSAN et R. NAFAA **223**

Gestion conservatoire des eaux et des sols dans le bassin versant de Beni Boufrah (Rif central, Maroc)
J. AL KARKOURI, A. LAOUINA, A. WATFEH et M. ADERGHAL **233**

Techniques de GCES dans le massif de Boukhouali et son piémont steppique, Maroc oriental
Miloud CHAKER et Abdellah LAOUINA **240**

Analyse de quelques aménagements antiérosifs juste à l'amont du barrage de Hammam Boughrara (Moyenne-Tafna) Tlemcen (Algérie)
Mohamed MAZOUR, Ahmed TOUIL, Baghdad MAACHOU, Malika BENMANSOUR, Mostafia BOUGHALEM **249**

L'érosion en *lavaka* : processus et utilisation par les paysans d'ampasimbe, madagascar
Nicolas ANDRIAMAMPIANINA **256**

Pratiques paysannes et gestion des sols sur les Hautes Terres centrales de Madagascar
Simone RANDRIAMANGA **262**

Efficacité de la gestion conservatoire des eaux et des sols au Tigré, Éthiopie
J. MOEYERSONS, J. NYSSEN, J. POESEN, J. DECKERS, M. HAILE **269**

Influence des systèmes de travail du sol sur les propriétés des sols en zones semi-arides du Maroc
Rachid MRABET, Abderrahim ESSAHAT et Rachid MOUSSADEK **274**

Stratégies de lutte antiérosive introduites au Nord-Cameroun
Boniface GANOTA et Michel TCHOTSOUA **290**

Gestion de l'eau et de la fertilité des sols dans les plaines de l'Extrême-Nord-Cameroun. Stratégies traditionnelles et modernes
Christophe BRING et Michel TCHOTSOUA **298**

PROCESSUS D'ÉROSION, INDICATEUR DE RISQUES ET EXTENSION

Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluies sur les principaux sols du bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc)
A. CHEGGOUR, V. SIMONNEAUX, M. SABIR et E. ROOSE **307**

Spatialisation de l'érosion dans le bassin versant de la Rheraya (Haut-Atlas, Maroc). Comparaison de simulations de pluies et d'exportation à l'exutoire du bassin
V. SIMONNEAUX, A. CHEGGOUR, M. SABIR et E. ROOSE **312**

Influence de l'utilisation d'un sol brun vertique sur les stocks de carbone du sol. les risques de ruissellement et d'érosion et le devenir du carbone érodé (Bassin de l'oued Rhéraya, Haut-Atlas, Maroc)
E. ROOSE, D. BLAVET, M. SABIR, T. OUAGGA, A. CHEGGOUR, V. SIMONNEAUX, R. OLIVER, H. FERRER, J. LOURI et J.-L. CHOTTE **317**

Effets d'échelle et variabilité de l'érosion entre parcelle et bassin versant en région de vignoble méditerranéen (France)
Y. LE BISSONNAIS, D. RACLOT, P. ANDRIEUX, R. MOUSSA, X. LOUCHART et M. VOLTZ **325**

Génèse de l'érosion en milieu viticole méditerranéen à sols bruns calcaires : modalités, déterminants et indicateurs potentiels
D. BLAVET, G. DE NONI, Y. LE BISSONNAIS, M. LEONARD, J.-Y. LAURENT, J. ASSELINE et E. ROOSE **331**

Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un espace montagnard marocain : cas du sous-bassin versant de l'Oued Tleta (Pré-rif oriental)
A. TRIBAK, A. EL GAROUANI et M. ABAHROUR **339**

Comportement Hydrodynamique des Horizons Pédologiques Superficiels : Étude Expérimentale sous Pluies Simulées et sous Plan d'Eau
Djamel BOUDJEMLINE et Lakhdar BENAMARA **343**

Caractérisation des conductivités de surface dans un aménagement en banquettes antiérosives par la méthode du simple anneau
Y. AL ALI, J. TOUMA, M. B. LOUATI et J. ALBERGEL **348**

Comportement hydrique d'un nitisol cultivé sous simulations de pluies extrêmes Cas des systèmes intensifs de production bananière en Martinique
Bounmanh KHAMSOUK, Eric ROOSE, Éric BLANCHART, Marc DOREL, Luc RANGON, Joëlle LOURI **354**

États de surface et infiltrabilité des sols en milieu méditerranéen cultivé
Patrick ANDRIEUX **362**

Prédétermination des apports liquides et solides dans les lacs collinaires de la Dorsale tunisienne
J.-M. LAMACHERE, M. BOUFAROUA, L. GUERMAZI et H. HABAIEB **367**

Prédétermination de l'envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne
M. BOUFAROUA, J.-M. LAMACHERE, F. KSIBI et A. DEBABRIA **373**

Ravinement et bilan hydro-sédimentaire des lacs de retenues collinaires au Maghreb
Jean ALBERGEL, Patrick ZANTE, Jean COLLINET, Rafla ATTIA et Abdelaziz MERZOUK **378**

Mesure et Modélisation de l'érosion hydrique des sols agricoles au Maroc et au Québec
Marc DUCHEMIN, Moncef BENMANSOUR, Asmae NOUIRA et Jacques GALLICHAND **385**

Utilisation du ^{137}Cs pour estimer la production de sédiments d'origine agricole à l'échelle du bassin versant Québec (Canada)
C. BERNARD, L. MABIT et M.-R. LAVERDIÈRE **390**

Les mouvements de masse et leur signification géomorphologique au Tigré, Éthiopie
J. MOEYERSONS, J. NYSSEN, J. POESEN, J. DECKERS, M. HAILE, J. VAN DE WAUW et J. HOFMEISTER **398**

EFFICACITÉ DES TECHNIQUES TRADITIONNELLES DE GCES POUR LA RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS : INTRODUCTION ET ÉLÉMENTS DE CONCLUSION

Eric ROOSE
UR 179, SeqBio, Centre IRD, B.P. 64501,
F 34394 Montpellier CEDEX 5, France
Eric.Roose@ird.fr

1. LA GCES : DÉFINITION ET OBJECTIFS DE CETTE SESSION

Le défi du XXIe siècle est de doubler la production agricole en vingt ans pour faire face à la croissance démographique, tout en améliorant l'environnement. Suite à l'échec global des stratégies modernes de lutte antiérosive dans le monde (Hudson 1991), un groupe de chercheurs a tenté de préciser les causes de cet échec et les conditions nécessaires pour réussir un projet d'aménagement durable du territoire (Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer, 1988). Ils ont défini une nouvelle approche : « *Land husbandry* » ou, en français, la « gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité du sol», basée sur quelques principes de base :

- participation des paysans regroupés dans des unités fonctionnelles (quartier, versant, terroir) dès la conception des projets ;
- répondre aux problèmes immédiats des paysans, en particulier, valoriser la terre et le travail, tout en réduisant les nuisances liées au ruissellement et à l'érosion ;
- le premier objectif est d'intensifier la production en optimisant à la fois la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité du sol ;
- le second objectif est de réduire l'érosion en améliorant la couverture du sol, les activités biologiques et les propriétés physiques liées à l'infiltration et à l'agrégation.

L'objet de cette session, après dix-huit ans d'expériences de cette approche participative dans une douzaine de pays de climats très divers, est de préciser l'efficacité des techniques traditionnelles ou conventionnelles sur la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Au cours de cette session, 26 communications furent présentées en français, mais avec projection de diaporamas en anglais. Ceci a permis aux 80 participants francophones, arabophones, anglophones et hispanophones de suivre les exposés et les nombreuses questions, sans traducteur professionnel.

2. LE CONTENU DE CETTE SESSION

Cette session comprend quatre thèmes et des conclusions.

2.1. La gestion de l'eau de surface en milieu semi-aride

Le problème fondamental est de décider où conserver les eaux de surface. Dans la toposéquence (sur les sols cuirassés du Mali), sur la parcelle où tombe la pluie (cuvettes en Tunisie), sur le versant (banquettes d'absorption de Tunisie), dans le fond de la vallée (barrage collinaire) ou dans un grand barrage hors de portée des paysans qui gèrent la montagne ? À qui vont profiter les aménagements antiérosifs ? De cette décision politique va dépendre le choix des diverses techniques observées dans diverses zones écologiques semi-arides.

Les techniques de CES étudiées par les hydrologues et les pédologues montrent clairement l'efficacité de ces approches pour bloquer l'eau en amont de digues imperméables (jusqu'à 60 mm de pluie), donc de réduire le volume d'eau et de sédiments arrivant au barrage. Mais ces résultats montrent aussi leur fragilité (débordements en cas d'averses de fréquence décennale, ravinement sur les sites à argile gonflante) et leur faible durabilité (< dix ans) si on n'organise pas leur maintenance, cas le plus fréquent en Afrique. Par ailleurs, ces eaux stockées devant les banquettes ou les barrages collinaires sont très peu valorisées du point de vue agricole : plus les barrages sont grands, plus ils coûtent chers, inondent des sols fertiles, détruisent des paysages et des communautés rurales et moins ils profitent aux paysans locaux. Enfin, en Ardèche, Morel a montré que sous la pression démographique au XIXe siècle, de grands travaux d'aménagement terrasses sur les versants et seuils/micro-barrages dans les torrents ont réduit les risques d'inondation. Mais la déprise des terres cultivées au XXe siècle ont entraîné la reprise de l'érosion en ravine et détruit beaucoup de terrasses. La forte densité de la population rurale n'entraîne pas nécessairement toujours la dégradation des sols …

2.2. La gestion de la biomasse, la restauration de la fertilité des sols

La couverture végétale et la gestion des matières organiques sont les moyens les plus efficaces pour réduire les risques d'érosion et augmenter l'infiltration (Roose 1994). Mais il est important de noter que les techniques de GCES doivent être combinées à l'apport d'un complément de nutriments (en particulier d'azote et de phosphore, peu abondants dans les sols et les roches) pour que les cultures profitent pleinement de l'amélioration des conditions hydriques et rentabilisent rapidement les aménagements. Or il n'est pas facile en milieu chaud et humide d'assurer une fumure organique et des compléments minéraux, qui minéralisent très rapidement et sont mal stockés par les argiles kaolinitiques.

Les structures antiérosives conventionnelles n'augmentent pas suffisamment la productivité des terres, à moins qu'elles soient combinées à un apport d'engrais organiques et minéraux pour compenser les pertes (érosion et drainage) et les exportations de nutriments dans les récoltes. D'où l'intérêt de l'agroforesterie dont l'enracinement profond des arbres permet de recycler les nutriments entraînés en profondeur par les eaux de drainage et de les concentrer en surface dans l'horizon humifère. En milieu de sols pauvres (cas le plus fréquent en Afrique) et de forte

pression démographique, la fertilité du sol doit être entretenue par une gestion intensive des résidus de culture, le fumier ou le compost, les arbres et les haies vives : toutes les ressources de MO doivent être mieux gérées. Cependant, les améliorations des rendements resteront discrètes tant qu'on n'introduira pas de fumure minérale complémentaire, en particulier de l'azote et du phosphore à la suite de courtes jachères de légumineuses arbustives.

2.3. L'analyse des aménagements complexes, faisant intervenir à la fois la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols à l'échelle régionale

De nombreuses techniques de terrassement ont été testées sur de grandes surfaces en Afrique du Nord, tant pour intercepter les eaux de ruissellement et les terres érodées que pour protéger de grands barrages. L'analyse de leurs effets a montré que dans un premier temps, ces aménagements ralentissent l'envasement des barrages en fixant sur le versant aménagé une grande fraction des pluies (< 60 mm). Mais la surface du sol non protégée s'encroûte rapidement et rejette beaucoup de ruissellement entraînant la rupture des banquettes et la fragilisation de l'ensemble du versant. La durée de vie des banquettes varierait entre 4 et dix ans et celles des petits barrages collinaires entre dix et trente ans. Quatre facteurs expliquent ces échecs : la lithologie (argiles gypseuses, marnes, schistes tendres), la forte densité animale qui parcourt la région, le bioclimat semi-aride et le système agraire. Plus de 50 % des aménagements sont détruits ou endommagés au bout de dix ans. Les aménagements les mieux entretenus sont les cordons de pierres et les murettes souvent stabilisés par des arbres fruitiers ou fourragers. En Inde et à Madagascar, les paysans ont développé des techniques culturales et des structures antiérosives qui ralentissent le ruissellement et piègent les sédiments.

De ces études il ressort qu'il faut choisir des systèmes en fonction du milieu et du choix des agriculteurs, des techniques les plus adaptées possible aux problèmes concrets de dégradation de la productivité des sols.

2.4. La diversité des processus d'érosion et leur répartition spatiale étudiées à travers divers indicateurs (états de surface, infiltration, typologie, radio-isotopes) et un SIG

La plupart des études de risques d'érosion et de transports solides sont basées sur des mesures limitées dans le temps et dans l'espace (m², parcelles, micro-bassins, versants) : or, à ces diverses échelles correspondent des processus différents d'érosion et de sédimentation. D'où la tendance d'étudier la spatialisation d'indicateurs faciles à estimer, validés par des tests de terrain (simulation de pluies) ou de laboratoire (stabilité des agrégats). Une mention spéciale doit être faite pour l'étude des retombées de divers radio-isotopes de demi-vie, variant de quelques semaines (53 jours pour le Béryllium-7) à une trentaine d'années (Césium-137), depuis les derniers essais nucléaires réalisés dans l'atmosphère. Leur répartition dans l'espace rend compte de l'érosion des horizons superficiels en fonction de l'usage des terres et des dépôts tout au long de la chaîne des sols et des positions topographiques. Tous ces indicateurs sont donc précieux pour optimiser les interventions de protection des terres en fonction des objectifs visés.

3. CONCLUSIONS DE CETTE SESSION AUF ENRICHIE DE CERTAINS EXPOSÉS COMPLÉMENTAIRES

3.1. La faible efficacité des approches de CES ou DRS

En Algérie, Maroc et Tunisie, une réflexion sur l'efficacité des aménagements CES ou DRS, effectués par les services des Etats depuis une soixantaine d'années, ont amené les acteurs à modifier leur stratégie de gestion des ressources en eau et sol des collines et montagnes. En effet, l'imposition par les services technocratiques étatiques de grands chantiers de terrassements mécanisés des versants, la correction des ravines et des torrents et la plantation forestière systématique se sont avérées peu efficaces, peu durables et mal acceptées par les paysans éleveurs et cultivateurs, qui gèrent traditionnellement les versants des montagnes depuis des siècles. On dispose enfin de données scientifiques sur l'efficacité limitée, chiffrées à l'échelle des parcelles et des bassins versants, qui confirment les enquêtes antérieures.

3.2. Les recherches, les études et les projets d'application ont montré les potentialités et l'intérêt des paysans pour la GCES, approche participative qui cumule plusieurs avantages

En intégrant de nouvelles techniques culturales (semis direct, labour grossier, jachère fourragère de légumineuses associées), la fertilisation organique et minérale raisonnée et les techniques traditionnelles de gestion des eaux de surface, la GCES vise la restauration de la productivité des terres, l'amélioration des revenus du travail, la maîtrise de l'environnement rural et des innovations en fonction des capacités de travail et d'investissement des sociétés rurales. La gestion raisonnée de la biomasse l'amène à améliorer le stockage de l'eau et la séquestration du carbone dans le sol, à enrichir la biodiversité ainsi que les activités de la faune qui entretiennent la macroporosité et l'infiltration dans les horizons de surface. En soignant sa terre, le paysan maîtrise les problèmes liés au ruissellement et à l'érosion et, en même temps, améliore ses revenus et participe à la réduction des problèmes globaux de réchauffement climatique. Cette approche permet de s'éloigner de la spirale de la dégradation des terres en recherchant des solutions gagnantes à plusieurs niveaux.

3.3. Nécessité de gérer à la fois les ressources en eau, la biomasse et la fertilité des sols

Les communications montrent clairement la nécessité d'approcher le problème de la restauration de la productivité des sols à la fois en améliorant la gestion de l'eau au niveau du versant ou du bassin versant, de la biomasse végétale et animale, des propriétés physiques des sols et des nutriments des cultures : la lutte antiérosive ne peut se limiter à la « conservation des sols en place » puisque la plupart sont déjà pauvres ou en voie de l'être rapidement.

3.4. La lutte antiérosive n'est pas seulement un problème technique : c'est aussi un problème humain

La dégradation des sols traduit souvent un malaise de la société où certains individus tentent de s'emparer à leur bénéfice exclusif et dans les délais les plus

brefs les ressources naturelles, en réalité, assez limitées. Elle peut provenir des tentatives maladroites d'intensification de la production (exemples : mécanisation mal adaptée au sol, pente, climat, système de culture) ou encore de la lutte désespérée pour survivre jour après jour de populations pauvres, confinées sur des surfaces trop étroites.

3.5. L'histoire des populations peut avoir une influence majeure sur la réussite de projet de LAE

L'étude de la spatialisation des techniques traditionnelles de GCES au Maroc a clairement montré que les vieilles sociétés agraires ont mis au point au cours des siècles de nombreuses techniques de GCES et sont susceptibles de s'approprier de nouvelles plus facilement que des sociétés d'éleveurs nomades sédentarisés récemment, même si celles-ci tentent de s'établir sur un terroir limité. Les éleveurs sont plus attachés à la gestion du troupeau, des points d'eau et des réserves fourragères qu'à la protection des sols. Si un troupeau nombreux peut produire du fumier plus riche que la biomasse des parcours, il tasse et appauvrit malheureusement la surface du sol, dégrade le couvert végétal et provoque une nette augmentation du ruissellement et du ravinement. Rares sont les recherches qui ont précisé l'approche des problèmes d'érosion des sociétés pastorales.

3.6. Nécessité d'une approche intégrée des milieux physiques et humains

Les États ont souvent pris l'initiative de démarrer des programmes de conservation des ressources naturelles pour parer à des situations de crises de dégradation du milieu et de la société. Il est rare que ces initiatives technocratiques prennent en compte des systèmes endogènes, traditionnels de gestion intégrée des ressources, ni des complémentarités spatiales, ni des interactions environnementales et sociales.

3.7. La gestion de la biomasse : une des clés de la restauration des sols

Le choix de diverses plantes adaptées localement et, en particulier, de légumineuses fixatrices de l'azote de l'air, accélère le recyclage des nutriments lessivés. Le développement d'un réseau racinaire abondant et profond stabilise la structure du sol et améliore la porosité et l'infiltration. La gestion en surface des résidus de culture couvrant plus de 30 % à 50 % de la surface du sol amortit l'énergie des gouttes de pluie, ralentit le ruissellement, attire la mésofaune au contact de la surface du sol et l'encourage à détruire les croûtes de battance. Tous ces résidus (litières et racines) stockent les nutriments et les redistribuent progressivement au cours de la saison culturale, créant ainsi une ambiance forestière bien tamponnée au niveau de la température et de l'humidité, aux agrégats stables. Grâce à l'humus du sol, les microbes et champignons se multiplient et mettent à la portée des racines des nutriments rendus assimilables. Enfin, les cultures associées entre elles ou avec des arbustes (haies ou arbres d'ombrage) explorent mieux le volume d'air et de sol, valorisent mieux l'énergie lumineuse, dispersent les maladies et les animaux indésirables et produisent plus

de biomasse plus durablement. La lutte antiérosive amène forcément à augmenter la biodiversité d'une niche écologique et la densité de plantation.

3.8. La spatialisation des risques d'érosion et de ruissellement à l'aide d'indicateurs

De nombreuses études ont été consacrées à la spatialisation des risques des divers processus d'érosion en s'appuyant sur divers indicateurs : ceux-ci doivent être faciles à estimer, représentatifs des processus en cause et validés régionalement par des mesures plus classiques sur les terrains les plus représentatifs. La combinaison de techniques modernes comme la simulation de pluies directement sur le terrain, la télédétection, les SIG, certains radio-isotopes permettent de mieux localiser les zones productrices de sédiments ou de ruissellement et, donc, d'améliorer l'efficacité des divers aménagements de GCES.

3.9. L'octroi de subventions est en voie de réduction sous la pression de la mondialisation

Les projets de lutte antiérosive reçoivent moins de subsides que jadis. Il faut donc réussir à convaincre les gestionnaires des terres des risques majeurs de dégradation des ressources en terre et eau et obtenir leur participation dès la conception du projet, faire avec eux le diagnostic de l'ensemble des problèmes environnementaux, définir les techniques d'aménagements intégrés les plus à même de réduire les risques au moindre coût et améliorer les conditions socio-économiques qui ont amené la dégradation du milieu.

Références bibliographiques

HEUSCH B., 1986. Cinquante ans de banquettes de DRS-CES en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22, 2 : 153-162.

HUDSON N.W., 1991. Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin*, Rome, n° 64, 65 pp.

ROOSE E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO*, Rome, n° 70, 420 pp.

ROOSE E., SABIR M., DE NONI G., 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion*, Montpellier, n° 21, 523 pp.

SABIR M., MERZOUK A., ROOSE E., LAOUINA A., 2000. Les stratégies et méthodes traditionnelles et modernes de lutte antiérosive. ENFI, Salé, Maroc, 502 pp.

SHAXSON T., HUDSON N., SANDERS D., ROOSE E., MOLDENHAUER W., 1989. Land husbandry, a framework for soil & water conservation. SWC Soc., Ankeny, Iowa, USA, 64 pp.

Synthèses

ÉVOLUTION DES TECHNIQUES ANTIÉROSIVES DANS LE MONDE

Eric ROOSE
Directeur de recherche au centre IRD de Montpellier, UR SeqBio.
B.P. 64501, F 34394 Montpellier, France, roose@mpl.ird.fr

Abstract

Erosion is generally an important problem for each civilization, as soon as populations are concentrated and the needs for food, cloths and energy are increasing. Facing this challenge, rural populations have developed since 7000 years numerous strategies for soil and water management on hillsides that will be analyzed for three periods. Traditional systems developed before the intervention of engineers, in order to accumulate soil & water enough to extend cropping on semi-arid or steep slopes. They are efficient as long they remain adapted to ecological and economical conditions. In 1860-1980, were proposed modern strategies of rural hydraulics to face economic and environmental crisis. The governments sent their engineers in the degraded countries for soil and mainly water conservation to protect the cities, valley management & water quality. These were not accepted by the farmers because they decreased their own income. Presently, are developed rural development strategies integrating the participation of the farmers and the development of cultural techniques covering better the soil for improving the rural environment and the farmer income. The use of various antierosive techniques is discussed. Future tendencies are proposed taking into account the economic and demographic pressure.

Keywords : *SWC Evolution* ; *History* ; *Future Tendencies.*

INTRODUCTION

La conservation de la fertilité des sols et de la qualité des eaux a généralement posé des problèmes à toutes les civilisations. En effet, dès que la population se concentre, elle augmente la demande en vivres, fibres et énergies et, de ce fait, accélère le défrichement des terres autour des agglomérations, compacte les sols par le surpâturage, les routes et les habitations, et dénude et déstructure la surface des sols cultivés. Il s'ensuit une augmentation du ruissellement et de sa charge solide, le décapage de l'horizon humifère des sols, le ravinement des versants, l'augmentation des débits de pointe des rivières et la dégradation des berges, l'envasement des barrages, canaux et ports, et la dégradation générale de l'environnement.

Face à ces défis dont la nature a évolué au cours des âges, les sociétés rurales ont progressivement mis au point des stratégies traditionnelles de gestion durable

des eaux de surface et de la fertilité des sols. Elles sont restées efficaces tant qu'elles restent adaptées aux conditions écologiques mais aussi socio-économiques. C'est ainsi que les archéologues ont mis à jour les traces durables de cette lutte pour apprivoiser les eaux et les sols cultivables depuis 7 000 ans (Lowdermilk, 1953).

Cependant, avec l'accélération de la croissance démographique depuis le milieu du XIXe siècle, ces systèmes traditionnels se sont avérés insuffisants et ont été progressivement abandonnés en faveur de stratégies modernes faisant appel à la mécanisation, au reboisement des têtes des vallées, à la restauration des ravines et des cours d'eau, à l'installation de banquettes de diversion des eaux de surface et des chemins d'eau pour conduire le ruissellement hors des terres cultivées dans le cadre de coûteux projets d'aménagement hydrauliques de grands bassins versants.

Enfin, depuis les années quatre-vingt, des socio-économistes (Lovejoy et Napier, 1976) et des agronomes (Hudson, 1981) ont analysé l'échec au moins partiel de ces grands projets, pour des raisons techniques (extension à des milieux écologiques trop différents, faible rentabilité), des raisons sociales et économiques (les besoins des populations concernées ne sont pas prises en compte) et humaines (non prise en compte de la culture, des croyances, ni de l'éducation technique des intéressés). Depuis se sont développées des stratégies de gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, des projets de développement rural durable, intégrant tous les aspects de la gestion de l'environnement, de la valorisation des terres et du travail en vue d'améliorer le niveau de vie des gestionnaires des terres (Shaxson *et al.*, 1989 ; Roose, 1994, Hudson, 1999). Vu la grande diversité des conditions écologiques et humaines, il existe une très grande variété de techniques de gestion des eaux de surface et des sols dans le monde. Dans cette note, nous tenterons de mettre en évidence une évolution des techniques de gestion des ressources naturelles et d'aborder les problèmes de lutte antiérosive en fonction des objectifs poursuivis pendant trois périodes récentes, à travers des exemples choisis dans le monde. Nous proposerons en conclusion quelques pistes de réflexion.

1. ÉVOLUTION DES STRATÉGIES AU COURS DE TROIS GRANDES PÉRIODES

1.1. Les stratégies traditionnelles liées aux conditions écologiques et économiques

Face aux problèmes de manque de terre en zone montagneuse ou de manque d'eau en région semi-aride, les sociétés rurales ont mis progressivement au point des techniques adaptées aux conditions écologiques souvent extrêmes, ainsi qu'à des conditions économiques bien précises. L'objectif de ces techniques est d'assurer un minimum de production quelles que soient les conditions climatiques. Quelques exemples illustreront cette hypothèse.

La culture itinérante sur brûlis est probablement la plus ancienne technique utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre. Pour que ce système reste équilibré (brève culture sur brûlis de la biomasse suivi d'une longue

jachère), il faut une réserve considérable de terre (10 à 20 fois la surface cultivée) et une économie d'autosubsistance. Cette stratégie ne s'applique que sur des terres peu peuplées (< 20 à 40 habitants/km² selon la fertilité des sols), assez profondes et bien arrosées. Dès que les besoins vitaux et la pression foncière augmentent, la durée de la jachère diminue et le système se dégrade. C'est le cas actuellement au Sahel en Afrique, mais aussi dans certaines zones montagneuses du bassin méditerranéen, d'Asie et d'Amérique latine.

Les terrasses en gradins irrigués se sont développées depuis des milliers d'années en Asie, puis autour du bassin méditerranéen et en Amérique latine (Hallsworth, 1987), là où la population est dense, les terres cultivables à plat sont rares et le travail bon marché. Comme ces aménagements exigent de gros efforts lors de la construction (700 à 1200 hommes.jours/ha), mais aussi pour l'entretien des talus et la restauration de la fertilité des sols remués, il faut que la production soit rentable (exemple : cannabis dans le Rif) ou vitale (rizières en Asie et Madagascar, sorgho sur les monts Mandara).

Le *zaï* est une technique de restauration des sols dégradés qui existe dans toute la zone soudano-sahélienne de l'Afrique (pluie = 300 à 800 mm). Elle consiste à creuser une cuvette de 20 cm de profondeur et 40 cm de diamètre dans une zone de sols encroûtés, à y concentrer les eaux de ruissellement et la fertilité disponible (deux poignées de poudrette ou fumier), à y semer une douzaine de graines de sorgho qui profiteront au mieux de ces ressources localisées. Mais le travail de préparation de ces cuvettes se faisant durant la saison sèche exige beaucoup de travail (350 jours/ha), de même que le transport du fumier et la protection du champ par un cordon de pierres (Roose *et al.*, 1993). Dès la première année et pour plusieurs décennies, ce système restitue une capacité de production du sol bien supérieure à la production moyenne régionale.

Ces techniques traditionnelles sont restées efficaces tant que les conditions socio-économiques des sociétés qui les ont vues naître ont été respectées. Mais aujourd'hui, beaucoup de ces techniques anciennes, décrites par les ethnologues mais méprisées par les technocrates, ont été abandonnées, suite à la mécanisation de l'agriculture, aux salaires et à l'attrait des villes, à la crise économique, à l'émigration et à la désintégration des sociétés traditionnelles.

Ce n'est pas parce qu'elles sont inefficaces qu'elles sont délaissées, mais à cause du changement des conditions socio-économiques ou démographiques. En un siècle, la population de l'Afrique a quintuplé, mais certains villages n'abritent plus que les enfants et les vieux, incapables d'assurer l'entretien des aménagements.

1.2. Les stratégies modernes d'équipement en petite hydraulique rurale

À l'occasion des graves crises sociales en Europe et aux USA, se sont développées des stratégies modernes d'équipement hydraulique des zones pentues. Il s'agit essentiellement de reforestation des hautes vallées, de correction des ravins et torrents et de terrassement en banquettes des terres cultivées sur fortes pentes. La priorité a été donnée à la réalisation de gros chantiers de terrassement et de reforestation.

La restauration des terrains de montagne (RTM) a été développée en France par les forestiers dans les années 1860, pour faire face à une crise d'érosion due aux populations montagnardes pauvres qui ne pouvaient survivre sans mener leurs troupeaux sur les terres communales déjà surpâturées, tassées par le bétail, entraînant le développement catastrophique des torrents. Pour protéger les vallées aménagées et les voies de communication, l'Office national des forêts a racheté les terres dégradées, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents (Lilin 1986).

Le service de Conservation de l'eau et des sols (CES) a été créé par Bennet aux USA lors de la terrible crise économique de 1930, pour conseiller les fermiers volontaires qui demandaient à l'Etat un appui technique et financier pour lutter contre l'érosion hydrique et éolienne. En effet, l'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes (arachide, coton, maïs) dans la Grande plaine a déclenché une érosion éolienne catastrophique : 20 % des terres cultivées furent dégradées par l'érosion à cette époque. Sous la pression de l'opinion publique, l'Etat mit en place simultanément un programme de recherches et un service de CES au niveau de chaque comté.

La défense et restauration des sols (DRS) a été développée par les forestiers dans les années quarante à quatre-vingt autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages (en trente ans) et à la dégradation des équipements et des terres. La DRS associe la RTM des forestiers (reforestation et correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers). Il s'agissait globalement de mettre en défens les terres dégradées par la culture et le surpâturage et de restaurer par les arbres la capacité d'infiltration des sols dégradés. « Tous les problèmes ne naissent-ils pas du surpâturage et du défrichement abusifs ? » (Gréco, 1978).

1.3. Les stratégies participatives de développement rural intégré

Depuis le séminaire de Porto Rico (Moldenhauer et Hudson, 1987), une nouvelle stratégie s'est développée (*Land Husbandry* ou GCES en français), stratégie qui vise à répondre aux besoins immédiats des paysans, à valoriser la terre et le travail, en améliorant le système de culture, en particulier l'infiltration des pluies, l'enracinement ainsi que la nutrition des plantes. (Shaxson *et al.*, 1989 ; Roose 1987, 1994). L'intensification de la production par l'amélioration des conditions de croissance des végétaux augmente la couverture du sol, la biomasse racinaire et les résidus de culture, l'activité de la faune perforatrice du sol et la rugosité de la surface des champs : elle réduit indirectement les risques de ruissellement et d'érosion. La lutte antiérosive cesse d'être une fin en soi : elle fait partie d'un paquet technologique qui permet à la fois de protéger l'environnement rural et d'assurer la gestion durable de la terre. Elle s'appuie sur la participation paysanne depuis la recherche de solutions au diagnostic local, l'adaptation des techniques traditionnelles aux conditions socio-économiques du marché régional et la mise au point de systèmes de cultures performants et durables. Elles valorisent les capacités d'innovation des paysans et des chercheurs en combinant les techniques traditionnelles et modernes.

2. DISCUSSION

Ces stratégies balancent entre deux écoles qui s'affrontent encore de nos jours sur les priorités de la lutte antiérosive (LAE) :

- l'une considère que c'est le ravinement qui transporte le plus de sédiments aux barrages : elle organise la LAE autour de moyens mécaniques de réduction de l'énergie du ruissellement : invention des terrasses de diversion du ruissellement hors des champs associées à l'aménagement des exutoires et des ravins (divers types de seuils) (Bennet 1939) ;
- l'autre attaque le problème à l'origine du ruissellement : la battance des pluies. À la suite des recherches des équipes de Wischmeier et Smith (1960), elle organise la LAE en modifiant les systèmes de culture pour mieux absorber l'énergie des gouttes de pluie. En améliorant la couverture végétale, la gestion des résidus de culture et les techniques culturales conservatrices de la rugosité de la surface du sol, on réduit la dispersion des agrégats et on améliore l'infiltration des eaux de surface.

Selon les conditions climatiques en effet, l'érosion en nappe ou en ravine domine l'expression des problèmes. Aussi est-il raisonnable de distinguer deux domaines dans la LAE : celui de l'Etat qui continue à gérer la RTM, le ravinement, les glissements de terrain et les catastrophes naturelles (équipe multidisciplinaire de spécialistes) et, par ailleurs, celui de la gestion de terroir qui est du ressort des paysans, les mieux placés pour adapter leurs systèmes de production.

La LAE n'est pas seulement un problème technique. Pour réussir, elle doit s'adapter au milieu humain et proposer des ensembles de techniques acceptables par chaque actif en fonction de son niveau de connaissance et de ses possibilités économiques (main-d'œuvre, investissement en matériel). À la diversité des situations écologiques doit correspondre une palette de solutions techniques adaptées aux conditions humaines.

Depuis Malthus, l'opinion publique pense généralement qu'il y a un lien étroit entre la dégradation du milieu, l'érosion et la densité démographique (Glasod, 1990). Cependant, on a observé qu'une diminution de la population, suite à l'émigration ou la guerre, ne réduit pas forcément l'érosion : le manque de main-d'œuvre jeune pose des problèmes d'entretien des paysages et des dispositifs de gestion des eaux. Dans certains cas au contraire, plus la main-d'œuvre est abondante, plus les terres sont soignées et les phénomènes d'érosion vite corrigés : c'est le cas au pays Bamiléké du Cameroun (Fotsing, 1993), à Madagascar (Boisseau *et al.*, 1999), au Kenya (Tiffen *et al.*, 1994) et dans le Midi de la France (Roose *et al.*, 2002), où les terrasses ne sont plus entretenues depuis que le travail est mieux rémunéré en ville. En Afrique, la relation entre densité de population et l'érosion n'est pas linéaire (Roose, 1994) ; elle passe par des états de crise environnementale pendant lesquelles la vie est si dure que la population est amenée à choisir entre l'émigration ou la modification du système de production développé depuis de nombreuses générations. Il s'ensuit une alternance de crises et de périodes plus stables où se succèdent des systèmes de production adaptés à chaque situation foncière.

Chaque stratégie de LAE a des objectifs différents :

- dans un premier temps, les stratégies traditionnelles visaient l'extension des terres cultivées et la sécurité de la production ;
- les stratégies modernes ont développé des moyens étatiques pour protéger les aménagements et conserver la qualité des eaux et la productivité des sols, en imposant des petits équipements d'hydraulique rurale et des plantations forestières. Les terrasses n'ont pas réussi à améliorer la qualité des sols et les forêts ont été rapidement surexploitées et surpâturées (en particulier au Maghreb) ;
- enfin, l'approche de développement intégré vise la valorisation des ressources naturelles et la restauration, voire l'amélioration des qualités du sol et des eaux, en harmonie avec les besoins immédiats des paysans.

La lutte antiérosive peut s'organiser à partir des modèles d'estimation de l'érosion en nappe, par exemple l'USLE. Les facteurs qui modifient l'érosion sont au nombre de quatre :

- le facteur le plus important, c'est le couvert végétal (rapport de 1 à 1 000), en particulier celui qui est au ras du sol. C varie de 1 sur sol nu à 0,001 sous forêt ou fourrés dense, 0,01 sous prairies et de 0,1 à 0,9 sous cultures sarclées. Mais si le couvert est total, son efficacité est de 97 % pour un paillage et un tapis d'adventices, 70 % à 1 m et 25 % à 4 m de hauteur, car les gouttes d'eau s'agglutinent sur les feuilles et reprennent rapidement de leur énergie. Dès lors, on imagine toutes les combinaisons des méthodes biologiques de LAE : depuis la gestion des forêts et des prairies, les cultures intensives fertilisées, la plantation précoce et dense, les cultures associées (graminées et légumineuses), la gestion des résidus de culture en surface, des adventices et des plantes de couverture, l'association d'arbres dans les champs (parcs) ou en haies vives produisant une abondante biomasse, les rotations avec des prairies ou des jachères de légumineuses. La diversité des combinaisons possibles a été explorée dans les stratégies traditionnelles de lutte biologique qui, de plus, améliorent, au cours du temps, les qualités du sol (stabilité des agrégats, stock en eau et nutriments disponibles) et les activités de la (micro-) faune ;
- le facteur topographique est certainement l'un des plus connus, et son importance est encore très grande : SL varie de 0,1 sur des glacis à pente faible (1 % à 2 %) à 2 à 20 sur des pentes de 20 % à 25 % (rapport de 1 à 200). D'où les nombreuses techniques mécaniques de LAE visant à réduire l'inclinaison de la surface du sol (terrasses, talus), la longueur des parcelles (fossés, haies, talus), et modifiant leur forme (concavité devant les talus et micro-barrages perméables). Mais ces interventions exigent beaucoup de travail et n'améliorent pas le sol, ni sa fertilité, ni sa capacité d'infiltration, ni sa résistance à la battance des pluies. De plus, il est des circonstances où le ruissellement et même, parfois, l'érosion dépendent plus de la position sur le versant que de la pente elle-même. C'est souvent le cas en zone méditerranéenne, où l'alternance de roches dures mais perméables et de roches tendres peu perméables crée du ruissellement hypodermique et des résurgences d'où se développent des ravines

régressives (Heusch, 1972 ; Roose, 1994). Par ailleurs, l'effet de la longueur de pente ne se manifeste que sur l'érosion linéaire, vu les nombreuses interactions avec la rugosité de la surface du sol de l'érosion en nappe. Il semble donc nécessaire de vérifier sur chaque champ l'influence de la pente et de privilégier la réduction de l'inclinaison (talus) plutôt que de sa longueur (fossés). Il existe d'ailleurs des dizaines d'équations régionales fixant empiriquement l'espacement entre deux structures de LAE en fonction de la pente, sans tenir compte de l'état structural du sol. Nous proposons d'observer directement sur chaque champ la longueur de la parcelle nécessaire pour que se développent les rigoles ; cette distance optimale devra être acceptable par le paysan et négociée en fonction de ses impératifs économiques (haies vives au Rwanda) ;

- le facteur pédologique est bien connu : K varie de < 0,10 sur les sols à agrégats très stables, riches en M.O., en argile et R203, et en calcium, 0,3 à 0,4 sur les sols fragiles et jusqu'à 0,7 sur les sols très instables, pauvres en M.O., riches en limons et sable fin et chargés en sodium. Mais en dehors du choix des sols pour les cultures peu couvrantes, il est difficile de restaurer la stabilité structurale d'un sol car elle dépend essentiellement du taux d'argile (marnage, sous-solage), de la saturation du complexe échangeable en calcium (chaulage) et surtout du taux de matières organiques, très sensibles à la minéralisation en milieux chauds et humides. Le dépierrage permet d'augmenter la surface du sol utilisable, mais réduit la résistance du sol à l'énergie des pluies et du ruissellement. Il est donc recommandé de laisser les petites pierres en guise de *mulch* en surface, quitte à enlever les plus grosses pierres pour construire des cordons ou murettes ;
- enfin, les techniques culturales, en particulier le labour grossier et le billonnage en courbe de niveau, peuvent réduire l'érosion de 10 % à 50 % si, toutefois, la pente ne dépasse pas 15 %. Au-delà, la rugosité de la surface du sol ne retient plus guère le ruissellement et l'érosion aratoire ou linéaire risquent de contrarier les bénéfices d'une meilleure infiltration. Les techniques traditionnelles du billonnage selon la pente sont finalement mieux adaptées que la culture en courbe de niveau pour éviter sur pentes fortes les risques majeurs de ravinement ou de glissement de terrain en cas d'averses surabondantes.

3. QUELQUES PISTES DE PROPOSITIONS POUR UN AVENIR PROCHE

La lutte antiérosive doit combiner les approches mécaniques et biologiques complémentaires en vue d'atteindre un même objectif : la gestion durable des ressources naturelles, en l'occurrence l'eau, la biomasse et la fertilité des sols.

Seul l'Etat est capable d'entretenir des équipes de spécialistes susceptibles de résoudre les problèmes difficiles de la restauration des torrents, ravines, glissement de terrain et gestion des forêts et des grands bassins versants. Mais c'est à la société rurale que revient la responsabilité de mettre au point les

systèmes de culture durables adaptés aux conditions régionales. Le rôle des chercheurs pourrait être de cartographier les zones à haut risque et d'accompagner les projets de développement, d'aider les paysans à diagnostiquer les risques, de tester les aménagements proposés en milieu paysan et d'évaluer leur efficacité, leur acceptabilité et leur rentabilité.

Pour établir un diagnostic rapide des risques, toute une série d'indicateurs sont disponibles : les radioéléments pour vérifier la variation spatiale de l'érosion durant les trente dernières années, mais aussi les états de la surface du sol (surface fermée et surface couverte, pente, densité apparente, traces d'érosion, pièges du ruissellement), pour vérifier en temps réel les risques pour chaque parcelle et chaque système de culture (intérêt des simulateurs de pluies). Il serait utile aussi d'analyser l'évolution du marché et de mettre au point des filières rentables et protectrices du milieu : seule une société dynamique saura garder sa jeunesse à la campagne. La lutte antiérosive n'est pas qu'un problème technique, c'est aussi un problème humain et socio-économique.

Développer des systèmes de production qui valorisent les ressources humaines (participation, décision, formation, épanouissement), en eau (améliorer l'infiltration, retarder leur transit vers les rivières, la stocker pour produire à contre-saison), en biomasse (couvrir le sol, intensifier la production, litières pour améliorer les sols) et en sols (améliorer les conditions d'enracinement, d'alimentation en nutriments et en eau). Donc, lutte biologique partout présente.

La gestion de la biomasse : assurer un équilibre entre les plantes pérennes (avec sous-étage) et les cultures annuelles sarclées ; réduire les dégâts des feux ; développer la valorisation des résidus de culture (élevage, fumier ou paillage) ; développer l'agroforesterie et l'association d'arbres fruitiers et de plantes de couverture assurant une production fourragère de qualité ; gérer les adventices et résidus de culture pour couvrir le sol pendant toute la saison des pluies : les M.O. sont plus efficaces pour la LAE en surface qu'enfouis. Cela exige une modification des coutumes africaines de vaine pâture et des feux de brousse.

La gestion de l'eau : améliorer l'infiltration sur les versants en réduisant le labour et l'émiettage du sol nu pour développer des systèmes de labour réduit, de décompactage ou de semis direct sous litière morte ou vivante (légumineuses) ; ralentir le passage des eaux de surface avant d'atteindre le drain principal va permettre de réduire les débits de pointe et, donc, le transport solide des rivières, dont l'essentiel peut se faire en quelques heures pendant la crue de l'année. Pour cela, choisir la dissipation de l'énergie de l'eau (frottement sur la rugosité de la surface du champ — litières — et du versant — micro-barrages perméables : cordons de pierres, haies vives, bandes enherbées —), plutôt que de rassembler les eaux de ruissellement dans des canaux qui conduisent directement les eaux chargées à l'exutoire et la rivière.

La gestion de la fertilité des sols : les stocks de nutriments sont souvent assez élevés dans les sols, mais leur fraction assimilable est réduite et vite consommée par l'exportation des cultures, l'érosion sélective, le drainage et la minéralisation rapide des matières organiques. Il faut donc un apport régulier de M.O. au sol (fumier, litière de résidus de culture, jachère de légumineuses), une revitalisation des sols dégradés et un complément de nutriments au moment où il est nécessaire

pour le développement des cultures. En effet, l'apport de fumure organique est toujours insuffisant et déficitaire dans les nutriments dont les sols sont carencés. Même si le sol est protégé de l'érosion et l'eau suffisante, la croissance des plantes et leur production sera limitée par la disponibilité en nutriments. La fertilisation est donc un maillon essentiel à la LAE. Il doit permettre de passer de la conservation du potentiel de production des sols à son amélioration par une saine gestion des apports organiques et des compléments minéraux permettant l'optimisation de l'utilisation de l'eau et du soleil.

La gestion du milieu humain : cet effort d'aménagement va dépendre à la fois de la cellule de base où la communauté rurale est solidaire (quartier, versant, terroir ou grand bassin versant) et des éléments extérieurs qui favorisent ou ralentissent ce développement (lois, analyse des marchés, routes pour rejoindre la demande, disponibilité des fertilisants et protection phytosanitaire au moment où la plante en a besoin). Bien qu'il soit logique d'aborder la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant, il est clair que des groupements paysans seront plus efficaces pour gérer ces problèmes de gestion des ressources au niveau des versants ou quartiers de bassins. Dans les pays du Sud, la lutte antiérosive/GCES doit aussi donner du travail à l'ensemble de la communauté rurale. Dans les pays industrialisés, la mécanisation doit permettre de réduire la main-d'œuvre nécessaire à la gestion des paysages.

L'ensemble des efforts de gestion des ressources naturelles doit permettre à la fois de réduire les risques d'érosion et d'améliorer la productivité du sol et du travail. Si cette amélioration est insuffisante, il faut mettre au point de nouveaux systèmes de production plus efficaces. Cette approche doit libérer l'esprit d'innovation des paysans (Reij *et al.*, 1996).

CONCLUSION

Ce parcours rapide au travers de l'évolution des stratégies de lutte antiérosive au cours des temps modernes et de la diversité des techniques utilisées par les sociétés rurales aboutit à distinguer les approches de développement intégré de l'environnement permettant l'optimisation de l'usage des ressources naturelles (eau-sol-plantes) en faveur des deux acteurs : les petits paysans protégeant les châteaux d'eau que sont les montagnes et les consommateurs d'eau (irrigation des gros propriétaires, industries, citadins et touristes) ; ils ont chacun leur logique d'intervention en fonction de leurs objectifs.

Aujourd'hui, de nombreuses évidences sont remises en cause : non-labour, influence négative de la densité de population, importance majeure de la longueur et inclinaison de pente, fragilité particulière des sols tropicaux, monoculture et production maximale, cultures associées, etc.

Après la « conservation des sols » du siècle dernier, on parle beaucoup d'« agriculture de conservation », surtout dans les régions à agriculture mécanisée sur d'énormes surfaces, mais de conservation de quoi ? Si les sols sont dégradés, leur « conservation » est-elle satisfaisante ?

L'approche GCES ou *Land Husbandry* va bien plus loin car elle constate que les sols sont déjà dégradés et doivent être améliorés, que les eaux sont souvent déjà

polluées et qu'il faut donc trouver de nouveaux systèmes de production intensifs qui couvrent le sol, améliorent leurs propriétés physiques pour réduire la dégradation des agrégats et des matières organiques. Les mesures de séquestration du carbone dans les sols pourraient nous aider à mettre au point des techniques capables de dépolluer l'air. Seule une association des approches biologiques et mécaniques pourra nous amener à retrouver des espaces sains pour les générations futures.

Références bibliographiques

BOISSEAU S., LOCATELLI B., WEBER J., 1999. *Population and environment relationship. A U-shaped curve hypothesis*, Jardin planétaire, Chambéry, 4 pp.

FOTSING J.M., 1993. Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en pays Bamiléké, Cameroun, *Cah. ORSTOM Pédol.*, 26 : 241-254.

GRECO J., 1978. *La défense des sols contre l'érosion*. La Maison Rustique, Paris, 183 pp.

HALLSTHWORTH E. G., 1987. *Anatomy, physiology and psychology of erosion*. John Wiley & Sons, Chichester, 176 pp.

HARROY J.P., 1944. *Afrique, terre qui meurt*. Éd. Marcel Hayez, Bruxelles, 557 pp.

HUDSON N. W., 1991. Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin* (Rome), 64, 65 pp.

JURION F., HENRY J., 1967. *De l'agriculture itinérante à l'agriculture intensifiée*. INEAC, Bruxelles, 498 pp.

LILIN C., 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22 : 139-146.

LOVEJOY J., NAPIER T., 1976. Conserving soil : sociological insight. J. Soil & Water Conservation 415 : 304-410.

LOWDERMILK W., 1953. Conquest of the land through 7000 years. Agric.information *Bull. USDA SCS*, 99 : 54 pp.

MILLINGTON A. C., 1984. Indigenous soil conservation studies in Sierra Leone. *IASH Publications*, 44 : 529-538.

MOLDENHAUER W., HUDSON N., 1987. Conservation farming on steep lands. SWC SOC, Ankeny, Iowa, 296 pp.

REIJ C., SCOONES J., TOULMIN C., 1996. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. CTA, CDCS, Karthala, 355 pp.

ROOSE E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO* (Rome), n° 70, 420 pp.

ROOSE E., SABIR M., DE NONI G., 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull. Réseau Erosion*, Montpellier, 21 : 523 pp.

ROOSE E., 2004. Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive. *Sécheresse* 15, 1 : 9-18.

SHAXSON T., HUDSON N., SANDERS D., ROOSE E., MOLDENHAUER W., 1989. *Land husbandry, a framework for soil & water conservation*. SWC Soc., Ankeny, Iowa, USA, 64 pp.

WISCHMEIER W, SMITH D.D., 1960. An universal soil loss equation to guide farm planning. *Proc. 7th Intern. Congress Soil Sc. Soc.*, 1 : 418-425.

PLACE DES PETITS BARRAGES DANS LA MOBILISATION DES EAUX DE SURFACE ET DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION AU MAGHREB ET AU MOYEN-ORIENT

Jean ALBERGEL
IRD, UMR LISAH, 2 place Viala 34060 Montpellier France
Jean.Albergel@ird.fr

Abstract

In the beginning of the 1990s, the construction of small dams seemed to take precedence over the policy of large hydraulic works that was popular in the Middle East and North Africa Region (NEMA) during the second part of the 20th century. Nowadays, all countries of NEMA region are involved in a policy of constructing small and middle size dams. These dams appear as very specific structures designed not only to mobilize the surface water resources but also to control runoff and sediment fluxes. They are built for protecting downstream infrastructures and particularly rapid sedimentation of large dams. They integrated rural development by offering a fair distribution of water in the countryside, limiting disruptions in the social order, like massive expropriation, and displacement of infrastructure or lodging. Using the results of multi-disciplinary research carried out in two countries in Northern Africa (Morocco and Tunisia) and two countries in the Near East (Lebanon and Syria), this paper endeavours to show the position of small dams in the mobilization and management of water and soil resources in the semi-arid Mediterranean zones. It describes how the development of small dams has followed different directions and objectives in each country. For example, the goal of large dam protection is more prevalent in Northern Africa than in the Middle East. The prospect of protecting the conservation works and structures are studied using a model of estimation and simulation of sediment transport and yields. These studies allowed the better understanding of the erosion phenomena of and siltation. The stakes of integrated development around hill reservoirs are presented through the progress of irrigation and through environmental impacts as the recharge of the water table.

Keywords : *Mediterranean* ; *Semi-Arid Zone* ; *Small Dams* ; *Soil and Water Conservation.*

INTRODUCTION

Prenant le pas sur l'équipement hydraulique des grands systèmes fluviaux d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (rivières de l'Atlas, Nil, Tigre, Euphrate, Jourdain, Litani…), la petite et moyenne hydrauliques se développent dans ces

régions. Les pays sont engagés depuis plus ou moins longtemps dans une politique de construction de petits barrages qui apparaissent comme des aménagements très spécifiques, destinés non seulement à la mobilisation des ressources en eaux de surface mais aussi à la maîtrise des flux de sédiments. Ces barrages ont des digues de 5 à 15 m de hauteur (limite inférieure des grands ouvrages pour la Commission internationale des grands barrages). Ils sont constitués en remblai, sur de petits bassins versants ruraux dans des zones de relief moyen. Ils sont équipés de déversoirs latéraux de conception rustique, capables d'évacuer quelques dizaines de mètres cubes par seconde, quelquefois un peu plus de 100 m^3 par seconde. Ils possèdent ou non une vanne de fond, et leur coût unitaire est de l'ordre du demi-million d'euros et, quelquefois, nettement moins. D'extension modérée (quelques hectares), les lacs de ces barrages ont une capacité de rétention qui varie de quelques dizaines de milliers à 1 million de m^3 (Albergel et Rejeb, 1997). Leurs surfaces inondées représentent quelques hectares à la cote de déversement des retenues.

En partant de l'expérience tunisienne qui a mis en place dès 1995 un réseau pilote de surveillance hydrologique, environnementale et économique de ces nouvelles structures, le programme européen HYDROMED (Albergel *et al.*, 2004) a conduit une recherche expérimentale pour mettre en évidence à posteriori la place des petits barrages dans l'aménagement du territoire.

1. ORIGINE ET DISSÉMINATION DES PETITS BARRAGES DANS LE BASSIN MÉDITERRANÉEN

Les retenues collinaires actuelles, très fréquentes dans plusieurs régions, sont inspirées de principes précurseurs vieux de plusieurs millénaires. Dès le premier siècle après J.-C., les Yéménites avaient construit un grand nombre de petits ouvrages dans les vallées et en avaient même creusé le long des pentes. De nombreux barrages, aujourd'hui complètement envasés, ont été construits au début de l'ère chrétienne dans tout l'empire romain. Un des plus spectaculaires de ces barrages est celui de Badieh dans les steppes syriennes, sur la route de Palmyre. Ce barrage construit en pierre et d'une capacité d'environ 100 000 m^3 a été réhabilité dans les années quatre-vingt puis à nouveau envasé (Kara Damour et Miski, 1997).

En Europe, de telles infrastructures sont très répandues en Italie et en France, dans les coteaux de Gascogne, les marges pyrénéennes et le Massif central. Le principe moderne de la construction des lacs collinaires est né en Italie du Nord vers l'année 1951 (Darves-Bornoz et Clement, 1957). Au Maghreb, le développement de cette technique de collecte des eaux et de protection des grandes infrastructures s'est instruit de la réussite de l'expérience italienne. Les lacs collinaires constituent aujourd'hui dans les pays du Maghreb et du Moyen-Orient une technique de collecte des ressources en eau de surface utilisée pour plusieurs usages :

- la protection des infrastructures en aval contre les crues et la limitation de l'érosion et du transport solide vers l'aval ;

- la mise à disposition d'une ressource en eau de manière disséminée dans le paysage et le captage du ruissellement pour la recharge des nappes phréatiques ;
- le développement local d'activités agricoles ou récréatives et l'amélioration de l'environnement par la création d'oasis ou le reboisement.

Le tableau suivant montre l'importance de ces ouvrages dans quatre pays du sud et de l'est du bassin méditerranéen.

Les petits barrages dans le semi-aride du pourtour méditerranéen

	Liban	Maroc	Syrie	Tunisie
Nombre de petits barrages[1] réalisés (2000)	2 petits réservoirs, nombreux micro	50 moyens + nombreux petits	43 moyens, 100 petits	600 petits, 50 moyens
Projets en cours	30 petits	objectifs 500, avec une priorité pour des unités de 0,5 à 5 M m^3	30 petits ou moyens	1 000 petits, 200 moyens
Objectifs : AEP Protection aval Recharge nappes Pisciculture Environnement Loisir	 oui crues oui oui oui oui	 oui crues et envasement Grands barrages oui oui oui non	 oui crues oui oui oui oui	 non crues et envasement Grands barrages oui non oui non
Décideur de la réalisation	min. Irrigation Plan vert privé	min. TP min. Agriculture min. Intérieur	min. Irrigation	min. Agriculture DGACTA et DGTH[2]
Mode de réalisation	en régie centralisé	en régie et utilisation intensive de main-d'œuvre centralisé	en régie centralisé	entreprise pri-vée après appel d'offres décentralisé

[1] La Commission internationale des Grands barrages fixe comme limite inférieure une hauteur d'ouvrage de 15 m. Nous considérons comme petits barrages des ouvrages d'une hauteur inférieure à 15 m et d'une capacité inférieure à 5 millions de m^3, en distinguant les micro réservoirs (< 50 000 m^3), les petits réservoirs ou lacs collinaires (50 000 à 500 000 m^3) et les moyens réservoirs ou barrages collinaires (500 000 à 5 000 000 m^3).

[2] Direction générale de l'aménagement et de la conservation des terres agricoles et Direction des grands travaux agricoles.

	Liban	Maroc	Syrie	Tunisie
Remembrement, redistribution des terres	—	suivant les barra-ges	oui	non pour les lacs collinaires, oui pour les barrages
Responsable de l'exploitation	min. Irrigation	min. Intérieur Cer-cle	min. Irriga-tion. Direction de bassin	min. Agriculture (CRDA[3])
Organisation des utilisateurs	—	si AEP, société de distribution des eaux, privée ou collective AUEA[4].	centralisée, gestion par la Direction de bassin	encouragement à la création d'AIC[5] et de comités de ges-tion
Tarification de l'eau	—	oui : couverture des frais d'exploi-tation	oui : couver-ture des frais d'exploitation	non pour les lacs, oui pour certains barra-ges par groupe-ment de produ-cteurs
Etudes et suivis	faibles	importantes	moyennes	importantes

2. PLACE DES PETITS BARRAGES DANS LA MOBILISATION DES EAUX DE SURFACE

Pour quantifier les apports liquides et solides des petits bassins versants situés en amont des lacs collinaires, le projet HYDROMED a réalisé l'équipement de sept sites pilotes : cinq en Tunisie, un en Syrie et un au Maroc. Sur chacun de ces sites, le lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données, la première reliée à un capteur pluviométrique et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au centimètre près et sa température. La température de l'air est également mesurée. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. Des mesures de conductivité électrique et de pH sont effectuées à chaque visite de contrôle et de collecte des données enregistrées (en moyenne, une visite tous les trois mois). Des mesures de bathymétrie et de nivellement sont réalisées périodiquement (en moyenne, tous les deux ans) dans les retenues.

Ces données ont permis l'analyse du bilan hydrologique des retenues. Les débits entrant dans le lac ont été reconstitués sur des petits pas de temps (5 minutes). Les pertes par déversement, évaporation, infiltration ou utilisation de l'eau ont été calculées sur un pas de temps journalier. La figure 1 montre sur un même graphique les précipitations journalières, les variations du niveau du plan d'eau et celui des dépôts de sédiments au fond de la retenue, mesurées au barrage du site marocain de Saboun de 1997 à 2006. On remarquera l'effet de la sécheresse importante des années 1999-2000 qui a frappé le pays.

[3] Commissariat régional de développement agricole.
[4] Association d'usagers des eaux agricoles.
[5] Association d'intérêt collective.

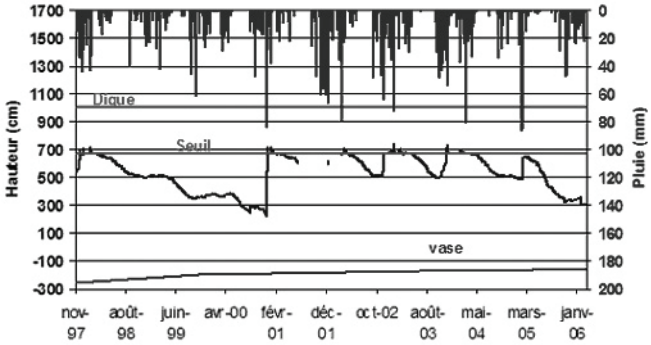


Fig. 1. Observations hydrologiques sur le lac de Saboun

Les données de pluie et d'écoulement recueillies sur ces sept sites ont servi à la mise au point d'un modèle hydrologique permettant la simulation de crues entrant et sortant de la retenue, et le calcul de la probabilité de défaillance du barrage pour un mois donné en fonction d'une capacité initiale, d'un taux d'envasement et d'un objectif d'irrigation (Ragab *et al*, 2001a, b, c).

Un site pilote où la construction du barrage avait pour premier objectif le soutien de la nappe phréatique (El Gouazine en Tunisie centrale) a été équipé de piézographes automatiques afin de calibrer et valider un modèle hydrodynamique de recharge de la nappe (Nasri, 2002). La figure 2 montre la recharge de la nappe alluviale en aval du lac d'El Gouazine sous une pluviométrie inter-annuelle de 400 mm.
Les volumes mobilisés par ces ouvrages sont petits mais disséminés sur d'importants territoires. En Tunisie, par exemple, les 600 petites unités (lacs collinaires) et les 40 un peu plus importantes (barrages collinaires) mobilisaient en 2000, 150 millions de m^3 contre 1 610 millions de m^3 pour les grands barrages. Les eaux stockées dans les petits barrages ou dans les nappes alluviales adjacentes et aval permettent différents usages.

Seuls les ouvrages dont la durée de vie dépasse trente ans et dont la capacité est supérieure à 100 000 m^3 peuvent être utilisés à des fins d'alimentation en eau potable ou à des valorisations par des périmètres irrigués. Les autres peuvent être utilisés pour des reboisements ou la mise en place d'oliveraies; les oliviers ne réclamant une irrigation que les trois premières années de plantation (Selmi *et al.* 2000), ou comme points d'eau provisoire pour les troupeaux, comme les petites retenues collinaires dites *rdirs*, dans les collines situées à la limite de l'aridité (100 à 400 mm), aménagées par les associations d'éleveurs d'ovins et de caprins ont aménagé (Benyounes, 1985).

En Tunisie, un faible volume d'eau des lacs situés auprès des habitations est prélevé pour des fins domestiques.

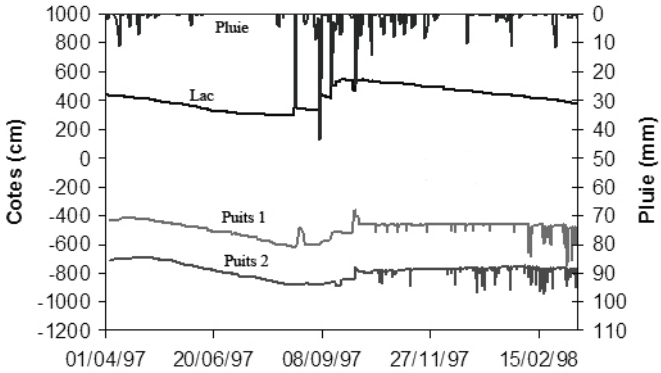


Fig. 2. Recharge de la nappe alluviale en aval du barrage d'El Gouazine

Dans les provinces syriennes de Swaïda, Badia et de Kalamoun ou dans la Bekaa libanaise, la forte croissance démographique et le coût élevé du transport de l'eau par camion citerne ont conduit à construire des ouvrages de rétention d'eau sur les oueds, dès que le coefficient annuel de ruissellement atteint 5 %. Ces barrages sont équipés de pompes et de systèmes de distribution d'eau par tuyau. Des abreuvoirs sont construits pour protéger les réserves d'eau d'une pollution fécale. Bien que tous les barrages de la province aride de Swaîda aient été construits dans un objectif d'AEP, il n'en reste pas moins que le déficit en eau potable atteint encore 75 % des besoins en année sèche dans cette région.

Au Maroc, dans les régions où les eaux souterraines sont inexistantes (régions de grés ou zones de schistes dans le Moyen-Atlas), des petits barrages sont complètement équipés pour la fourniture d'eau potable de qualité. Ils sont alors interdits à l'exploitation agricole et aux animaux, leurs *impluviums* font l'objet de mesures de protection. La présence d'eau potable stimule l'activité économique. Elle stabilise les populations.

L'irrigation est l'usage le plus recherché pour les ouvrages collinaires. En Tunisie, la situation en 2000 montre l'existence de quelques 235 lacs collinaires, équipés en groupes motopompes individuels ou collectifs, et d'une quarantaine de barrages collinaires avec un périmètre irrigué (sources DG ACTA et DGTH). Ces ouvrages contribuent, de ce fait, au développement local. Cette situation sur les 235 lacs collinaires profite à un total de plus de 1500 bénéficiaires qui exploitent l'eau soit dans un cadre individuel pour la majorité des lacs ou dans le cadre d'un comité de gestion ou d'associations d'intérêts collectifs.

Au Maroc, une cinquantaine de petits ouvrages sont mis en exploitation depuis 1985. Les conclusions d'une étude d'évaluation a posteriori du programme des petits barrages par la méthode des effets ont montré que la part de la valeur ajoutée directe agricole et de l'élevage qui revient aux comptes des ménages est estimée à une moyenne de 10 200 Dh/an et par ménage (El Mohamadi, 1994).

L'irrigation à partir des petits barrages est pratique courante en Syrie. L'usage de l'eau pour l'irrigation à partir de ces ouvrages est taxé par l'Etat. La taxe annuelle sur l'irrigation a été fixée en 1997 à 276 lires syriennes par *dhounim*[6], soit l'équivalent de 61 $ US par hectare. Les périmètres irrigués autour de ce type d'ouvrages varient de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares.

Dans les montagnes du Liban, une multitude de petits réservoirs sont utilisés pour capter les eaux souterraines et les eaux de fonte des neiges. Ces réservoirs sont disposés en cascade sur les versants. Leur eau est utilisée pour l'irrigation de vergers.

L'analyse de la diversité de fonctionnement des systèmes de production agricole autour des lacs de petits barrages tunisiens (Selmi 1996) montre que 50 % des exploitants n'ont pas introduit l'irrigation et conservent, leur système de production traditionnel, 28 % commencent à intégrer le facteur eau dans leur fonction de production agricole ; seuls 22 %, pouvant être appelés pionniers, pratiquent la petite irrigation.

Ce taux d'exploitation des lacs collinaires est faible mais très variable d'un site à l'autre. Il tend à croître de manière importante ces dernières années. Sur le site de Kamech, dans le Cap-Bon, la retenue est équipée de 8 motopompes et fait cohabiter des périmètres de cultures industrielles (12 ha de tomates, avec un rendement moyen de 35 t/ha^{-1}, et de piments) et des jardins maraîchers traditionnels.

L'usage de l'eau permet d'introduire de nouvelles spéculations très rentables, notamment le maraîchage et l'arboriculture, dont la marge brute peut atteindre 10 fois celle de la céréaliculture traditionnelle extensive. Cette exploitation optimale de l'eau des lacs collinaires est à l'origine de la création d'un supplément de revenu annuel important qui se traduit par l'amélioration de l'habitat et une spéculation foncière sur les terres jouxtant les lacs. Apparaissent des spéculations à forte valeur ajoutée, comme les pépinières de noyers dans les régions fraîches d'altitude ; les écorces de racines sont utilisées à la fois dans la cosmétique traditionnelle et dans l'industrie pharmaceutique moderne.

3. PLACE DES PETITS BARRAGES DANS LA RÉGULATION DES FLUX DE SÉDIMENTS

L'expérience mondiale évalue le taux de perte en volume des barrages par sédimentation à 1 % par an et à 130 milliards d'euros le coût de récupération des volumes mobilisables d'eau ainsi perdus (Mahmood, 1987). En Tunisie, où les grands barrages représentent un volume mobilisable de 1 612 millions de m^3, cette perte est estimée à 1,6 % (Habaïeb et Albergel, 2001). L'idée est donc de stopper les sédiments essentiellement produits par les zones montagneuses dans de petites retenues au coût de construction modéré. La construction des petits barrages en cascade sur les oueds amortit l'onde de crue et diminue la dynamique érosive des écoulements souvent brutaux en climat méditerranéen.

[6] Unité locale de mesure de la superficie, correspondant à 1 000 m^2, soit 0,1 ha.

La quasi-totalité des grands barrages marocains sont concernés par des apports importants en sédiments. De nombreux petits barrages ont été construits pour ralentir leur envasement. Par exemple, le plus grand barrage du Royaume, barrage d'Al Wahda sur l'oued Ouergha, dans la province de Sidi Kacem (88 m de hauteur et 3,4 milliards de mètres cubes de capacité), est protégé par de nombreux petits barrages construits ou en projet dans l'amont de son bassin pour retenir les produits de l'érosion provenant des fortes pentes marneuses du Rif. L'érosion du bassin versant Ouergha estimée à 98 t/ha/an sur une superficie de 6 150 km² ferait perdre annuellement au barrage un volume de 60 Mm^3 (Maroc Agri, 2001).

Une méthode d'évaluation du transport solide à l'exutoire des petits bassins a été mise au point à partir de mesures régulières de la bathymétrie des lacs collinaires et d'un suivi du bilan hydrologique de la retenue. La bathymétrie de la retenue se fait par sondage ponctuel du fond de la retenue, suivant des transversales entre les deux rives du barrage. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de recollement de la retenue. Un modèle numérique de terrain est réalisé. La comparaison entre les volumes du réservoir à la cote de déversement, d'une mesure à l'autre, permet d'estimer la quantité de matériaux retenus. On attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage. Le transport solide entre deux mesures de bathymétrie est donc obtenu en ajoutant au volume de vase retenu dans le barrage et multiplié par sa densité la masse de terre exportée par les débits liquides déversés.

$$T = V_s \times d + \sum_{i=1}^{n} S_i C_i$$

T : transport solide total entre deux mesures bathymétriques (t) ; V_s : volume de vase mesurée (m^3) ; d : densité de la vase ; n : nombre de crues ayant déversé entre deux mesures ; S_i : volume déversé pendant la crue i (m^3) ; C_i : concentration moyenne en matière en suspension mesurée durant la crue i (t/m^3).

Cette méthode simple à mettre en œuvre permet d'obtenir une bonne estimation des transports solides à l'exutoire d'un bassin versant de retenue. Elle globalise les pertes en terre dues aux trois formes d'érosion hydrique : l'érosion en nappe qui provient du ruissellement des pluies sur les parcelles en pente des versants, le ravinement causé par les écoulements concentrés à l'échelle de portions de versants, l'érosion de berge produite par les variations de régimes d'écoulement dans le réseau hydrographique.

Un modèle permet de simuler les apports crue par crue (Albergel *et al.* 1999). Il a été validé sur huit sites répartis dans les quatre pays du programme HYDROMED et appliqué à 24 petits barrages de la dorsale tunisienne (Albergel *et al.*, 2003).

La figure 3 montre la mesure de bathymétrie du petit barrage de Saboun (bassin versant de 7 km²) dans le Rif occidental du Maroc.

Sur le dispositif du programme HYDROMED, l'envasement rapporté à la surface du bassin versant varie de 1,1 m^3/ha/an (soit 1,8 t/ha/an) sur un bassin de piémont bien aménagé en dispositifs antiérosifs et assez boisé (El Gouazine en Tunisie centrale), à 31 m^3/ha/an (soit 50 tha/an) sur un petit bassin très marneux des

collines pré-rifaines au Maroc, barrage de Saboun (fig. 4). Cet envasement est de 2,4 m^3/ha/an, soit 3,8 t/ha/an, pour le barrage de Syndiané, suivi sur le plateau basaltique de Homs en Syrie. Les zones cultivées sur les versants de ce bassin sont aménagées en talus et murettes de pierres délimitant les champs. Rappelons que l'USDA considère comme érosion « normale » en sol cultivé une érosion comprise entre 1 et 15 t/ha/an (Roose, 1994).

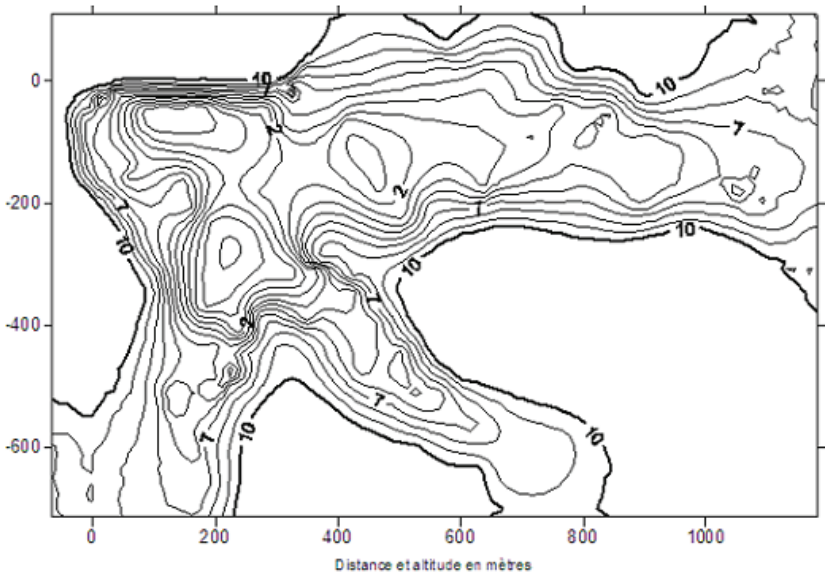


Fig. 3. Bathymétrie du barrage de Saboun en juin 2004

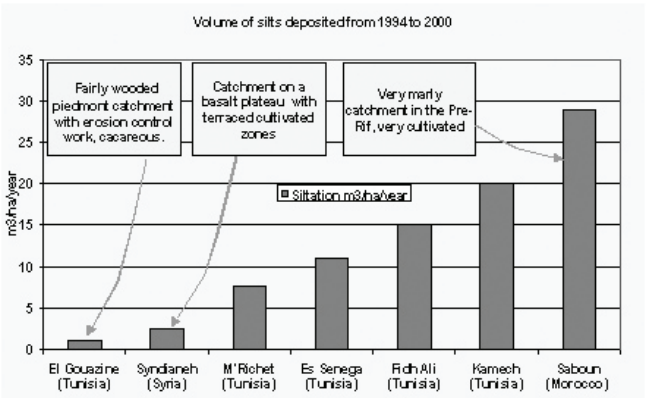


Fig. 4. Envasement dans les retenues collinaire du programme HYDROMED (Albergel *et al.* 2005)

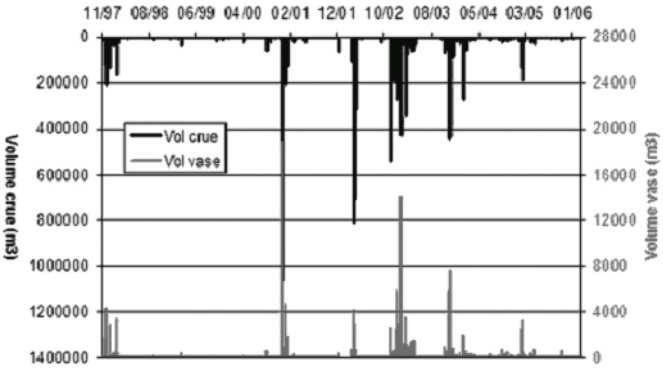


Fig. 5. Crues et apports solides simulés au barrage de Saboun

Le même suivi sur 24 petits barrages dans la dorsale tunisienne montre une perte totale de volume de 585 200 m^3 à la fin de l'année 1999, sur une capacité initiale de stockage de 2 634 000 m^3, soit une perte de 22 % pour une durée d'existence moyenne de 7,7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est donc de 4,6 % par an (ordre de grandeur cité en Italie pour les petits barrages par Gazzalo et Bassi, 1969).

L'érosion moyenne captée dans les petits barrages serait d'environ 16 t/ha/an. En extrapolant ce résultat aux mille lacs collinaires prévus par la stratégie nationale et en leur donnant les caractéristiques moyennes des 24 étudiés, on obtiendrait un stockage de 3,2 millions de m^3 par an, soit 13 % de l'envasement actuel des grands barrages tunisiens, ce qui n'est pas négligeable. Bien sûr, ce résultat ne tient pas compte des barrages qui seraient totalement envasés ou ceux qui seraient emportés par de grosses crues et libèreraient les sédiments stockés.

Le modèle de reconstitution du transport solide crue par crue a permis de mieux comprendre l'érosion et ses conséquences sur l'envasement des retenues de petits barrages. La figure 5 montre cette reconstitution pour le barrage de Saboun au Maroc. On voit bien que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de neuf années, trois crues ont apporté 20 % du transport solide : 22 décembre 2000 ; 21 janvier 2003 ; 8 décembre 2003. La seule crue du 22 décembre 2000 a apporté près de 20 000 m^3 de vase et a contribué à elle seule à près de 10 % du transport observé en neuf ans.

Les mesures du transport solide retenu par le petit barrage de Saboun dans le Rif occidental (bassin versant de 7 km²) montrent une érosion de 50 t/ha/an (Abdelhaoui *et al.*, 2002). Ces valeurs d'érosion très fortes sont en contradiction avec les mesures de l'érosion sur parcelle connues dans la région et dont les plus fortes ne dépassent pas 10 t/ha/an. Deux raisons peuvent expliquer la différence importante entre les données d'érosion spécifique modélisée à partir des données d'envasement du barrage et celles estimées à partir des mesures sur parcelles d'érosion :

- le barrage a intégré tous les événements érosifs depuis sa création (1991), tandis que les parcelles ne sont observées que quelques années et,

souvent, les événements exceptionnels sont mal observés en raison du débordement du dispositif de mesure ;

- il existe sur le bassin versant de Saboun un ravinement très actif qui apporte une quantité importante de sédiment au barrage.

À partir d'expérimentations sous simulation de pluie et de l'application d'un modèle de production et de transfert des sédiments, Hamed *et al.* (2002) font la part des différents types d'érosion sur le bassin versant du petit barrage de Mrichet El Anse en Tunisie centrale (érosion estimée à 12,5 t/ha/an). Ils montrent qu'en année sèche, l'érosion aréolaire produit 90 % des sédiments arrivant au barrage, alors qu'en année pluvieuse, seulement 65 % de l'érosion provient des versants ; le reste est produit par le surcreusement des ravines et les effondrements de berge.

CONCLUSION

Cette rétrospective de résultats obtenus par le programme de recherche HYDROMED montre l'impact significatif des aménagements de petite et moyenne hydraulique sur les flux de ruissellement et de transport solide en milieu semi-aride méditerranéen. Implantés dans des environnements fragiles et à faible activité économique, ces petits barrages sont perçus comme une ressource supplémentaire, vitale mais incertaine. Le choix des sites d'implantation et la gestion des retenues doivent être en rapport avec des objectifs précis d'ordre conservatoire ou délibérément orientés vers le développement rural. Ainsi on voit se profiler les deux grands types de lacs collinaires :

- ceux qui répondent à la présence de risques particuliers dans le milieu, notamment l'envasement de barrages en aval. Les lacs de retenue sont de bons pièges à sédiments. Ils protègent les infrastructures à l'aval et peuvent prolonger la durée de vie d'un barrage plus grand ;
- ceux qui sont en situation de potentialité évidente avec une bonne garantie de ressources en eau et en terres et, surtout, en potentiel humain, motivé, innovateur, compétent, même si un apprentissage est nécessaire, et, en définitive, apte à assumer très vite un transfert de responsabilité à son profit. L'objectif de recharger la nappe alluviale est réaliste dans de nombreux cas et doit être pris en compte.

Les retenues d'eau peuvent être gérées de manière rationnelle avec un suivi hydrologique simple basé sur le suivi des hauteurs d'eau dans le lac de retenue et une bathymétrie régulière.

Références bibliographiques

ABDELHAOUI B., MERZOUK A., ABERKAN M., ALBERGEL J., 2002. Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc), *Revue des Sciences de l'Eau,* 15 : 737-748

ALBERGEL J., PÉPIN Y., NASRI S., BOUFAROUA M., 2003. Érosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. *Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* IASH Publ. n° 278 : 373-379.

ALBERGEL J., REJEB N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *CR. Acad. Agric. Fr., 1997, 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. Albergel*. Discussion pp. 101-104.

ALBERGEL J., COLLINET J., PÉPIN Y., NASRI S., BOUFAROUA M., DROUBI A., MERZOUK A., 2005. Sediment budgets on hill reservoirs of small catchments in North Africa and the Middle East. *International Association of Hydrological Science*, 291 : 323-331.

ALBERGEL J., NASRI S., LAMACHÈRE J.M., 2004. HYDROMED. Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. *Revue des Sciences de l'Eau*, 2004. 17/2: 133-151.

ALBERGEL J., PÉPIN Y., NASRI S., BOUFAROUA M., 1999. Modeling small dams siltation with MUSLE. *Proceedings of the International Seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration HYDROMED. Department of water resources engineering, Lund Institute of Technology, 29/6 au 3/7/98.* Report 3222, LUND, Suède. 195-204.

BEN YOUNES O.C., 1985. La gestion des retenues : les lacs collinaires au Maroc. *Ouvrage d'irrigation. Retenues collinaires (Sophia Antipolis)*. 13 févr.-5 mars 1985.

DARVES-BORNOZ R., CLEMENT, 1957. Les barrages collinaires en Italie. *Rapport de mission* BTGR n° 36.

EL MOHAMADI N., 1994: Gestion et impact des petits barrages sur l'environnement. Cas du Maroc. *Petits barrages. Actes des Journées nationales d'études*. AFEID et CFGB, Bordeaux 2-3 février 1993 : 391-403.

GAZZALO T., BASSI G., 1969. Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituants les bassins versants des cours d'eau italiens. *Extraits de publications de l'Agence Italienne d'hydraulique*, n° 53.

HABAÏEB H., ALBERGEL J., 2001. Vers une gestion optimale des ressources en eau : exemple de la Tunisie. *Séminaire Int. « Hydrologie des Régions Méditerranéennes » ; PHI-V / Documents techniques en hydrologie.* UNESCO, Paris, France : 187-193.

HAMED Y., ALBERGEL J., PEPIN Y., ASSELINE J., NASRI S.; ZANTE P., BERNDTSSON R., EL NIAZY M., BALAH M., 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena 50 :* 1-16

KARA DAMOUR S., MISKI A.F., 1997. *Small dams and hill reservoirs in Syria*. ACSAD.

MAHMOOD K., 1987. Reservoir sedimentation: Impact, extent, mitigation. *World Bank Technical Paper* Number 71. Washington DC: World Bank.

MAROC AGRI, 2001. Le Gharb, hier, aujourd'hui et demain. *Terre et Vie* n° 47. 12 pp.

NASRI S. 2002: Hydrological effects of water harvesting Techniques : a study of tabias, soil contour ridges, and hill reservoirs in Tunisia. *PhD thesis Department of Water Resources Engineering, Lund University*, n° 1030, 104 pp.

RAGAB R., AUSTIN B., MOIDINIS D., 2001, a : The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. The rainfall-runoff model using a genetic algorithm for optimisation. *Hydrology and Earth System Sciences* 5: 543-553.

RAGAB R., AUSTIN B., MOIDINIS D., 2001, c: The HYDROMED model and its applications to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. Reservoirs storage capacity and probability of failure model. *Hydrology and Earth System Sciences* 5 : 563-568.

RAGAB R., MOIDINIS D., ALBERGEL J., KHOURI J., DROUBI A., S. NASRI. 2001, b: The HYDROMED model and its applications to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. Rainfall - runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences* 5 : 554-562.

ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO* n° 70. 420 pp.

SELMI S., 1996. *Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien*. Thèse de doctorat. Montpellier. ENSAM. 400 pp.

LA GCES : LA LUTTE ANTIÉROSIVE ET LE PROFIT ÉCONOMIQUE

G. DE NONI*, E. ROOSE*, G. TRUJILLO et M. ARABI*****

** IRD - B.P. 64501, 34394 Montpellier ; Georges.Denoni ou Eric.Roose@ird.fr*
*** Avenida Amazonas, ministère de l'Agriculture, Quito (Équateur), german_trujillo_yandun@hotmail.com*
**** Centre INRF, Médea (Algérie) ; arabi_m@hotmail.com*

Abstract

With the increasing demographic pressure in the fragile mountains of Algeria and Ecuador, deforestation and cropping on steep slope were extended with the development of gullies, landslide, floods and soil productivity degradation. The Forest Administrations introduced expensive systems to reduce erosion (terracing, reforestation, gully restoration) but with limited success. Another approach was tested by researchers with the cooperation of farmers with two objectives: to increase the soil and labour productivity and to reduce the soil degradation risks with a selection of cultural practices covering fast the soil surface, intensification of biomass production thanks to selected seeds and adapted fertilizers, simple and adapted traditional soil conservation systems (progressive terraces). Two case studies have demonstrated that this approach interested the farmers, increased their income and reduced the erosion risks, even on very steep slopes.

Keywords : *Soil & Water Conservation* ; *GCES; Income* ; *Ecuador* ; *Algeria.*

INTRODUCTION

La dégradation de la fertilité des sols par l'érosion a été de tous temps un phénomène important à l'échelle planétaire, notamment dans les pays du Sud. Mais ce n'est pas une fatalité dans la mesure où l'homme en est le principal responsable et qu'il peut en principe corriger ses mauvaises pratiques pour lutter contre l'érosion. La question fondamentale est de définir quel est le type de stratégie la plus appropriée.

Face aux échecs répétés des projets de lutte antiérosive (Hudson, 1992), la réponse à cette question est restée controversée pendant des années. Mais dans le sillage du séminaire de Puerto Rico (1987), une nouvelle approche, appelée *Land Husbandry* ou Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) est apparue. (Shaxon *et al.*, 1989 ; Roose, 1994). Par rapport aux autres stratégies, la GCES part du constat que les paysans sont prêts à investir sur les bonnes terres où il existe des risques potentiels de dégradation et non sur les terres déjà très érodées et trop appauvries. L'objectif n'est plus la conservation des sols pour elle-même, mais la valorisation durable du travail et de la terre à l'échelle

d'une communauté rurale ou d'un terroir. La méthode place l'homme au centre de la stratégie et associe dans une démarche participative paysans, techniciens et chercheurs.

Après une quinzaine d'années d'essais de terrains et de réalisations partagés avec les paysans, à la suite de Puerto Rico, deux exemples sont présentés ici, en Algérie et en Equateur, afin dévaluer les résultats de la GCES pour la lutte antiérosive et pour le profit économique des petites paysanneries.

1. LA GCES EN ALGERIE

1.1. La problématique

Pour faire face aux problèmes graves d'érosion en milieu rural et aux résultats insuffisants des forestiers pour lutter contre l'érosion, les directeurs de l'Institut national algérien de recherches forestières (INRF) et l'IRD ont mis en commun, en 1985, leurs moyens pour lancer un programme basé sur la GCES, pour répondre au double défi : intensifier l'agriculture et l'élevage en montagne, et réduire la dégradation des ressources en sol et eau. Les mesures de la pluie, du ruissellement, de l'érosion et des rendements ont été réalisées sur 16 parcelles d'érosion situées chez les paysans, à 7 km de Médéa et sur 4 systèmes de production les plus représentatifs qui sont (Roose, Arabi *et al.*, 1993) : système agropastoral sur Vertisol, pente de 12 % ; verger d'abricotiers, sur sol Fersiallitique rouge, pente de 35 % ; vigne sur sol brun calcaire colluvial, pente de 30 % ; et système sylvopastoral, sur sol brun calcaire, pente de 40 %.

1.2. Principaux résultats

Pour quatre années d'observations, l'indice d'érosivité des pluies n'a pas dépassé R usa = 50, ce qui est nettement moins agressif qu'en Afrique tropicale (Roose, 1994). Le ruissellement annuel moyen (Kram %) a été faible même sur les terres peu couvertes. Par contre, le ruissellement maximal (%) lors des averses abondantes tombant sur des sols humides et peu couverts (cas le plus général en hiver) peut dépasser 30 % à 80 % et être dangereux : il est à l'origine du ravinement des versants, des grandes crues, des inondations et des glissements de terrain qui ne se manifestent que tous les cinq à vingt ans dans les milieux méditerranéens semi-arides.

L'érosion en nappe a été très modérée malgré la végétation dégradée et les pentes très raides des parcelles observées. En effet, l'indice d'érodibilité des sols, calculé d'après le modèle de Wischmeier et Smith, confirme que les sols sont très résistants : K varie de 0,02 pour les sols fersiallitiques rouges à 0,001 pour les vertisols et les sols bruns calcaires.

Par contre, il manque 150 mm de sol entre les abricotiers. En supposant une érosion en nappe et rigole de 1 mm par an durant trente ans (= 30 mm), il reste une perte en terre de 120 mm (4 mm/an, soit 60 t/ha/an) qui ne peut s'expliquer que par l'érosion aratoire provenant des doubles labours croisés au printemps et à l'automne. Le rôle de la pente est donc moins évident que prévu. Ces résultats et ceux d'autres auteurs remettent en cause l'application systématique des équations classiques qui lient systématiquement l'écartement entre dispositifs antiérosifs et la

pente (Roose, 1994). Les aménagements antiérosifs ne peuvent se passer d'un diagnostic sérieux du fonctionnement de chaque versant. Il n'y a donc pas de recette universelle simple.

Tab. 1. Résumé des observations dans la région de Médéa

Systèmes	KRAM %	KRMAX	Erosion t/ha/an	Rendement t/ha/an
Sol nu travaillé	10 à 18	34 à 80	2 à 20	—
Syst. traditionnel	3 à 12	8 à 26	0,1 à 2	0,7 (grain), 0,2 (paille)
Syst. amélioré	< 0,1	3 à 9	< 0,1	4,8 (grain), 2,2 (paille)

Les rendements en grain et paille sur parcelles améliorées sont 6 à 10 fois supérieurs à ceux des systèmes traditionnels voisins. La croissance de production permet donc d'améliorer l'élevage et la disponibilité en fumier et résidus de cultures, qui, à terme, peuvent améliorer la stabilité et la fertilité des sols. En outre, on constate au tableau 2, l'amélioration de la valorisation économique de la terre quand on intensifie la production végétale et qu'on modifie le système de production en supprimant la jachère nue pâturée, en introduisant des légumineuses et des cultures intercalaires sous les arbres fruitiers.

Tab. 2. Revenus annuels par type de systèmes de culture

Systèmes de cultures	Revenus
Forêt pâturée traditionnelle	25 €
Blé d'hiver traditionnel	125 €
Vigne ou verger traditionnel	500 €
Rotation intensive blé-lentilles	1 500 €
Rotation intensive sous vigne ou fruitier	3 000 €

On peut conclure que l'intensification n'accélère pas forcément l'érosion et la dégradation des sols : avec un paquet technologique adapté, la production de biomasse en augmentation protège la surface du sol, retarde la formation de croûtes de battance et améliore l'infiltration et la résistance à l'énergie des pluies et du ruissellement.

2. LA GCES DANS LA MONTAGNE ANDINE

2.1. Problématique

En Equateur, l'érosion s'est accélérée dans les années soixante avec la réforme agraire qui a poussé le petit paysannat vers les hautes terres andines. Ces dernières sont situées entre 3 200 m et 4 000 m, dans des zones non utilisées jusqu'alors à cause du froid, de la sécheresse, des pentes et des risques prévisibles d'érosion. Les densités de population sont en général fortes, de l'ordre de 80 et 150 hab./km², et la production, basée sur trois cultures principales (orge, fève et pomme de terre) est destinée essentiellement à l'autosubsistance (De Noni *et al.*, 2001), sur des parcelles en général inférieures à 5 ha.

Bien que l'indice d'érosivité des pluies soit faible aussi (R usa de l'ordre de 100) et les andosols dominants bien structurés, les fortes pentes (25 % et 70 %) exacerbent l'érosion linéaire. Les mesures sur parcelles de ruissellement de 100 m² (20 m x 5 m), effectuées de 1986 à 1991, ont montré que si les coefficients annuels moyens de ruissellement sont modérés (< 15 % de la pluie tombée), en revanche, l'érosion concentrée est forte de 50 à plus de 100 t/ha/an (De Noni *et al.* 1996). En outre, comme en Algérie, la situation est aggravée par l'absence de pratiques conservatoires traditionnelles et l'échec des opérations des forestiers (*Eucalyptus globulus* et *Pinus radiata*). Dans quelques cas, des travaux mécanisés de terrassement furent proposés en complément de la reforestation mais de coût très élevé et inabordable pour le petit paysan (de 700 à 1 500 €/ha).

2.2. Principaux résultats

À Mojanda, dans une région volcanique typique du *minifundio*, pendant cinq ans, l'IRD et le ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage ont évalué l'efficacité de quelques méthodes conservatoires, visant essentiellement à la dissipation de l'énergie du ruissellement par la formation de terrasses progressives. Les observations se réalisèrent sur de grandes parcelles de ruissellement (50 m x 20 m), installées chez les paysans et associant ces derniers à la compréhension des résultats. Les résultats obtenus ont été très positifs, comparés aux données mesurées en situation non aménagée : coefficients annuels moyens de ruissellement < 0,1 % et érosion < 0,5 t/ha/an (De Noni *et al.* 1996). En outre, au plan socio-économique ressortirent les points suivants :

- le coût d'installation et d'entretien des ouvrages, estimé globalement à 250 € par hectare, était relativement bas et bien accepté par le paysannat local, car rapidement compensé par la vente de la production supplémentaire ;
- les rendements : la récolte de pommes de terre a été multipliée par 2 et celle de fève par 4.

Sur la base de ces résultats, la stratégie conservatoire fut appliquée ensuite en vraie grandeur à l'échelle du terroir. Une trentaine de familles participèrent à cette phase sous condition d'installer sur leurs parcelles les mesures et ouvrages conservatoires. Elles bénéficièrent d'une aide technique gratuite et du prêt d'une somme d'argent de 150 €, remboursable au bout d'une année à un taux d'intérêt très faible, pour améliorer la qualité des intrants : achat de semences améliorées,

d'engrais etc. (De Noni *et al*., 2001). La lutte antiérosive a donc été possible parce que la démarche était participative et qu'elle englobait l'amélioration de la production de la terre et du travail.

CONCLUSION

Les exemples pris en Algérie et dans les Andes de l'Equateur montrent qu'il est possible d'appliquer la GCES en vraie grandeur et d'obtenir des résultats positifs pour la lutte antiérosive et le profit économique des petites paysanneries du Sud. Les paysans ont compris l'intérêt d'agir lorsque l'érosion en est encore au stade du risque et des dégâts diffus, la lutte antiérosive étant alors considérée comme une réelle alternative d'espoir. Elle n'est plus ressentie comme une fin en soi, mais comme un moyen indispensable pour intensifier la productivité de la terre et assurer la durabilité de l'agrosystème.

Références bibliographiques

DE NONI G., VIENNOT M., 1996. Mutations récentes de l'agriculture équatorienne, conséquences sur la « durabilité » des agrosystèmes andins, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*. 23, 2 : 277-288.

DE NONI, G., VIENNOT M., ASSELINE, J., 2001. *Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes*. IRD Editions, Paris, collection « Latitude 23 », 224 pp.

HUDSON N.W., 1992. *A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects*, FAO, 64, 65 pp.

ROOSE E., 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 Pédol.,* 28, 2 : 289-308.

ROOSE E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO*, Rome, n° 70, 420 pp.

SHAXSON T.F., HUDSON N.W., SANDERS D.W., ROOSE E., MOLDENHAUER W.C., 1989. *Land husbandry : a framework for soil and water conservation*. Soil and Water Cons. Soc., *WASWC*, Ankeny, Iowa, USA, 64 pp.

SPATIALISATION DE LA GESTION CONSERVATOIRE DES EAUX ET DES SOLS AU MAROC, LES FACTEURS ECOLOGIQUES, SOCIAUX ET CULTURELS

Abdellah LAOUINA*, Eric ROOSE et Mohammed SABIR*****

** Fac. de Lettres, université de Rabat, B.P. 1040, Rabat, Maroc ; laouina@menara.ma*
*** Ur 179, SeqBio, IRD, B.P. 64501, F34394, Montpellier, France ; Eric.Roose@ird.fr*
**** ENFI, B.P. 511, Salé, Maroc ; sabirenfi@wanadoo.net.ma*

Abstract

The traditional water and soil conservation techniques are very important in marginal rural areas. Their spatial distribution is not only related with agro-ecology, but also with socio-economical aspects and a long history of migration and cultures. Namely, the SWC managements aim to capture and improve the use of water under arid and semi-arid environments, while it tries more to conserve the soil via the diversion of water and the decrease of the energy of runoff, in the humid regions. We observe the non inclusion of traditional water and soil management systems into watersheds' management systems. Their "under valuation" nowadays presents the danger of loss of this traditional know-how. It's why the overall aim of this paper is to contribute to a better forecast of water and soil conservation under the various ecological and social conditions of the rural areas in Morocco and to understand the social, economical and cultural processes behind these traditional technics.

Keywords : *Morocco* ; *GCES* ; *Spatialisation* ; *Ecologic* ; *Social & Cultural Factors.*

INTRODUCTION

La gestion conservatoire des eaux et des sols et, plus particulièrement, les techniques et pratiques traditionnelles, occupent une place importante dans les systèmes agraires marocains, notamment dans les régions marginales, de montagne ou de climat aride. Mais ces aménagements sont suffisamment variés dans l'espace pour mériter un effort de spatialisation. Celui-ci a pour objectif principal de présenter aux aménageurs, souvent réticents à recommander l'utilisation de ces techniques, une palette de procédés, adaptés aux conditions locales, car fondés sur une lente acquisition de savoir-faire, parfois sur plusieurs générations.

Le travail de spatialisation des aménagements de CES au Maroc a eu deux antécédents : un travail de régionalisation de l'agriculture marocaine, visant à distinguer des unités homogènes, sur la base de la confrontation des potentialités

naturelles et des systèmes agraires en présence ; puis une tentative de spatialisation agro-environnementale en vue de dégager les risques de dégradations liés aux systèmes d'utilisation actuels et aux dynamiques agraires en cours.

La spatialisation des pratiques traditionnelles de gestion conservatoire des eaux et des sols est plus compliquée ; elle dépend de la distribution des potentiels mais aussi de considérations sociales, car ces pratiques sont le fruit d'une longue histoire et obéissent à des objectifs multiples selon les conditions locales. On peut différencier la diversité et l'extension des systèmes de GCES dans les régions de vieille paysannerie sédentaire et, au contraire, le caractère réduit et peu diversifié des systèmes de GCES dans les régions d'installation récente.

1. PRINCIPES GENERAUX DE LA SPATIALISATION

L'impératif de régionalisation des pratiques endogènes de GCES répond à plusieurs objectifs :

- analyser spatialement la distribution des grands types de pratiques de GCES en fonction des contextes écologiques : les montagnes subhumides, les montagnes sèches, les piémonts et collines méditerranéennes, les piémonts secs, les plaines subarides, les oasis... ;
- différencier les régions où les techniques traditionnelles existent et sont généralisées et celles où elles sont absentes ou très localisées, c'est-à-dire différencier deux types d'attitudes : une attitude de gestion conservatoire (exemple du Haut-Atlas) et des attitudes moins protectrices (exemple du Rif W) ; le comportement conservateur ou non est aussi fonction de la conscience de la menace, de la perception qu'ont les paysans des aménagements qu'ils ont réalisés et de l'objectif qu'ils recherchent ;
- différencier les terroirs à gestion conservatoire évoluée, bien adaptée et ceux à technologie plus rudimentaire ;
- différencier la gestion conservatoire selon son objectif principal, la création d'une SAU, la conservation, voire la création du sol, l'utilisation optimale de l'eau, en fonction de la conscience qu'ont les paysans de ces différents objectifs ;
- différencier les régions selon l'évolution actuelle et le devenir de ces techniques. Sont-elles conquérantes et vivaces ou, au contraire, un héritage en voie d'oubli, sinon même, un héritage déjà abandonné ?

2. L'OBJECTIF D'AMENAGEMENT

Un gradient en fonction du climat peut être discerné :

- en zone humide, il faut à la fois se protéger contre l'eau en excès, générant soit du ruissellement et de l'érosion hydrique, soit des glissements en cas de primauté de l'infiltration, mais aussi produire et donc profiter de l'eau quand les cultures en ont besoin. Dans ces milieux, l'aménagement est étendu et pourrait

intéresser la totalité des espaces en pente, hors-forêt. Pourtant, on constate leur absence dans de nombreux secteurs, parce qu'on peut arriver à produire sans aménagements, en zone humide, même si la menace d'érosion y est très grande ;

- en zone semi-aride, il faut capter les eaux de surface sur les versants non agricoles pour les stocker (nombreuses banquettes, citernes, mares et séguias) ou les orienter vers des piémonts et glacis à sols plus épais : là, les techniques culturales sont particulièrement adaptées à concentrer l'eau et les nutriments vers les souches des plantes cultivées ;
- en zone aride, il faut se protéger contre les épisodes de crues dans les fonds de vallées et disposer d'espaces plans irrigables (terrasses des fonds de vallée en plus de quelques sites de sources). Les aménagements sont ainsi circonscrits à la SAU et même à sa partie irriguée car, dans ces milieux, il est inconcevable de produire hors des ouvrages de GCES.

On peut reconnaître la prédominance des systèmes à objectif hydraulique dans les régions arides, et, au contraire, des systèmes mixtes (hydraulique et édaphique) et très diversifiés dans les régions humides, avec multiplicité des ouvrages, des techniques et des pratiques.

Dans les techniques de gestion de l'eau, la distinction la plus directe est sans doute celle entre les actions de pure mobilisation des eaux et celles qui visent à la fois la gestion de l'eau et la conservation des sols. C'est là une distinction qui peut avoir une connotation spatiale importante. Plus on va vers l'aride, plus la mobilisation de l'eau devient prioritaire; mais cela n'empêche pas qu'elle soit associée à des actions de conservation du sol. Par contre, en milieu plus humide, toute action visant la conservation du sol a obligatoirement une connotation de gestion de l'eau. Enfin, en zone aride, on a des actions de conservation du sol particulières qui n'ont rien à voir avec l'eau, parce qu'elles s'appliquent aux processus éoliens.

Les véritables actions de GCES comportent les deux dimensions (eaux et sols), même si l'un des deux objectifs est souvent prioritaire. L'irrigation par les eaux superficielles comporte toujours une double dimension en rapport avec le sol :

- une dimension amont, puisque les eaux d'irrigation (eau de source, d'oued, d'épandage, de ruissellement…) ont eu, avant d'être utilisées, un parcours qu'il a fallu gérer pour conserver l'eau en quantité et en qualité et pour protéger les terres qu'elles traversent. C'est tout le travail de captage, par exemple ;
- puis une dimension aval, puisque la terre irriguée elle-même peut générer du ruissellement destructif, ce qui oblige à toute une série de travaux de planage, délimitation par des bourrelets et des murs plus ou moins draînants, conduite des surplus d'eaux apportées et d'eaux de pluie, lors des événements météorologiques, vers des chenaux protégés.

Le taux d'action de conservation des sols dans une opération d'irrigation varie selon plusieurs critères : la pente du secteur en question, la nature des eaux amenées et leur volume, le climat local, etc. On peut passer d'une action de conservation du sol primordiale (création d'un sol dans les terrasses en gradin de montage ou sur les banquettes des rives d'oueds) à une simple opération de

contrôle du volume d'eau d'irrigation dans les périmètres irrigués, avec toute une série de transitions, en particulier le cas des zones de piémont à irrigation gravitaire.

L'alimentation en eau potable et d'abreuvement comporte aussi une dimension de conservation des sols (*matfias* et mares) du fait du contrôle amont du ruissellement.

La conservation du sol — sauf en ce qui concerne les actions de lutte contre l'érosion éolienne — comporte toujours une dimension gestion de l'eau. Mais l'objectif varie entre l'interception de l'eau pour en profiter, la diversion de l'eau pour s'en protéger ou, enfin, la dissipation de l'énergie de l'eau sur les versants, comme dans les ravins et les cours d'eau. Dans les régions montagneuses humides, toutes ces catégories d'actions peuvent s'associer, du fait de la nature du climat méditerranéen, caractérisé par des excès momentanés et des périodes de déficit en eau.

3. TYPES D'AMÉNAGEMENTS DE GCES

Le croisement des facteurs physiques et sociaux donne plusieurs types de contextes au Maroc.

3.1. Dans les régions montagneuses humides à semi-arides, à population sédentaire

Toutes les catégories d'action peuvent s'associer du fait de la nature du climat caractérisé par des excès momentanés et des périodes de déficit en eau et du fait de la densité humaine. La paysannerie doit affronter dans l'espace et dans le temps des situations très diverses. L'adaptation à ces conditions a permis de générer des techniques et des pratiques multiples, permettant de répondre à ces divers objectifs. On peut différencier deux sous-types :

- les aménagements complexes des terrasses irriguées et en sec des montagnes arrosées, mais au relief très cloisonné, comme le Haut-Atlas occidental et certaines parties du Haut-Atlas central et du Moyen-Atlas. Dans ces milieux difficiles de haute montagne, à dominante de roches dures, les impératifs primordiaux sont la constitution d'une SAU, qui reste limitée à moins de 5 % à 10 % de la superficie, et la gestion des risques dans un environnement hostile ; les aménagements sont localisés dans les fonds de dépressions, mais, plus généralement, sur certaines pentes, avec une section inférieure irriguée en escalier très régulier, délimité vers le haut par la première *séguia* (canal d'irrigation) et une partie supérieure en culture pluviale (en bour), à aménagement plus discontinu en cordons de pierres ;
- les aménagements diversifiés des montagnes du Nord marocain, où la conservation du sol devient primordiale pour les sites les plus productifs, alors que le reste de versants est utilisé hors CES. Cette situation résulte de considérations géologiques d'abord, vu la nature schisteuse ou marno-schisteuse de nombreux versants et, donc, la difficulté de bâtir des aménagements avec de la pierre, alors que les talus entaillés présentent

souvent le risque de se transformer en cicatrices d'arrachement. Par ailleurs, le système agraire se basait sur la complémentarité agro-sylvo-pastorale et parvenait, grâce à la culture itinérante, à pallier les risques liés à l'érosion. C'est pourquoi, traditionnellement, dans le Rif, les aménagements sont restés limités aux sites proches des douars et hameaux (terres demna). Plus loin, le comportement devenait moins conservateur des sols. La possibilité de pratiquer la culture en sec n'encourageait pas à investir en efforts sur ces terrains. Actuellement, on observe de nombreux cas d'extension des aménagements de GCES (retour des émigrés et de l'argent du Kif).

3.2. Dans les régions arides à vieille civilisation agraire

La conservation du sol, parfois même sa constitution, reste importante mais elle n'est pratiquée que là où l'eau est disponible pour la production du fait de l'irrigation. L'espace intéressé est donc forcément étriqué. Par ailleurs, la diversité technologique est moins grande, même si le travail fourni est, sans doute, plus important. Le soin nécessaire est, sans doute aussi, plus fort, car l'aménagement est vital, du fait de la modicité des autres ressources. On peut différencier deux sous-types :

- *la CES associée à l'aridoculture des montagnes et piémonts steppiques*, à forte charge humaine et vieille civilisation agraire, type Anti-Atlas et Souss. Dans ce contexte de rareté, l'avantage est à l'interception et à l'infiltration de l'eau ; il s'agit de créer les conditions pour cultiver et profiter au maximum des eaux de pluie. L'autre impératif est de disposer d'eau potable et d'abreuvement ; c'est ce qui explique la multiplicité des *matfias* (citernes creusées dans le sol). Des efforts exceptionnels ont été consentis dans ces terres complantées d'amandiers ou d'arganiers. Aujourd'hui, la majorité des terrasses sont en voie d'être abandonnées ;
- *la CES associée aux oasis de montagne, de piémont ou de plaine dans les zones sahariennes* : l'objectif est de créer un espace plan, aménagé pour irriguer et d'y conduire l'eau, sans souffrir de manière excessive des événements de crues ; les aménagements se concentrent à proximité du lit d'oued pour profiter de l'eau, mais avec une protection mécanique et végétale contre les apports de l'oued.

3.3. Dans les régions pastorales humides et dans les parcours steppiques

Les aménagements de CES sont limités dans les régions traditionnellement pastorales, même lorsque celles-ci se sont reconverties à l'agriculture ; dans ce cas, il manque le savoir-faire et la tradition du travail en commun. La prédominance de l'activité d'élevage extensif et le fréquent déplacement expliquent la rareté des dispositifs de CES.

CONCLUSION

L'adaptation et la résistance des techniques traditionnelles, opposées à de nombreux cas d'échec de projets modernes, imposent de connaître ces techniques

et les sociétés qui les ont secrétées pour les utiliser au mieux, en les intégrant aux choix majeurs et au processus de réalisation de ces choix. L'amélioration de ces techniques, déjà connues et testées, évite aux aménagistes de s'égarer dans des recherches sans issue, comme elle assure l'intégration facile et rassurante du petit paysan, de son savoir-faire et de ses compétences dans l'opération de développement.

Références bibliographiques

CHAKER M., EL ABASSI H. et LAOUINA A. 1996. Montagne, piedmont, plaine : investir dans les techniques traditionnelles de CES au Maroc oriental. In C. REIJI, I. SCOONES et P. TOULMIN (édit.) : *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*.- CTA-CDCE - Karthala, pp. 75-86.

LAOUINA A., 2000. Dynamiques agraires et dégradation des terres dans les régions de montagne au Maroc, la perspective d'un développement durable ; in *La montagne marocaine*, Publ Chaire UNESCO-GN, vol. 1, 5- 34.

MAMVA–AGROCONCEPT, 1995. *Plan national d'aménagement des bassins-versants*.

ROOSE E., SABIR M., DE NONI G., 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéens. *Bulletin Réseau Érosion*, IRD Montpellier, 21 : 524 pp.

SABIR M., MERZOUK A., ROOSE E., LAOUINA A., 2000. Les stratégies et méthodes traditionnelles et modernes de lutte antiérosive. ENFI, Salé, 502 pp.

Remerciements aux collaborateurs

Ce travail, rédigé par Laouina, Roose et Sabir, a été réalisé par une équipe de géographes (Abkhar Fatima, Aderghal Mohammed, Akdim Brahim, Al Karkouri Jamal, Amyay Mhamed, Belhilali Mostapha, Chaker Miloud, El Abassi Hassan, El Fasskaoui Brahim, El Harradji Abderrahmane, Hsini Jelloul, Laaouane Mohamed, Laouina Abdallah, Mouhiddine Mohamed, Nafaa Rachida, Naïmi Kacem, Obda Khalid, Rouiha Abdelatif, Tailassan Mohammed, Tribak Abdellatif, Watfeh Abderrahim, Zargueff Ahmed) et par une équipe d'agronomes (Eric Roose, Mohamed Sabir, Mustafa Naimi et des stagiaires de l'ENFI). Ces chercheurs se sont organisés en équipes, sur plusieurs terrains marocains, afin d'analyser la diversité des aménagements et des conditions du milieu.

L'ÉVALUATION DU COÛT ÉCONOMIQUE DE LA DÉGRADATION DES TERRES

Marc BIED-CHARRETON
Professeur émérite de l'université de Versailles — Saint-Quentin-en-Yvelines,
Président du Comité scientifique français sur la désertification
bied-charreton.marc@wanadoo.fr

Abstract

The question of the costs (the macro economic costs, the local costs and the off site costs) of land degradation resulting from different factors such as desertification has become a priority issue in various international forums, especially those related to arid, semi arid and sub humid areas, particularly in the framework of the United Convention to combat desertification. The question of the cost of inaction was highlighted by the OECD in 2005. Concrete studies have rarely been carried out at national level and are rarely referenced in scientific publications. This short paper presents identified studies carried out since the 1980s along with the methods used, limitation and results. Two main approaches: models that are mainly centred on rainfall erosion processes, based on plot surveys, and more spatial approaches where affected areas are classified according to their main land uses. The results are generally under estimated; the annual cost of land degradation in arid countries could be evaluated around 0,5 to 1,5 % of the GDP.

1. LES PERTES DE NUTRIMENTS PAR L'ÉROSION A L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

Il existe de nombreux travaux de modélisation des phénomènes d'érosion depuis les années soixante. La référence est l'équation universelle des pertes en sol (USLE en anglais) ; elle permet d'estimer la perte en terre ou le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ (Roose, 1994 ; Hilborn et Stone, 2000). Ce taux, exprimé en tonnes par hectare, résulte des pluies, de la topographie, du type de sol et des pratiques agricoles. Il concerne surtout les sols cultivés. Ses nombreux développements permettent de calculer un coût économique de l'érosion. L'USLE a été utilisé au Mali en 1989 (Bishop et Allen, 1989, repris par Bojö en 1996) ; au Niger, on est passé de l'USLE à la perte en nutriments pour estimer une perte annuelle à l'échelle nationale. Celle-ci est ensuite estimée en termes monétaires sur la base du prix des engrais. La fourchette annuelle de cette perte va de 2,6 à 11 millions de dollars US de 1989. L'USLE a été également été utilisée pour faire une évaluation des pertes en Amérique latine (Matalo, 2006).

Plus généralement, il existe plusieurs méthodes d'évaluation des biens environnementaux :

- les méthodes dites directes qui se rapportent à l'analyse économique standard en s'appuyant sur des études du comportement des consommateurs en reconstituant une fonction de demande pour le bien considéré (évaluation des préférences par la mesure du changement de productivité ou des dépenses de protection, méthode des prix hédonistes ou méthode d'évaluation contingente) ;
- les méthodes dites indirectes se basent sur les coûts de remplacements. On fait une estimation monétaire d'une perte en capital naturel par la valeur du capital artificiel correspondant à des fonctions identiques (Bailly, 2000 ; Brismar, 2004 ; Lescuyer, 2005 ; Willinger, 1996).

Des discussions sont en cours sur la pertinence d'une évaluation directement basée sur la perte en nutriments qui pourrait conduire à une surestimation (Pagiola, 2004). Une telle évaluation a été faite au Zimbabwe en 1986 et donne environ 117 millions de dollars US (Stocking, 1986-1987).

En prenant en compte le fait que la plus grande partie des terres affectées par la dégradation dans les régions arides et semi arides sont des pâturages et que ceux-ci ne sont pas pris en compte ni par l'USLE ni par les méthodes d'évaluation des pertes en nutriments, on se trouve devant une grande difficulté méthodologique et les évaluations faites sont largement sous-estimées.

2. LES PERTES EN PRODUCTIVITÉ DES SOLS

Depuis les années quatre-vingt, des expérimentations en Afrique tentent de mettre en évidence le lien entre perte en nutriments et perte en productivité des sols. En Éthiopie, on a mesuré les rendements céréaliers en relation avec les quantités d'azote dans les sols. Les pertes observées varient de 46 $ US à 544 $ US. Des modèles cherchent à mettre en évidence les relations eau - sols- productivité agricole pour connaître les variations de rendement (FAO).

Les modèles d'érosion des sols deviennent de plus en plus élaborés car ils prennent en compte les effets de la pluie, du vent, la profondeur des sols, les pertes en matière organique, les organismes présents dans les sols pour définir un taux de déclin des rendements des cultures (Pimentel, 1995).

Ces travaux permettent de valoriser la dégradation des terres, mais ils se limitent aux rendements des cultures, négligeant les activités d'élevage ou forestières. Les travaux sur l'économie forestière négligent la question essentielle en zones arides des pertes en produits forestiers non ligneux (PFNL) et les différents définitions de la forêt entraînent des estimations qui vont du simple au double (Berry et Olson, 2003).

3. LA PERTE DE SERVICES RENDUS PAR LES SOLS

Le *Millenium Ecosystem Assessment* a suggéré une approche en termes de services rendus par les écosystèmes : approvisionnement en nourriture et en bois,

régulation de la biodiversité, du cycle des nutriments et du cycle de l'eau, qualité de l'air, climat, santé humaine, détoxication, services culturels et touristiques. Des études sont en cours pour évaluer la valorisation des services rendus par les écosystèmes (Pagiola, 2004).

Une autre approche pour évaluer les coûts de la dégradation des terres est basée sur la connaissance de l'utilisation de l'espace : cultures pluviales, cultures irriguées, pâturages, forêts. On applique un taux de déclin à la productivité naturelle de chaque type d'utilisation et on obtient des pertes globales. Cela repose, d'une part, sur des observations locales et des jugements d'experts et, d'autre part, sur l'existence de statistiques nationales.

La seule estimation mondiale a été faite par Dregne et Chou en 1992 sur les régions sèches en considérant les cultures pluviales, les cultures irriguées et les pâturages. Elle aboutit à une perte mondiale annuelle de 42 milliards de $ US, ce qui, rapporté en 2006, compte tenu de l'inflation mondiale, donne environ 64 milliards de $ US. Des coûts annuels ont été ainsi évalués dans plus d'une dizaine de pays (Bojö 1996 ; Berry et Olson, 2003 et 2006). Ils aboutissent à des estimations qui sont de l'ordre de 1 % à 9 % du PIB agricole des pays étudiés.

4. DISCUSSION

Toutes ces méthodes ont des limites : elles demandent des données sur des temps longs, qui, souvent, manquent ou qui sont biaisées (par exemple, au Sahel si on prend des périodes avec pluies ou sans pluies) ; elles se basent sur des hypothèses d'extrapolation d'observations locales. Par ailleurs, la multifonctionnalité des espaces est de règle et elle n'est pas prise en compte. Ensuite, on l'a vu, les terres de parcours ne sont pas vraiment prises en compte. Enfin, ces méthodes ne traitent pas des effets indirects de la dégradation des terres (effets *off site*) : envasement des barrages, perturbation des régimes hydriques des fleuves, impact des aérosols, pertes en carbone et en biodiversité.

Par ailleurs, les bases monétaires sont dépendantes des prix en vigueur des céréales. Cela signifie en conséquence que toutes les évaluations faites selon les méthodes décrites donnent des résultats sous estimés.

CONCLUSION

On peut avancer que les coûts de la dégradation des terres évalués dans plusieurs pays arides et semi arides se situent au niveau de 0,5 % à 1,5 % du PIB annuel, ce qui bien souvent *annule la croissance annuelle de ces pays.* Cela montre que le développement d'un pays, s'il est basé sur l'agriculture et l'élevage, nécessite des investissements importants dans le domaine de la gestion durable des terres. Or les agriculteurs locaux sont les plus pauvres et la part des investissements agricoles dans l'aide publique au développement ne cesse de reculer depuis vingt-cinq ans (moins de 5 % de l'APD totale en 2005).

La connaissance des coûts de la dégradation des terres devrait permettre de mieux mobiliser des investissements pour la restauration du capital naturel.

Un réseau international vient de se mettre en place sous l'égide de l'Agence française de développement : le programme Terrafrica de la Banque mondiale, le Comité scientifique français de la désertification et la *Florida Atlantic Universit*y (<http://www.frameweb.org/ev_fr.php ou org/ev_en.php>).

Quelques références bibliographiques

BERRY L., OLSON J., BOUKERROU L. 2006. *Resource mobilization and the status of funding of activities related to land degradation*. Florida Center for Environmental Studies; paper commissioned by Global Mechanism of the UNCCD with support from the GEF, 57 pp.

BIED-CHARRETON M., BRAHIMI Y., REQUIER-DESJARDINS M., 2007. Les évaluations des coûts macro économiques de la désertification en Afrique : inventaire et principaux résultats. *Bois et Forêts des Tropiques* 293 : 30- 42.

BOJÖ J., 1996. The cost of land degradation in sub-Saharan Africa; *Ecological Economics*, 16: 161-173.

BOLI Z., ROOSE E., 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 Geo-Ecology,* 31: 395-401.

PAGIOLA S., VON RITTER K., BISHOP J., 2004. *Assessing the economic value of ecosystem conservation*. World bank, Environment department paper.

PIMENTEL D. *et al*. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267: 1117-1123.

ROOSE E., 1994. Quelques aspects socio-économiques de l'érosion. In « Introduction à la GCES », *Bull. Pédologique FAO*., Rome , n° 70, 3: 45-82.

ROOSE E., NDAYIZIGIYE F., 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 Pédol.*, 28, 2 : 327-350.

ROOSE E., KABORE V., GUENAT C., 1993. Le zaï : fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de restauration de la productivité des terres dégradés de la région soudano-sahélienne. *Cah. ORSTOM Pédol.* 28, 2 : 159-174.

ROOSE E., BARTHÈS B., 2001. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa. *Nutrient Cycling in Agrosystems,* 61: 159-170.

STOCKING M., 1987. Quantifying the on-site impact of soil erosion in land conservation for future generation. ISCO V, Bangkok, S. RIMWANICH (ed.), Ministry of Agriculture, Dept of Land Management, Bangkok, Thaîland: pp. 137-162.

Gestion de l’eau sur les versants et petits bassins

IMPACTS HYDROLOGIQUES DES BANQUETTES ANTIÉROSIVES SUR UN VERSANT SEMI-ARIDE EN TUNISIE CENTRALE

S. NASRI*, M. LAAROUSSI, Y. EL ALI*** et H. HABAIEB******

** Chargé de recherche à l'INRGREF, Tunisie, nasri.slah@iresa.agrinet.tn*
*** étudiante à l'ESIER Medjez El Bab, Tunisie*
**** Thésard à ENSA, Montpellier, France*
***** Professeur, INAT, Tunisie, Hbaieb.hamadi@inat.agrinet.tn*

Abstract

In this study, the authors evaluated hydrologic impact on water and soil conservation of a contour ridge system, carried out since June 1997, on an 11.2 ha catchment area in Ousseltia region, in central Tunisia. Until June 2005, the current total retention capacity of all contour ridges was evaluated to 1800 m^3. In the same way, the total sediment volume retained behind the contour ridges was evaluated to 800 m^3. Thus, the contour ridges lost 30% of their initial holding capacities during 8 years. The erosion rate in each sector varies from 4 to 30 $tonnes.ha^{-1}.year^{-1}$. In consequence, the available duration of the 14 contour ridges is ranging from 14 and 79 years. The contour ridges system reduced significantly water runoff by 40% to 90% and until 94% the maximum discharge. Moreover, if all runoff area upstream contour ridges have been cultivated, the runoff can be reduced over than 90% for rainfall lower than 60 mm and from 40% to 70% for rainfall more than 60 mm.

Keywords : *Tunisia* ; *Contour Ridging* ; *Hydrological Impacts* ; *Semi-Arid Area*.

INTRODUCTION

L'aménagement en banquettes antiérosives est très répandu en Tunisie centrale. Actuellement, plus d'un million d'hectares de terres agricoles sont aménagées en banquettes mécaniques. Ces aménagements, en milieux semi-arides, sont des levées de terre de 1,5 m de hauteur, édifiées perpendiculairement à la pente du terrain. Elles se composent d'un canal qui retient les eaux de ruissellement et les sédiments en provenance de l'espace inter-banquettes. Elles sont construites sur des pentes inférieures à 25 % dans le but d'intercepter les eaux de ruissellement, de favoriser l'infiltration et de réduire l'érosion sur les versants.

Plusieurs auteurs ont décrit les aménagements traditionnels (p. ex., El Amami, 1984 ; Prinz, 1995, 1999 ; Ennabli, 1993 ; Achouri, 1994 ; Tobbi, 1994). Certaines études se sont intéressées aux aspects techniques de différents types

d'aménagements (p. ex., Shanan *et al.*, 1970 ; Ennabli, 1993 ; Alaya *et al.*, 1993 ; Oweis et Prinz, 1994), d'autres ont décrit les aménagements du point de vue de leurs utilisations agricoles (p. ex., Evenari *et al.*, 1982), un troisième groupe d'études ont évalué les performances et les effets des aménagements sur l'amélioration de la production agricole et les revenus des agriculteurs (Oron *et al.*, 1983 ; Oweis et Taîmeh, 1994). Cependant, très peu se sont intéressées à la quantification des impacts hydrologiques des aménagements de conservation des eaux et du sol.

Nasri *et al.* (2004) ont étudié l'impact hydrologique des banquettes sur le bassin versant d'El Gouazine, d'une superficie de 18,1 km², situé à 15 km de la délégation d'Oueslatia, dans le gouvernorat de Kairouan, au centre de la Tunisie. Avant l'aménagement en banquettes, le coefficient de ruissellement global du bassin versant était inférieur à 8 % pour les hauteurs de pluie inférieures à 20 mm, et compris entre 20 % et 30 % pour les hauteurs de pluie supérieures à 20 mm. Après l'aménagement, les pluies enregistrées n'ont engendré qu'un faible ruissellement : un coefficient de ruissellement compris entre 1 % à 3 % pour les pluies de 30 mm à 50 mm, un coefficient de 9 % pour une pluie de 80 mm de fréquence décennale. Malgré son extension limitée à 43 % de la superficie du bassin versant, l'aménagement antiérosif en banquettes joue donc un rôle très important sur la rétention des eaux de ruissellement au point de limiter considérablement, de 50 % à 80 %, les apports dans la retenue du petit barrage collinaire en aval.

Il a été conclu par Nasri *et al.* qu'une modélisation hydrologique précise, pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant, devra chercher, d'une part, à quantifier le ruissellement des parties cultivées (avant et après aménagement) et non cultivées partiellement boisées, et d'autre part, à simuler le fonctionnement hydrologique d'une cascade de banquettes (stockage, infiltration et débordement). Dans cet article, les auteurs ont évalué le fonctionnement hydrologique d'une cascade de 14 banquettes et son impact sur la conservation des eaux et du sol à l'échelle d'un versant.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le petit versant situé sur la rive gauche de l'oued El Gouazine a été aménagé en banquettes pendant le mois de juin 1997 sur une superficie de 11,2 ha. Les 14 banquettes réalisées consistent en des levées en terre d'une hauteur moyenne de 1,5 m. L'écartement entre deux banquettes successives, fonction de la pente, varie de 30 m à 50 m. Cet aménagement a été réalisé principalement sur des terres de culture et une partie des parcours dégradés, afin de les transformer en terres cultivées. Ces banquettes ont été faites de façon à retenir les eaux de ruissellement. Elles présentent des pentes longitudinales de 0 ‰ à 10 ‰. Chaque élément de banquette a une longueur comprise entre 72 m et 236 m et une section transversale variable comprise entre 0,5 m² et de 3 m² en amont de la banquette, soit une capacité de rétention linéaire qui varie de 0,64 m^3 à 1,55 m^3 par mètre linéaire (ml), avec une valeur moyenne de 0,97 m^3/ml.

Un nivellement topographique précis (5 m x 5 m) a été réalisé à l'aide d'un tachéomètre laser (théodolite, Leica TC805L) afin d'établir un modèle numérique

de terrain (MNT) du versant aménagé en banquettes. Ce MNT a permis de créer les courbes de niveau de la zone d'étude pour délimiter la superficie du petit bassin versant avant et après aménagement par rapport à son exutoire naturel. De même, il a permis de connaître la superficie de l'*impluvium* de chaque élément de banquette. Au niveau des éléments de banquettes, un nivellement de terrain plus précis (1 m x 2 m) a été réalisé pour en déduire les caractéristiques relatives à chaque élément, à savoir la capacité de rétention actuelle de son canal, la longueur de la banquette, le sens de l'écoulement dans le canal et de déversement à l'une des extrémités de la banquette, ainsi que les dimensions du remblai. Les deux nivellements ont permis ainsi de tracer les chemins de l'eau à l'intérieur du petit bassin versant avant et après l'installation des banquettes.

Deux éléments de banquettes de ce versant ont été utilisés pour réaliser des observations hydrologiques. Pour ce faire, des murs espacés de 45 m et de 54 m ont été construits dans les canaux des deux banquettes, puis prolongés sur les *impluviums* par des petites levées de terre, de manière à délimiter des parcelles d'environ 2 800 et 2 900 m^2. Deux limnigraphes et deux échelles limnimétriques ont été installés dans les zones de stockage des eaux de ruissellement. Un pluviographe a été installé entre les deux parcelles. Les observations hydrologiques ont commencé en octobre 2004 et se poursuivent encore actuellement.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des chemins de l'eau sur le versant aménagé montre que l'aménagement en banquettes de ce versant a modifié le réseau hydrographique et les limites du bassin versant drainé par l'exutoire. La superficie initiale drainée était égale à 5,3 ha avant l'aménagement, et elle est de 11,2 ha après aménagement.

Les mesures topographiques au théodolite laser ont montré que la superficie totale des *impluviums* des 14 banquettes est de 9 ha. La superficie occupée par les banquettes (fossé et talus) est égale à 19 % de la superficie totale du versant aménagé. La capacité totale actuelle de rétention de toutes les banquettes a été évaluée à 1 800 m^3. Cette valeur doit être comparée à la capacité théorique initiale de stockage de ce type d'aménagement que nous avons évalué à 2,28 m^3/ml, soit 4 110 m^3 pour les 14 banquettes. Les pertes des capacités de rétention des éléments de banquette varient en fonction de la taille de l'*impluvium* de chaque banquette, de la pente du terrain, de l'occupation des terres et des déversements des autres banquettes.

Une analyse détaillée des capacités actuelles de stockage et des superficies des *impluviums* de toutes les banquettes montre que ces capacités correspondent à des lames ruisselées sur les *impluviums*, variant de 9 mm à 62 mm, avec une moyenne de 25 mm. Les observations hydrologiques réalisées entre octobre 2004 et juin 2005 sur l'élément de banquette avec un *impluvium* en jachère montre qu'une averse décennale de 80 mm peut ruisseler avec un coefficient de 75 %. Pour l'élément de banquette avec un *impluvium* cultivé, ce coefficient de ruissellement n'est que de 25 %. En utilisant ces coefficients sur les *impluviums* des 14 banquettes du versant aménagé, on constate que 13 banquettes sur 14 déversent avec un *impluvium* sur jachère dégradée, et 6 banquettes sur 14 le font

avec un *impluvium* cultivé. Même sur des *impluviums* cultivés pour un évènement pluvieux décennal dans cette cascade de 14 banquettes, trois d'entre elles déversent des volumes compris entre 65 m^3 et 83 m^3. Elles présentent donc un risque non négligeable de rupture.

À l'échelle du versant, les observations hydrologiques montrent que le travail du sol sur l'*impluvium*, combiné à l'aménagement en banquettes mécaniques, permet de réduire de 87 % la lame ruisselée pour les pluies inférieures à 60 mm, et de 72 % à 87 % la lame ruisselée pour les pluies supérieures à 60 mm. Si le bassin versant reste en jachère, les aménagements en banquettes mécaniques permettent de réduire de 63 % à 87 % la lame ruisselée pour les pluies inférieures à 60 mm, et de 56 % à 63 % la lame ruisselée pour les pluies supérieures à 60 mm.

3. CONCLUSIONS

La superficie du sous-bassin versant d'El Gouazine, de 5,3 ha avant aménagement, devient égale à 11,2 ha après son aménagement en banquettes mécaniques. Ceci est expliqué par le fait que les longueurs des banquettes dépassent les limites des lignes de crêtes. La superficie occupée par les banquettes est égale à 2,1 ha, soit environ 19 % de la superficie totale du sous-bassin versant aménagé. Cependant, la superficie occupée par l'aménagement et perdue pour l'agriculteur est compensée par l'aménagement des parcours transformés en terres de cultures. De plus, le travail du sol se fait parallèlement aux banquettes, ce qui accroît la protection des terres agricoles en évitant les labours dans le sens de la pente.

La capacité totale actuelle de rétention de toutes les banquettes est évaluée à environ 1 800 m^3, soit l'équivalent du lame d'eau ruisselée de 20 mm sur tout le sous-bassin versant. Cependant, la capacité initiale théorique de ces banquettes a été évaluée à 4 100 m^3, soit l'équivalent d'une lame ruisselée de 50 mm. Après huit années, cet aménagement en banquettes aurait perdu 3/5 de sa capacité de stockage. Cette perte peut être due à l'envasement des canaux en amont des banquettes, à l'érosion mécanique due au labour de ces canaux ou bien encore à des capacités initiales de stockage inférieures à la valeur moyenne de 2,28 m^3/ml prescrite dans les cahiers des charges.

Les observations hydrologiques en amont de deux éléments de banquettes montrent que le ruissellement commence pour 15 mm de pluie sur une jachère dégradée et 25 mm sur une parcelle cultivée. Sur le versant aménagé en banquettes, ces pluies limites de ruissellement passent à 30 mm pour une jachère dégradée et à 40 mm pour un versant cultivé. En considérant que l'écart observé entre les seuils pluviométriques de ruissellement est dû à l'aménagement en banquettes, la capacité totale de rétention des 14 banquettes peut être évaluée à 1 680 m^3, ce qui correspond bien à l'estimation faite à partir des nivellements topographiques.

Cependant, l'aménagement présente une certaine hétérogénéité quant à la capacité de rétention de chaque élément de banquette par rapport à la superficie de l'*impluvium*. Après huit ans de fonctionnement, pour une pluie décennale, 6

banquettes sur 14 ont des capacités de rétention inférieures aux volumes ruisselés sur leurs *impluviums* cultivés. Par contre, si les *impluviums* restent en jachères dégradées, 13 banquettes sur 14 déversent. Lorsque le versant est cultivé, ces déversements sont engendrés principalement par des capacités de stockage inférieures aux volumes ruisselés sur les *impluviums* (6 banquettes sur 9) et, secondairement, par des apports de banquettes amont qui déversent (3 banquettes sur 9).

Globalement, l'aménagement en banquettes de ce versant semble avoir bien fonctionné pendant huit ans, malgré une certaine hétérogénéité dans les capacités de stockage des éléments de banquettes. Cette hétérogénéité présente un risque de rupture en cascade des banquettes, dans la mesure où les déversements se font d'une banquette à l'autre et, parfois, de deux banquettes dans une seule banquette aval. Pour améliorer la durabilité de l'aménagement en banquettes, il serait souhaitable d'homogénéiser les capacités de stockage par mètre linéaire et d'adapter ces capacités aux ruissellements réels des *impluviums*. Pour les banquettes présentant un risque de déversement, on peut proposer la construction de seuils déversoirs en pierres sèches ou cimentées. Les volumes déversés ayant tendance à croître de l'amont vers l'aval, il nous semble important de prendre en compte le fonctionnement hydrologique global d'une cascade de banquettes au moment de la conception de l'aménagement. Ainsi, au moment de la préparation des plans d'aménagement, les écartements interbanquettes doivent être calculés en tenant compte non seulement de la pente mais également des capacités réelles de ruissellement des *impluviums*. Il faut également prévoir le déversement des banquettes et l'organisation de la cascade de banquettes de manière à retarder les écoulements et à éviter le cumul excessif des débits déversés.

Références bibliographiques

CAMUS H., BOURGES J., BOUZAINE S., FERSI M., BEN YOUNES M., 1980. *Ruissellement et érosion sur l'oued Zita. Rapport de synthèse*, ORSTOM-DGRE 1972-1979.

CHAABI A., 1998. *Méthodes d'évaluation de l'érosion sur un bassin versant traité en banquettes dans une zone du semi aride (sous pluie naturelle et simulées).* Projet de fin d'étude. INAT.

EL AMAMI S., 1984. Les aménagements hydrauliques traditionnels de Tunisie. Rapport technique du Centre de recherche du génie rural Tunisie.

HEUSCH. B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. *Cahier ORSTOM Pédol.* 22, 2 : 153-162.

NASRI S., ALBERGEL J., BERNDTSSON R., LAMACHÈRE J.M., 2004. Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau,* 17, 2 : 265-289.

NASRI S., ALBERGEL, J., CHRISTOPHE C., BERNDTSSON R., 2004. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*, 49, 2.

EFFICACITE DES BANQUETTES SUR L'ÉROSION DES TERRES, LE REMPLISSAGE ET L'ENVASEMENT D'UN LAC COLLINAIRE EN ZONE SEMI-ARIDE TUNISIENNE

N. BACCARI*, S. NASRI et M. BOUSSEMA***

** Laboratoire de télédétection et systèmes d'informations à référence spatiale,*
École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie ; noamene_b@yahoo.fr
*** INRGREF, Tunisie, nasri.slah@iresa.agrinet.tn*

Abstract

El Gouazine catchment (18,1 km²), situated in semi-arid central Tunisia (with 350 mm of annual mean rainfall), was concerned in construction of contour ridges with total water runoff retention on 43% of its area between June 1996 and July 1997. After installation, the inflow to the reservoir decreased by 50%-80% the contributions of water; in the same way, the specific silting up rate of the lake decreased from 1.55 (1996) to 1,1m^3/ha/year (1998). However, from October 2000, the contributions of water and sediments in the lake increased again. The coefficients of streaming reached 33% in 2003 and the rate of silting picked 1,46 m^3/ha/year in June 2005. In fact, the efficiency of the contour ridges was analyzed starting from the high resolution orthoimages and land surveys with GPS. These works made it possible to identify 109 breaches out of the 439 contour ridges carried out on the catchment, that is to say, one contour ridge out four is damaged. The results showed that the efficiency of these installations are closely related to the lithological nature of the ground, the slope, the length of elements of contour ridges and its holding capacities. Thus, this study is meant to improve the plans of contour ridges management of hill slope catchment in the semi-arid regions.

Keywords : *Tunisia* ; *Contour ridges* ; *Erosion* ; *Sedimentation* ; *Barrage*.

INTRODUCTION

Au cours des trois dernières décennies, environ un million d'hectares de terres agricoles ont été aménagées en banquettes mécaniques antiérosives en milieu semi-aride tunisien (CES, 1999). Ces aménagements permettent la lutte contre l'érosion hydrique des terres et favorisent l'infiltration des eaux de ruissellement sur les versants aménagés. Cependant, l'efficacité de ces aménagements à l'échelle élémentaire et à l'échelle du bassin versant, ainsi que leur impact sur la réduction des apports d'eau vers un barrage ou une retenue collinaire existant à l'aval de ces aménagements, restent mal connus. Ce travail a pour objectif d'étudier l'efficience de ces aménagements à travers des indicateurs qui ont été définis en fonction des caractéristiques techniques de l'aménagement, de la nature du milieu physique,

ainsi que de l'hydrologie et de l'hydrographie. Différents indicateurs ont été déterminés à partir des images aérospatiales de haute résolution complétées par des observations sur le terrain.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le bassin versant d'El Gouazine (18,1 km²) est localisé en Tunisie centrale semi-aride, avec une pluviosité annuelle moyenne de 350 mm. Environ 35 % de la superficie du bassin est couverte par une forêt de pins d'Alep, 24 % par une garrigue et le reste (41 %) étant cultivé essentiellement en céréales. Entre juin 1996 et juillet 1997, le bassin versant a été aménagé en banquettes à rétention totale sur environ 43 % de sa superficie.

Au niveau de l'exutoire du bassin versant, une retenue collinaire a été construite en 1993. Dès lors, des enregistrements hydrologiques continus de la pluie et des apports d'eau ont été réalisés. De même, des mesures bathymétriques périodiques ont permis de connaître la sédimentation du lac entre 1993 et 2005. Ces séries de mesures hydrologiques et bathymétriques permettent de dégager l'impact des banquettes à l'échelle du bassin versant sur la réduction du ruissellement et de l'envasement de la retenue.

Les banquettes mécaniques réalisées sur le bassin versant d'El Gouazine sont des levées de terre construites parallèlement aux courbes de niveau. Chaque élément de banquette est édifié perpendiculairement à la pente du terrain avec un remblai de terre de forme trapézoïdale et d'un fossé évasé sous forme d'un canal dans sa partie amont. La banquette a pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et d'empêcher leur concentration (Heusch, 1986). Ces aménagements sont généralement dimensionnés pour des pluies d'une période de retour de dix ans. Les banquettes réalisées depuis une quinzaine d'années peuvent donc être assujetties soit à un comblement, partiel ou total, par les sédiments, de leurs canaux de stockage, soit à des brèches dans leurs talus, témoins d'un dysfonctionnement hydrologique qui réduit le rôle antiérosif de ces aménagements.

Trois groupes d'indicateurs d'efficience des banquettes ont été définis pour analyser les causes de leurs dysfonctionnements :

- trois indicateurs sont relatifs à la réalisation des aménagements : le rapport de la capacité de rétention de la banquette à la surface de l'*impluvium*, le rapport des distances minimales et maximales entre une banquette et la courbe de niveau la plus proche, et le rapport entre les densités du sol en place et celles du talus de la banquette ;
- trois indicateurs sont relatifs au milieu biophysique : l'occupation des sols, la lithologie et la pente du terrain ;
- trois indicateurs relatifs à l'hydrologie, à l'hydrographie et à l'érosion des sols : la densité de ravinement, la densité de drainage et l'évolution des apports liquides et solides à l'exutoire du bassin versant.

L'analyse des orthophotos nous a permis d'élaborer les cartes d'occupation des sols, du réseau hydrographique, des alignements des banquettes et des ravines, les enquêtes de terrain de localiser avec précision, au GPS, les extrémités des

éléments des banquettes, les affaissements et les ruptures des talus. L'utilisation de la carte topographique sur laquelle sont reportés les éléments de banquettes permet de déterminer les indicateurs de pente du terrain et de conformité aux courbes de niveau ainsi que la surface de l'*impluvium* de chaque élément de banquette. Pour établir la carte lithologique du bassin versant, nous avons combiné l'utilisation de la carte géologique, la réalisation de levés lithologiques de terrain et l'interprétation des photographies aériennes. L'interprétation des observations hydrologiques et bathymétriques nous a permis de suivre l'évolution des apports liquides et solides au lac collinaire avant et après aménagement.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Sur le bassin versant d'El Gouazine, nous avons remarqué sur le terrain qu'en absence de réhabilitation et d'entretien, les aménagements en banquettes mécaniques peuvent être endommagés par des ruptures sous forme de brèches sous l'action des eaux de ruissellement par débordement ou par dissolution du gypse dans les talus et la création de renards. L'apparition d'une brèche au niveau d'une banquette peut rapidement provoquer l'apparition d'une autre brèche au niveau de la banquette qui lui succède en aval. La succession de ces ruptures accentue la concentration des eaux de ruissellement au niveau de ces nouveaux axes d'écoulement qui se transforment alors rapidement en ravines. Cette érosion ravinante peut entraîner à son tour l'accroissement de la dégradation des terres agricoles et l'envasement des retenues collinaires.

Les travaux de terrain (juillet 2005) ont permis d'identifier 109 brèches sur les 439 banquettes réalisées sur le bassin versant. Le volume moyen de ces brèches est de 6,5 m^3.

Le croisement de la carte de dysfonctionnement des aménagements en banquettes avec la carte des pentes a montré que 96 % des aménagements en banquettes sont implémentées sur une pente comprise entre 5 % et 35 %. On peut donc considérer que sur le bassin versant d'El Gouazine, la pente ne constitue pas une cause de dysfonctionnement des banquettes.

En supposant que la capacité de stockage théorique de chaque banquette est de 2,03 m^3 par mètre linéaire, que la pluie décennale est égale à 80 mm, avec un coefficient de ruissellement moyen égal à 0,3, nous avons calculé, pour chaque élément de banquette, le rapport entre le volume ruisselé de fréquence décennale et la capacité théorique de stockage de chaque élément. Pour 65 % des banquettes, ce rapport est très inférieur à 1, montrant que leurs *impluviums* sont nettement sous-dimensionnés. Pour 24 % des banquettes, ce rapport est voisin de 1, montrant que les *impluviums* sont correctement dimensionnés. Pour 10 % des banquettes, les volumes décennaux ruisselés dépassent nettement les capacités de stockages, provoquant alors un risque de rupture.

Le croisement de la carte des dysfonctionnements des aménagements en banquettes avec la carte lithologique nous a permis de compter 22 brèches sur les 16 banquettes installées sur la formation lithologique à dominance argilo-gypseuse à intercalations marno-grèseuses et silteuses. On a localisé 11 brèches sur 40 banquettes installées sur la formation à dominance silto-marneuse et intercalations

argileuses. De même, on a pu identifier 64 brèches sur 359 banquettes implantées sur une formation lithologique à dominance marno-calcaire avec intercalations gypseuses. Les 12 brèches restantes affectent les 24 banquettes implantées sur les formations lithologiques dures de type conglomératique ou calcaires, qui occupent les sommets et qui dessinent les limites du bassin versant. La formation argilo-gypseuse semble donc poser de sérieux problèmes de stabilité des banquettes. Il semble également que les banquettes soient sujettes aux ruptures sur les formations conglomératiques et calcaires des sommets de versant.

Le croisement de la carte des dysfonctionnements des aménagements en banquettes avec celle du réseau hydrographique a montré que 33 % des brèches sont localisées sur d'anciens cours d'eau, 47 % des brèches au milieu des éléments de banquettes et 20 % sur leurs extrémités.

La comparaison des apports en eau au lac collinaire d'El Gouazine avant et après aménagement montre qu'à l'échelle annuelle la rétention du bassin versant a augmenté de 140 mm, réduisant les apports de 21 % pour une pluie annuelle de 600 mm à 52 % pour une pluie annuelle de 300 mm. De même, le taux spécifique de l'envasement du lac, d'après Nasri *et al.* (2004) est passé de 1,55 (1996) à 1,1 m^3/ ha/an (1998). Toutefois, à partir d'octobre 2000, les apports d'eaux et de sédiments dans le lac ont à nouveau augmenté. Les coefficients de ruissellement ont atteint la valeur de 33 % en 2003 et le taux d'envasement a été évalué à 1,46 m3/ha/an en juin 2005.

CONCLUSION

L'utilisation des images aérospatiales et des cartes thématiques (lithologie, pente, hydrographie, occupation du sol) associée à l'analyse du dysfonctionnement des aménagements antiérosifs (rupture des talus ou des extrémités, affaissements) permet d'aboutir à l'analyse des principales causes de ces dysfonctionnements. Sur le bassin versant d'El Gouazine, nous avons pu montrer qu'il existe quatre causes principales à ces dysfonctionnements : l'existence d'argiles gypseuses, le surdimensionnement des *impluviums*, l'inclinaison du canal amont vers une des extrémités de la banquette et le réseau hydrographique.
Les résultats de cette étude doivent servir à améliorer les plans d'aménagement en banquettes des bassins versants dans les zones semi-arides, éventuellement à réhabiliter les aménagements existants, dans le but d'améliorer l'efficience des banquettes, tout en conservant une alimentation hydrique satisfaisante des lacs collinaires et une protection de ces lacs contre l'envasement.

Références bibliographiques

NASRI S., LAMACHERE J.-M., ALBERGEL J. 2004. Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17, 2 : 265-289.

CES, 1999. *Stratégie nationale de conservation des eaux et du sol*. Ministère de l'Agriculture, D/CES Tunis, 28 pp.

HEUSCH B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan .*Cah. ORSTOM Pédologie*, 22, 2 : 153-165.

FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE D'UN AMÉNAGEMENT DE BANQUETTES ANTIÉROSIVES EN COURBES DE NIVEAU EN ZONE SEMI-ARIDE (EL GOUZINE, TUNISIE CENTRALE)

Y. AL ALI*, S. NASRI, P. ZANTE*, J. TOUMA* et J. ALBERGEL***

** IRD, UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France, Jean.Albergel@ird.fr*

*** INRGREF, B.P. Ariana, 2080 Tunisie*

Abstract

This study is concerned with monitoring the water and sediment balances at the scale of a hill slope managed with contour ridges. The aim is to establish a database to understand the processes involved and arrive at a hydrological model at the hill slope scale.

Contour ridges are earthen ridges, 1 to 1.5 m high, with an upslope furrow which accommodates runoff from a catchment strip between the ridges. These hydraulic works are used to control water erosion and to intercept rain water on agricultural and wastelands. The functions of contour ridges is to decrease the length of hillside slope thereby reducing sheet and rill erosion, preventing the formation of gullies and increasing water infiltration in the soil by retaining runoff and provide a built in safety factor for rains of high intensity.

Keywords : *Central Tunisia* ; *Contour ridges* ; *Hydrological Modelling*.

INTRODUCTION

L'érosion des terres cultivées dans les zones méditerranéennes semi-arides d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient est exacerbée par l'agressivité du climat, le manque du couvert végétal, la pression démographique et mise en culture ancienne des sols, entre autres (Roose, 1994). Pour limiter les pertes de leur capital sol et protéger leurs ressources en eau, les pays de cette région ont testé plusieurs techniques antiérosives, parmi lesquelles des lacs et barrages collinaires, des rectifications de ravins, des banquettes antiérosives. Cette dernière a été largement appliquée en Tunisie — environ 1 M ha (Nasri, 2002) —. Ces banquettes sont des levées de terre suivant les courbes de niveau, qui réduisent la longueur du ruissellement et contribuent à améliorer l'infiltration et à limiter l'érosion. Les techniques de construction et entretien de ces ouvrages sont bien documentées. À l'échelle du bassin versant élémentaire, quelques travaux ont montré que lorsque les surfaces traitées occupent 40 % des versants, il y a une

nette diminution des débits liquides et solides à l'exutoire (Nasri *et al.*, 2004). Cependant, très peu de travaux sont disponibles à l'échelle de l'aménagement lui-même et, notamment, son fonctionnement hydrologique et son impact sur le bilan en eau et en matières transportées.

Ce travail décrit un dispositif mis en place pour étudier le fonctionnement de cet aménagement : la banquette avec son fossé et l'espace inter-banquettes. Nous présentons les résultats acquis après une année d'observations. L'efficacité de l'aménagement est jugée par comparaison des bilans hydro-sédimentaires sur une jachère et un sol travaillé.

1. MÉTHODES ET MATÉRIEL

Le site expérimental se trouve dans le petit bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (18.1 km²), dans le gouvernorat de Kairouan, au centre de la Tunisie. Les pluies annuelles sont très irrégulières et très variables, autour d'une moyenne de 390 mm. Les averses sont caractérisées par de fortes intensités dépassant souvent 100 mm/h en 5 minutes.

Dans la partie aval du bassin, où se trouve le site d'étude, les sols sont alluviaux profonds sablo-argileux.. En 1996 et 1997, 40 % de la surface du bassin a été aménagé en banquettes mécaniques, ce qui représente la plus grande partie cultivée du bassin. La figure 1 montre le schéma type d'une banquette mécanique.

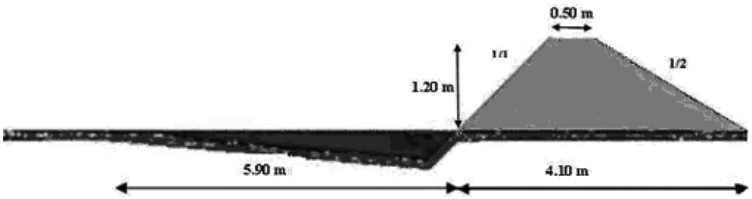


Fig. 1. Schéma de section de la banquette

Deux parcelles contiguës d'environ 2 900 m² chacune, aux caractéristiques morpho-pédologiques similaires, ont été délimitées dans le site : la première dans une terre laissée en jachère depuis une dizaine d'années et l'autre dans un champ cultivé et donc au sol travaillé. Elles sont limitées en amont et en aval par les mêmes talus. Le canal de chaque parcelle est équipé d'une station hydrométrique et d'un déversoir en V pour un éventuel débordement. Un pluviographe est installé entre les deux parcelles. Par ailleurs, l'évaporation est mesurée dans un bac type ORSTOM, installé sur le lac, à l'exutoire du bassin.

Les bilans en eau et sédiments sont suivis dans le canal de chaque parcelle. Une topographie fine (0,5 x 1 m²) est effectuée avant la saison de pluie. Elle est remise à jour après chaque événement pluvieux qui a apporté un dépôt sédimentaire. Elle permet de calculer à la fois les volumes d'eau et de sédiments.

Pour calculer les volumes d'eau, la topographie est combinée à l'enregistrement de la cote du plan d'eau en amont de la banquette. La cinétique du ruissellement sur l'espace inter-banquettes est ainsi reconstituée à partir de celle du volume, moyennant l'hypothèse d'un processus hortonien de ruissellement, hypothèse justifiée par la grande profondeur de la nappe sur le site (Albergel *et al.*, 2003). Le débit de ruissellement de l'espace inter-banquette est alors calculé sur le pas de temps de la mesure de la hauteur d'eau, en appliquant la loi de conservation de la masse appliquée aux volumes d'eau (Albergel et Rejeb, 1997) et en négligeant les volumes infiltrés et évaporés dans le canal ainsi que le volume ruisselé sur le talus amont de la banquette au cours de l'évènement. Quant aux sédiments stockés dans le canal, la comparaison des modèles numériques de terrain (MNT) issus des topographies du canal avant et après l'évènement permet de repérer les zones de pertes en sol (abrasion du fossé) ou dépôts de terre (sédimentation de terres érodées). L'érosion est alors estimée à partir du bilan entre volumes perdus et gagnés et de la densité apparente des dépôts.

2. RÉSULTATS

2.1. Les bilans en eau

Au cours de l'année d'observation, onze événements de ruissellement ont été enregistrés sur la parcelle en jachère, alors que dans la parcelle labourée, seuls quatre événements ont occasionné un ruissellement. Ceci met en évidence la différence significative de la cinétique du ruissellement sur les deux modalités. En effet, alors que le coefficient de ruissellement annuel sur la modalité jachère est de 31 %, il ne dépasse pas 9 % sur le labour. Cependant, ramenés aux évènements ruisselants, ces coefficients sont de 60 % et 40 % respectivement comme le montre la figure 2.

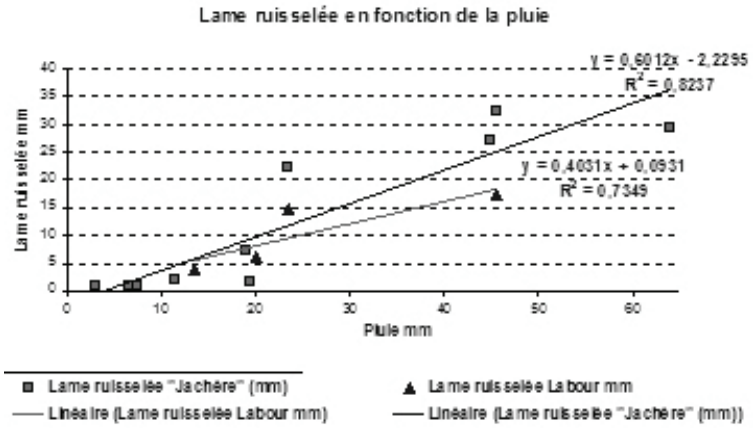


Fig. 2. Comparaison entre ruissellements sur les modalités « jachère » et « labour »

Ces résultats doivent toutefois être relativisés en raison du faible nombre de points, surtout en ce qui concerne la parcelle labourée. Le débit d'infiltration journalière estimé dans chaque modalité après déduction de l'évaporation a montré une capacité d'infiltration beaucoup plus forte sur le canal de la modalité labourée, dont l'entretien n'est pourtant pas différent de la modalité jachère. Ceci est probablement dû à une activité de la mésofaune du sol beaucoup plus importante dans le talus et dans le canal de cette modalité, liée à la culture sur l'inter-banquette.

2.2. Les bilans en sédiments

Les bilans annuels sont obtenus en calculant les volumes entre les MNT de juillet 2004 et juillet 2005, en limitant le calcul à la surface du canal où s'accumulent les sédiments (fig. 3).

Le tableau 1 récapitule les bilans sédimentaires massiques pour la première année d'observation dans les deux parcelles. Ces bilans font apparaître un dépôt de 6 m^3 dans le canal de la modalité « jachère » et de 4 m^3 dans celui de la modalité labourée. Ce qui correspond à une érosion spécifique de 24 t/ha et de 15 t/ha. L'érosion rapportée au millimètre de pluie est pratiquement deux fois plus importante sur la modalité jachère, alors que c'est l'inverse qui se produit lorsqu'elle est rapportée au mm de ruissellement. Ce résultat montre l'ambivalence des facteurs de l'érosion. En effet, bien que le labour fragilise les sols, il limite l'érosion en favorisant l'infiltration.

Tab. 1. Bilans hydro-sédimentaires annuels dans les deux parcelles

Modalité	Pluie cumulée (mm)	Lame totale ruisselée (mm)	Érosion spécifique 2004 -2005 (t/ha/an)	Erosion /ha / mm de pluie, (kg/mm/ha/an)	Erosion /ha / mm de ruissellement, (kg/mm/ha/an)
Jachère	463,8	143,7	24	51,6	167,1
Labourée		42,7	15	32,3	351,2

Les volumes de dépôts obtenus entre MNT successifs sont relativement faibles en valeur absolue et, parfois, négatifs, ce qui laisserait penser à une érosion dans le canal. N'ayant pas observé de débordement, il est légitime de penser que la précision de la méthode de mesure ne permet pas l'évaluation de l'apport entre deux crues. L'incertitude sur le nivellement calculée selon Collinet et Zante (2005) est de l'ordre de 0,01 m pour un intervalle de confiance 95 %, qui se traduit par une incertitude sur les volumes de 4,5 m^3 et 3,5 m^3, respectivement pour les modalités « jachère » et « labour ». Cette précision montre que la méthode par nivellement du fossé est justifiée pour mesurer des dépôts conséquents, mais son application entre les averses est sujette à caution. Elle s'applique soit à l'échelle annuelle pour les années de bonne hydraulicité, soit à l'échelle pluriannuelle.

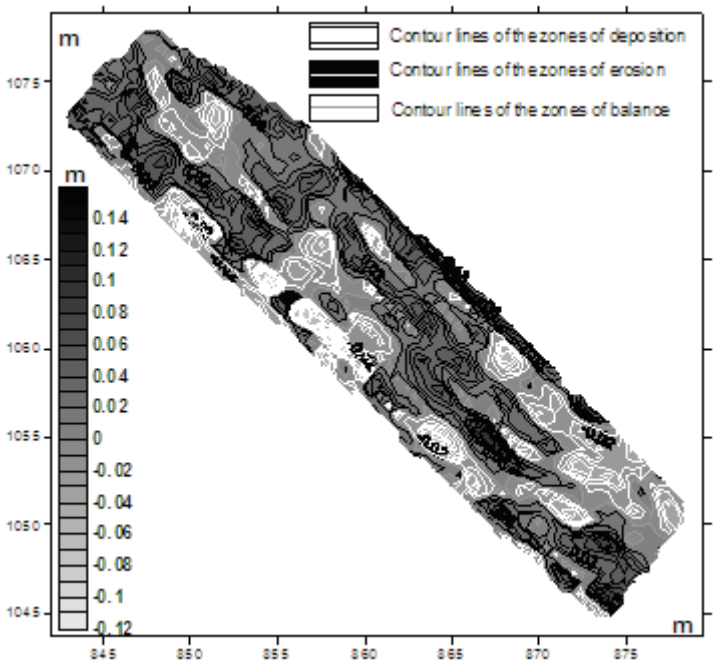


Fig. 3. Carte érosive du canal de la parcelle labourée entre juillet 2004 et juillet 2005

CONCLUSION

Le dispositif expérimental présenté dans cette communication a permis d'évaluer les bilans hydro-sédimentaires dans un espace inter-banquettes sur deux modalités du système de culture des versants méditerranéens semi-arides. Il a mis en évidence l'importance du mode d'occupation du sol sur les processus de ruissellement et d'érosion et permis de quantifier l'effet de la banquette à l'échelle de la parcelle. Lorsque les transferts d'eau et de sédiments restent limités aux espaces inter-banquettes, l'étude est facilement transposable. Pour cela, il faut concevoir une modélisation capable de simuler les flux de ruissellement et d'érosion en fonction des données pluviométriques et des caractéristiques du versant. Dans cette optique, des expérimentations en cours de traitement permettront l'élaboration d'un tel modèle, qui pourra être calibré et validé à partir des données présentées et analysées dans cet article.

Références bibliographiques

ALBERGEL J., MOUSSA, R., CHAHINIAN N., 2003. Les processus hortoniens et leur importance dans la genèse et le développement des crues en zones semi-arides. *Houille Blanche,* 6 : 65-73.

ALBERGEL J., REJEB N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *CR. Acad. Agric. Fr.* Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104., pp. 77-88.

COLLINET J., ZANTE P., 2005. Analyse du ravinement de bassins versants à retenues collinaires sur sols à fortes dynamiques structurales (Tunisie). *Géomorphologie : relief, processus, environnement,* n° 1 : 61-74.

NASRI S., 2002. Hydrological effects of water harvesting techniques. A study of tabias, soil contour ridges and hill reservoirs in Tunisia, Lund Sweden, 76 + 5 articles an.

NASRI S., J-M. LAMACHÈRE AND ALBERGEL J., 2004. Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17/2 : 265-289.

PNUE-PLAN BLEU, 2003. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens Etude Bibliographique, *Les Cahiers du Plan Bleu* 2. Sophia Antipolis : 80.

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

Remerciements

Les auteurs voudraient remercier le soutien financier du programme européen *Aquastress* qui a permis la réalisation cette étude.

IMPACT DE L'AMÉNAGEMENT DES TERRES DE CULTURE PAR LES CUVETTES INDIVIDUELLES SUR L'HUMIDITÉ ET LA FERTILITÉ DU SOL (TUNISIE DU CENTRE)

Mohamed BERGAOUI*, Jalel EL FALEH et Ali HENDAOUI*****

** IRESA, 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis, bergaoui.med@iresa.agrinet.tn*
*** SIPAM, 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis, Jalel.Elfaleh@fao.org*
**** Route du Kef, ESIER Medjez el-Babb*

Abstract

To mobilize runoff water, several techniques of water and soil conservation were used in Central Tunisia. The main objective of the present study is to appreciate the effects of the "individual basins" on water storage in the soil, soil fertility and fruit production. Data collected are: characterization of every exploitation (types of culture, yield for each crops, come back of the exploitation), some soil parameters (soil moisture, permeability, fertility).

The results showed that the individual "basins" are an excellent way for water retention where olive trees are planted. It increased about 50% the rate of soil moisture, mobilized an important water storage (150 mm) on a profile of 90 cm, improved the water balance and increased the soil organic matter of 20% and the assimilation of soil phosphorus and potassium.

Keywords : *Central Tunisia* ; *micro watersheds* ; *Impact On Soil Moisture and Soil Fertility*.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique représente la forme la plus répandue de dégradation des terres en Tunisie. Annuellement, des dégâts importants sont enregistrés au niveau des parcelles de cultures, ce qui entraîne une diminution de la productivité et de la fertilité de ces sols. Suite à ce fait, la Tunisie a consenti de grands efforts pour mettre en place des programmes d'aménagements antiérosifs visant la maîtrise des eaux de ruissellement, le contrôle de l'érosion hydrique et la conservation des terres. Parmi les techniques antiérosives utilisées sur les terrains en pente, on trouve les cuvettes individuelles (fig. 1), qui sont des techniques traditionnelles de collecte des eaux de ruissellement et de rétention des particules solides arrachées par l'érosion hydrique. Elles sont construites autour des plantations arboricoles, essentiellement l'olivier. Elles sont confectionnées autour du pied de l'arbre sous forme d'un demi-cercle, de diamètre correspondant à la largeur de la canopée de

l'arbre, concave vers l'amont, convexe vers l'aval, bordées d'une levée de terre ou de pierres, de faible hauteur (30 à 50 cm). Cet aménagement permet d'intercepter les eaux de ruissellement des petits *impluviums* se trouvant à l'amont de l'ouvrage et de favoriser leur infiltration et utilisation par l'arbre. Généralement, les cuvettes sont de trois types : bourrelets en pierres sèches, bourrelets en terre et bourrelets mixtes. À côté de ce type d'aménagement individuel en cuvette, il existe le système hydrologique appelé *meskat* (Jaton 1984). Il est basé sur l'aménagement des petits bassins versants en cuvette + *impluvium*. C'est un aménagement intégré.

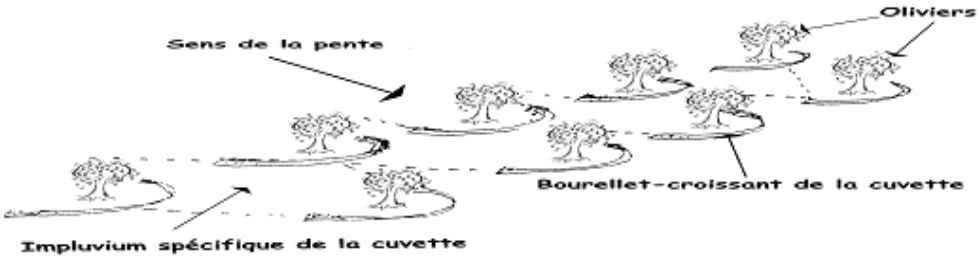


Fig. 1. Cuvette individuelle avec *impluvium*

Le présent travail consiste à évaluer l'impact des cuvettes individuelles sur l'humidité et la fertilité du sol en se basant sur les premières campagnes de mesures. Uniquement les premiers résultats d'analyse et de traitement sont présentés dans cette communication.

1. MÉTHODE

Le principe de l'étude est basé sur la comparaison entre l'état du sol à l'intérieur et à l'extérieur de la cuvette. La mesure de l'humidité du sol à différentes profondeurs est faite par la méthode TDR (la réflectométrie en domaine temporel). Il s'agit de mesurer la conductivité électrique ou la constante diélectrique dans le sol. L'analyse granulométrique et physico-chimique des échantillons prélevés se fait au laboratoire. On fait un seul prélèvement au centre de la cuvette et un prélèvement au milieu de l'*impluvium*. Ainsi, un protocole expérimental a été mis en place sur des parcelles agricoles dans la région de Haffouz, gouvernorat de Kairouan, au centre de la Tunisie, pour suivre et apprécier les effets agro-pédologiques des cuvettes individuelles.

La région de l'étude appartient au climat semi-aride. Elle est caractérisée par un relief accidenté, des pluies orageuses et un déficit hydrique important.

La méthode retenue pour l'étude expérimentale de l'impact des cuvettes individuelles sur l'humidité et la fertilité du sol du sol consiste à :

- choisir des sites expérimentaux, parcelles à différentes pentes aménagées en cuvettes ;

- choisir dans chaque parcelle des cuvettes de différentes dimensions et *impluviums* ;
- faire les mesures nécessaires pour chaque cuvette, à l'intérieur et à l'extérieur : mesure de l'humidité par TDR et prélèvements des échantillons (au centre de la cuvette et au milieu de l'*impluvium*) au niveau de la couche superficielle, pour analyser les éléments nutritifs.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Variation de l'humidité en fonction de la profondeur

Après la mesure de l'humidité du sol à différentes profondeurs, les résultats obtenus pour la cuvette n° 1 se présentent comme indiqué dans la figure ci-après.

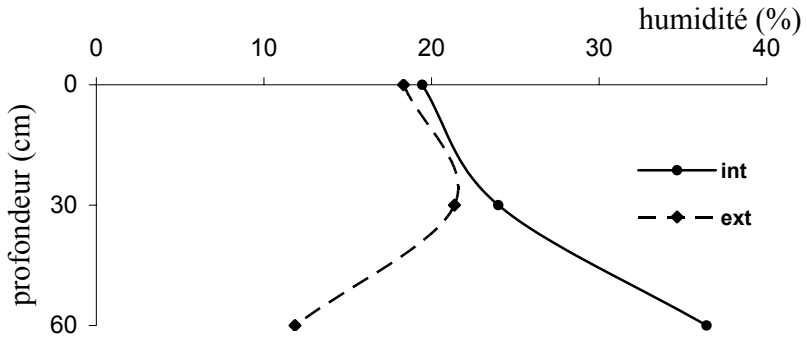


Fig. 2. Variation de l'humidité en fonction de la profondeur (cuvette n°1)

La figure montre que pour les mêmes conditions pluviométriques, le taux d'humidité des sols est plus élevé à l'intérieur des cuvettes et à différentes profondeurs qu'à l'extérieur de celles-ci.

2.2. Impact des cuvettes sur l'humidité du sol

D'après la figure 3, on remarque que l'humidité superficielle est largement plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur dans la majorité des cuvettes. L'écart le plus élevé est observé à la cuvette n° 5 : il atteint 20 %.

Les cuvettes n° 4, 8 et 9 montrent une différence d'humidité très faible. La cuvette n° 4 se trouve dans la région de Rouaissia, qui se caractérise par des sols sableux profonds avec existence de quelques poches d'argile. Les cuvettes n° 8 et 9 se trouvent dans la zone de Hamzet. Cette zone est caractérisée par un sol peu profond (maximum 50 cm) avec affleurement calcaire à la surface.

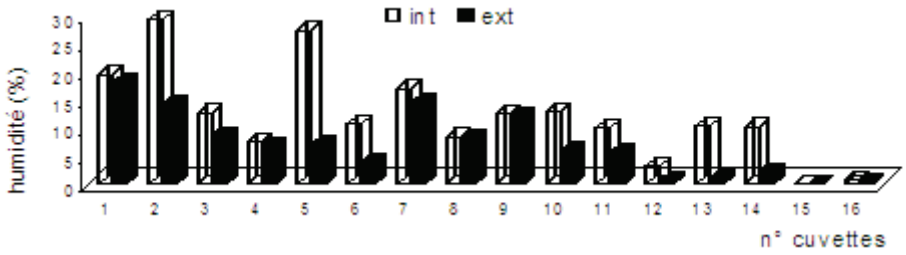


Fig. 3. Différence d'humidité superficielle par cuvette

Pour planter l'olivier, les exploitants de la zone ont tendance à choisir les terres sableuses et, par conséquent, les couloirs d'argiles restent à l'extérieur de la cuvette. De même, les mesures faites à une profondeur de 30 cm (profil 30 cm-60 cm) ont montré qu'il y a une différence d'humidité, d'après le protocole de mesure retenu, pouvant atteindre 20 %. À l'extérieur de la cuvette, l'humidité diminue rapidement en allant en profondeur. À l'intérieur des cuvettes, cette variation est lente.

2.3. Impact sur le stock en eau

Le calcul du stock d'eau se fait à l'aide des mesures de l'humidité volumique (m^3/m^3) au niveau de la surface comprise entre deux profils hydriques successifs. La quantification du stock d'eau repose sur l'application de la loi de continuité. Le produit de la hauteur de la tranche du sol par l'humidité volumique correspondante nous donne le stock en eau. Pour la cuvette n° 2 et suite à cette technique de mobilisation et de conservation des eaux et des sols, le stock d'eau est d'environ 346 mm. Par contre, il est seulement de196 mm en dehors de l'aménagement. Ce qui donne une augmentation du stock de 150 mm.

Ainsi, nous pouvons conclure que la cuvette permet de mobiliser un stock d'eau supplémentaire important. Ces quantités d'eau mobilisées peuvent servir à l'amélioration du bilan hydrique des oliviers. Le volume d'eau supplémentaire dépend certainement du rapport entre la surface de l'*impluvium* et celle de la cuvette. Pour la zone de l'étude qui reçoit en moyenne 300 mm de pluie par an, les apports en eau dans les cuvettes ont été de l'ordre de 600 l/an/m². Il est à signaler que la surface moyenne des cuvettes est de l'ordre de 10 m², alors que celle de l'impluvium est en moyenne de 50 m².

2.4. Impact des cuvettes sur la fertilité du sol

L'impact sur la fertilité est étudié par la mesure du pourcentage de la matière organique dans le sol ainsi que le phosphore et le potassium. Au niveau de la couche superficielle, on gratte un peu le sol et on fait le prélèvement, à peu près à 5 cm de profondeur. Autrement, on creuse un trou dans lequel les échantillons sont prélevés à chaque profondeur.

Suite à l'analyse de l'évolution des matières organiques, par cuvette, nous avons constaté qu'il existe une grande variation des teneurs en matière organique entre les parcelles traitées et celles non traitées. La cuvette peut retenir les argiles et les déchets des animaux transportés par les eaux de ruissellement, ce qui augmente, par conséquent, le taux de matière organique du sol. Les cuvettes peuvent augmenter le taux de matière organique de l'ordre de 20 %. La majorité des cuvettes étudiées (67 %) ont un effet positif sur la quantité de matière organique du sol. La différence de teneur en carbone du sol entre les terres aménagées et celles non aménagées est expliquée par la mobilisation des eaux de ruissellement, riches généralement en matière organique. Ces matériaux ont été arrachés sous l'effet *splash* et de l'érosion hydrique. Suivant la capacité du transport par les eaux du ruissellement, les particules fines se déposent à l'intérieur des cuvettes, suite au ralentissement du ruissellement par les cuvettes. Le taux de rétention, supplémentaire, en matière organique est de l'ordre 20 %. À l'intérieur de la cuvette et au niveau de la couche superficielle, nous avons remarqué une augmentation des éléments nutritifs (phosphore et potassium).

Cependant, l'étude du ruissellement et de l'érosion hydrique à l'échelle des surfaces restreintes aménagées en impluvium-cuvette peut apporter des éléments de réponse à l'impact de ces aménagements à l'égard d'un événement pluvieux. Pour Jaton (1984), le transport solide est de l'ordre de 30 t/km²/an pour des terrains aménagés en cuvette. Sur des terrains sans aménagement, le transport solide est beaucoup plus important, mais les dépôts moins importants (500 t/km²/an). Le coût d'aménagement des versants en cuvette est de l'ordre de 300 $ par hectare. Quant au rendement potentiel d'un olivier se trouvant dans le système cuvette- impluvium, il est de 30 kg par arbre et par an, (Hiralal *et al*., 1988). Sans cuvette, le rendement moyen est de 10 kg à 15 kg par olivier et par an. Ce rendement varie d'une année à l'autre et dépend de plusieurs paramètres : les conditions climatiques, l'âge et les variétés des oliviers, les conditions phytosanitaires, etc.

CONCLUSIONS

La cuvette individuelle est un excellent moyen de rétention des eaux de ruissellement. Elle peut augmenter le taux d'humidité dans le sol d'environ 5 % et gagner un stock d'eau d'environ 150 mm par an. En terme de fertilité des sols, la cuvette permet d'augmenter la quantité de la matière organique dans le sol ainsi que la quantité des éléments nutritifs de la couche arable, notamment le phosphore assimilable et le potassium avec un taux moyen de 20 %. Les résultats obtenus par l'analyse granulométrique montrent que la mobilisation des eaux de ruissellement par les ados des cuvettes contribue à une maintenance d'une grande quantité des éléments fins perdus sur l'*impluvium* par l'érosion hydrique. Ainsi, la cuvette individuelle peut être un moyen pour la protection des ouvrages hydrauliques situés en aval. Les quantités d'eau stockées peuvent servir à l'amélioration du bilan hydrique et, par conséquent, l'augmentation, parfois de 100 %, de la production agricole de l'olivier. Dans les zones semi-arides et arides, ces ouvrages de mobilisation et de conservation des eaux et des sols peuvent être considérés comme un moyen efficace. Ils permettent, à l'échelle de l'événement pluvieux, de stocker un volume d'eau supplémentaire pour l'olivier. Cette approche

devrait faire l'objet d'autres études afin d'identifier les indicateurs de performances et de réussites de tels ouvrages. Dans le but d'une meilleure gestion de ces ouvrages et tenant compte de la relation optimale décrivant le rapport entre la surface réceptrice l'« *impluvium* » et la cuvette, il faudrait déterminer la densité et la typologie de cuvettes par hectare.

Références bibliographiques

JATON J.F, CHAABOUNI M., 1984. *Étude du système hydrologique Meskat d'utilisation des eaux de ruissellement du Sahel Nord de Sousse. Tunisie.* Rapport de synthèse, IGR n° 179, 104 pp.

BERGAOUI M. *et al.*, 1992. Étude du ruissellement et de l'érosion du système Meskat. *Revue de l'INAT*, 7, 1 : 1- 9.

HIRALAL R.A., DE VRIES C. J., 1988. Étude sur quelques aspects socio-économiques et physiques du système Meskat. Département de l'Irrigation et du génie Civil. Université Agronomique de Wageningen, 69 pp.

HENDAOUI ALI, 2003. *Impact des cuvettes individuelles sur l'humidité et la fertilité des sols*. Projet de fin d'étude, ESIER Medjez el-bab, 73 pp.

TRADITIONAL AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT IN TUNISIA : CONTRIBUTIONS TO ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

Jennifer HILL* et Wendy WOODLAND
University of the West of England, Bristol, UK
** jennifer.hill@uwe.ac.uk*

Résumé

Des aménagements traditionnels en zone semi-aride de Tunisie ont transformé des paysages sujets à des inondations, des pentes instables et des sols érodables en des environnements pleins de ressources. Ces transformations ont été atteintes grâce à des interventions bien adaptées à l'échelle locale. Les grands barrages modernes, par contre, sont des structures rigides bien plus sensibles aux précipitations extrêmes et à l'envasement rapide. Les auteurs suggèrent que la combinaison des deux pourrait apporter une bonne base pour optimiser la gestion des eaux.

Mots clés : Tunisie ; aménagements traditionnels ; grands barrages ; durabilité

INTRODUCTION

Tunisia contains three different climate zones: Mediterranean, semi-arid and arid, which experience differing water availability. Due largely to these differences in potential water resources, there exist a number of distinctive methods of water management for agriculture. The Northern Mediterranean region is dominated by modern reservoir-fed irrigation. In the semi-arid central part of the country, modern dams have been constructed in the north of the zone, but rainwater harvesting and terraced wadi systems predominate towards the south. In the arid south, communities largely practice traditional rainwater harvesting within small hillside catchments. This paper compares two contrasting agricultural water management techniques to examine their environmental sustainability: traditional small-scale rainwater harvesting and modern large-scale dam irrigation.

1. CONTRASTING WATER MANAGEMENT TECHNIQUES AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

The Matmata Plateau, in the south of the Tunisia, exemplifies small-scale rainwater harvesting and the Zeroud Basin in the central steppe highlights modern, large-scale dam irrigation. The Matmata Plateau falls within the arid zone, and

experiences a negative annual water budget of 200 to 300 mm. Valleys to the west of the Plateau are covered by loess deposits which easily form a surface crust, facilitating overland flow in catchments. The natural vegÉtation of alfa grass affords little protection to the soils during high intensity rains. Central Tunisia can be divided into two geographical regions. To the west, the mountains of the Dorsale give way to the Plain of Kairouan in the east. The plain is covered in alluvial deposits and the region experiences a negative annual water balance of between 300 and 400 mm. With a lack of plant cover and steep gradients in the highlands, runoff is collected rapidly by wadis that descend from the Dorsale.

1.1. Traditional rainwater harvesting

Macrocatchment rainwater harvesting has a long history in the Matmata Plateau, where climate, topography and soils together make the technique very effective. The majority of rain falls as high intensity-low frequency downpours. Overland flow is generated rapidly and it travels quickly over the steep slopes, supplying water and soil to valley bottoms. Earthen check dams (tabias) are sited progressively downslope to trap eroded material from the valley sides and this material is levelled to form agricultural fields (jessour). Water that is trapped behind tabias after rain events infiltrates into the soil where it creates a temporary phreatic water supply. On the western outskirts of Matmata, a ratio of 6:1 translates into field sizes approximating 0,6 ha and catchment sizes of around 4 ha (Hill & Woodland 2003).

Vernacular knowledge and craftsmanship, derived from centuries of interaction with the local environment, has been used to construct tabias and equip them with overflows. These promote effective water distribution and allow some flexibility against climatic extremes. Lateral overflows are employed in 60% of tabias in the Matmata Hills (Bonvallot, 1979). These are purpose-made breaches in the earthen bunds at valley sides, which permit excess water to flow by gravity onto the terrace below, ensuring irrigation water with minimal erosive capability. Erosion of the overflows themselves is often reduced by strengthening their floors and sides with stones. The engineering of tabias, particularly the height of the overflow threshold, ensures that fields downslope are not deprived of water by higher fields, leading to crop failure. Equally, the height of the threshold prevents the build up of too much water after storms such that the root zone remains waterlogged for long periods.

Small-scale hydraulic works prove sustainable in the face of extreme events. An example is their response to exceptional rains in March 1979. Between the 3rd and the 6th of March, many parts of the Matmata Plateau received rainfall approaching their average annual total. The average annual rainfall of Matmata, for example, is 222 mm, yet the area received 120 mm in one day. These high intensity rains engendered catastrophic floods. The delegations of Tataouine and Beni Kheddache suffered the collapse of 70% to 80% of their agricultural bunds, whereas Matmata suffered damage of less than 10% (Bonvallot 1979). Significantly, community work using local materials allowed a rapid response to the altered environment. These landscapes can be reworked effectively and they are thereby sustainable environmentally over long time frames and across climatic extremes.

1.2. Modern dam irrigation

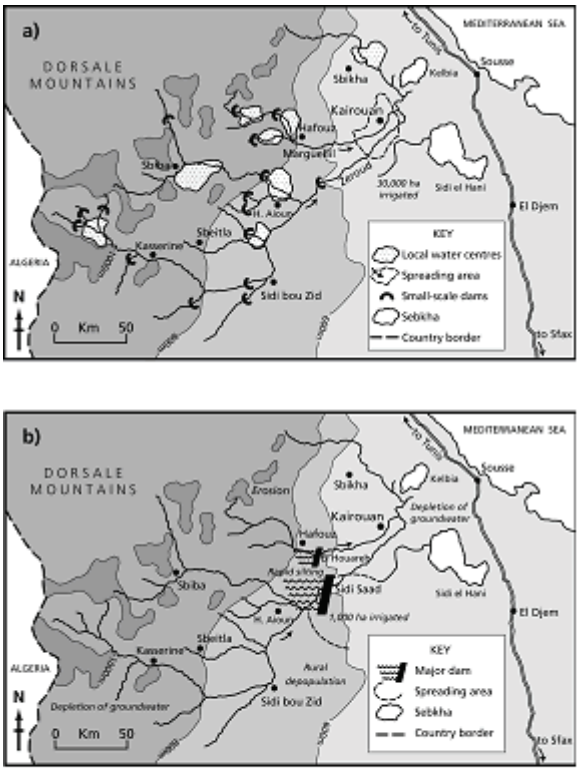


Fig. 1. The Zeroud Basin, Central Tunisia (after El Amami 1986):
a) decentralized (above)
b) centralized water management (below)

The Kairouan Programme, initiated in 1975, centred on the construction of two large dams in the neighbouring Zeroud and Marguellil Basins. The aims were to reduce flooding in the Kairouan Plain, to develop irrigated areas downstream of the dams and to supply Kairouan with an improved water supply (Guillaud & Trabelsi 1991). The Sidi Saad Dam, in the Zeroud Basin, came into service in 1982. By 1986, the dam was supplying water, via a system of gravity flow pipes, to irrigated perimeters up to 15 km away (*ibid.*). This led to a substantial rise in the acreage of olive and almond trees in the low steppe, and to an extension of market gardening using poly-tunnels for early winter fruit and vegetables.

Water flow in the Zeroud and Marguellil Basins had been regulated for centuries by means of a network of small barrages and 30 local dams. Such decentralised management maintained a number of spreading areas, which irrigated 30,000 ha and replenished local water tables (fig. 1a). The cost of these small-scale works has been estimated at only TD 6 million, as they utilised local equipment and 40,000 local labourers (El Amami, 1986). This heritage could have been used to sustain decentralised water systems, but following the severe floods of 1969, which caused 150 deaths on the Kairouan Plain (Guillaud & Trabelsi, 1991), the decision was made to construct a single large dam at Sidi Saad (fig. 1b). Costing TD 60 million, the dam initially supplied an irrigated area of 4,000 ha which has subsequently decreased to 1,000 ha (El Amami, 1986). Although proving itself in terms of flood control during the heavy rains of 1990 (Guillaud & Trabelsi, 1991), it has produced an irrigated area just one thirtieth of the size of the original, at ten times the cost.

With an obvious economic disadvantage compared to small-scale hydraulic works, how do such large-scale developments compare in terms of long-term environmental sustainability? High intensity downpours falling on exposed friable soils in the centre of the country mean that large-scale developments are liable to

rapid, but spatially and temporally unpredictable, sediment input. Based on reservoir siltation rates measured between 1982 and 1993, the probable service duration of the Sidi Saad Dam has been calculated as 87 years (Zahar, 2001). This figure falls notably short of the generational history recorded by the dryland jessour systems. Additionally, the Sidi Saad Dam would face a drastic reduction of its predicted service duration if it were to experience rains of similar magnitude to those of autumn 1969. The discharge reached 17,050 cumecs on 27th September, an immense figure when compared with the annual average of just three cumecs. An estimated 275 million cubic metres of solids were mobilised, which is equivalent to 14 years sediment supply. These figures must be compared with a flood spillway capable of evacuating 7000 cumecs and a storage capacity of 209 million cubic metres (Zahar, 2001). If the dam had been constructed prior to the rains, it would have been unable to contain the flood peak and would have been filled completely with sediment. Storage loss to sedimentation will most likely mean that the Sidi Saad reservoir will have to be abandoned less than 100 years after construction (Zahar 2001); compare this with the continued use of depressions for rainwater harvesting in the south of the country which have been farmed for generations.

1.3. Reviewing sustainability

The efficiency of minor hydraulic works in Southern Tunisia is currently being maintained, but a crucial development has reduced sustainability in the north: the abandonment of community based indigenous knowledge, which demonstrated physical adaptability to a dynamic and often extreme environment. Such developments possess rigid physical structures that are not easily adapted to the vagaries of climate. Dam structures must be sufficient to withstand high magnitude events from the outset, but predicting the vagaries of this marginal environment, where inter-annual variability of precipitation is high is notoriously difficult. Modern large-scale developments have provided no more reliability over space and time than earlier small-scale works and they often result in less irrigated land per unit of water stored. Over long time frames modern developments are more susceptible to extreme events than community works. The only difference is that modern dam developments can provide short-term yield maximisation but this requires greater volumes of water, often leading to insidious environmental degradation.

2. THE FUTURE: COMBINING TRADITIONAL AND MODERN APPROACHES FOR AGRICULTURAL SUSTAINABILITY

The aim of the contrasting water management techniques described in this paper is to equilibrate spatio-temporal inequalities in water resources. There is a precarious equilibrium, however, dividing hydrological hazards and resources in Tunisia. Traditional management was able to physically partition the continuum between hazards and resources in favour of the latter through construction of jessour systems. Thus, a potentially hazardous environment of flash flooding, slope instability and soil erosion was transformed into a secure environment by resourceful management. It was achieved by subtle manipulation of the landscape at micro and local scales using trial and error practical experience that drew upon community memory. Collective community action and cumulative knowledge allowed high reliability farming. The environment was not perceived as risk-laden

and therefore “critical” but as reliable. The communities demonstrate a history of sustained production in difficult environments, and it is likely that such adaptability and flexibility will continue to sustain agriculture into the future, if it can survive the threats of modernisation via new settlements and the lure of employment in the service sector of major cities.

Across Tunisia, new waves of proactive water conservation measures are being implemented. Tunisia’s submission to the Rio +10 Conference, for example, cites the implementation of works aimed at water and soil conservation: treatment of slopes with water-retention systems, structures for spreading and mobilizing flood waters, “jessours”, etc. One such example is a soil and water conservation programme, centred in the Governorats of Kairouan, Siliana and Zaghouan, which began in 2000. The project exemplifies the balance that can be achieved between large-scale centralised development and small-scale decentralised management based on modernised indigenous technology and undertaken with local participation. The programme is managed jointly by the Directorate for Water and Soil Conservation of the Tunisian Ministry of Agriculture, the United Nations’ Food and Agriculture Organisation and the Italian Government. The programme has encouraged increased uptake of field-scale water harvesting methods and it has helped local farmers to create a network of small hillside dams to collect surface runoff. These second generation works have reduced siltation rates in the large dams and, through basal seepage into sand, replenished local aquifers. This encourages rural populations to remain settled as the groundwater reserves help reduce the risks of crop cultivation in an unpredictable environment.

The process of water development in the centre of the country appears to be coming full circle with a return to small-scale management to complement and sustain the large-scale hydraulic works. Such a dovetailing of different scales and technologies, integrated under a national planning structure, promotes a controlled but flexible approach to water management. This is crucial to long-term viability as it does not simply absorb indigenous expertise, but allows local voices to be heard in terms of hydrological and financial requirements. Indeed, a mix of modern and traditional methods, integrating international negotiation across territories and local participatory community management, seems to have been acknowledged as the practical foundation to sustainable water use in the new millennium.

References

BONVALLOT J., 1979. Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médenine (Tunisie du sud) au cours des pluies exceptionnelles de mars 1979. *Cahiers ORSTOM Série Sciences Humaines,* 16, 233-249.

EL AMAMI S. , 1986. Traditional versus modern irrigation methods in Tunisia. In GOLDSMITH E, HILDYARD N (eds.) *The Social and Environmental Effects of Large Dams.* Vol. 2, Wadebridge Ecological Centre, Cornwall, 184-188.

GUILLAUD C., TRABELSI M., 1991. Gestion des resources hydriques en Tunisie centrale: les projets Sidi Saad et El Haoureb. Hydrology for the Water Management of Large River Basins. Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991. *IAHS Publication,* 201, 129-138.

HILL J.L., WOODLAND W.A., 2003. Contrasting water management techniques in Tunisia: towards sustainable agricultural use. *Geographical Journal,* 169, 342-357.

ZAHAR Y., 2001. L'estimation probabiliste des durées de service futures des barrages en Tunisie. Essai de caractérisation et proposition d'une formule régionale. *Revue Internationalle de l'Eau,* 1, 71-80.

RÉFLEXIONS SUR LES STRATÉGIES TRADITIONNELLES DE GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU PRATIQUÉES EN ARDÈCHE DEPUIS LE XIXe SIÈCLE

Alain MOREL
Institut de géographie alpine, Université Joseph Fourier
14 bis avenue Marie Reynoard, 38100 Grenoble
Alain.Morel@ujf-grenoble.fr

Abstract

The author presents the Ardèche area in the South-East of France, and its characteristics : Mediterranean climate, dramatic floods during the rainy seasons… He shows how, during the XIXth century, because of demographic and economic pressures, farmers built terraced plots to extend their crops and to control the hydric erosion. He discribes them. Today, 80% of these terraces have been more or less abandoned, as a consequence of rural depopulation and land use changes; runoff increases and gullying expends, except when herbaceous and shrubby vegÉtation protect the slopes against the effects of erosion.

Keywords : *Mediterranean Basin* ; *Ardèche* ; *Traditional Techniques* ; *Runoff Management* ; *Terraces* ; *France*.

INTRODUCTION

Le département de l'Ardèche, dans le Sud-Est de la France, se caractérise par un relief très contrasté et par un climat méditerranéen aux pluies rares mais catastrophiques qui provoquent des écoulements violents. Le régime des rivières est très irrégulier. L'été, les valeurs du débit sont très faibles, le débit d'étiage pouvant être, par exemple, pour le Doux de quelques litres par seconde. En revanche, les grandes crues de cette rivière ont donné en 1787 et 1907 des débits de 2 000 m^3/s, alors que le débit moyen est de 5,10 m^3/s. Différentes stratégies et pratiques, en particulier l'installation de terrasses, y ont été utilisées depuis des temps très anciens.

L'âge des terrasses est très variable selon les sites. Ainsi, en Chine, les gradins avec talus enherbés existent depuis 4 000 ans av. J.-C. (Roose, 2002) ; dans le bassin méditerranéen, certaines terrasses remonteraient au xe siècle. Ici, près de la vallée du Rhône, l'agriculture en terrasses sur les versants semble présente dès l'époque romaine. Mais il est certain que c'est au moment des fortes poussées démographiques que s'est faite l'extension de ces terrasses. J.-F. Blanc (2001) insiste en effet sur la relation milieu physique/milieu humain : les terrasses

représentent un espace « construit » en réponse à des contraintes climatiques et topographiques ainsi qu'à des contraintes économiques et sociales. C'est ce qui se produit en Ardèche au XIXe siècle.

1. LES POLITIQUES MENÉES AU XIXe SIÈCLE

Nous sommes éclairés en premier lieu par les politiques officielles commanditées par les ingénieurs en chef des ponts et chaussées. Ainsi le rapport de M. de Mardigny de 1857 concernant les inondations provoquées par la rivière Ardèche est particulièrement éloquent. Il attribue les crues à trois causes :

- tout d'abord, aux fortes pentes de la rivière et de ses affluents ainsi qu'à l'escarpement des versants et au peu de longueur des vallées « *d'où les eaux débouchent en même temps* » ;
- ensuite, aux pluies torrentielles qui tombent dans cette partie de la France ;
- enfin, au déboisement des montagnes des Cévennes et du Coiron.

La lecture des archives nous permet de mieux comprendre les stratégies et les pratiques mises en place. On y découvre les politiques menées sur les « droits d'eau », les querelles entre droit privé et droit public, les conflits entre partisans de barrages édifiés pour l'alimentation des moulins et ceux qui donnent la priorité à l'irrigation. Ainsi en 1906 est enregistrée dans la commune de Rochepaule une réclamation pour détournement des eaux de la rivière au détriment des moulins à blé.

2. LE DÉVELOPPEMENT DES TERRASSES AU XIXe SIÈCLE ET LE ROLE DES « BÉALIÈRES »

Lutter contre les dégâts provoqués par les eaux apparaît donc comme un des objectifs prioritaires des stratégies menées depuis le début du XIXe siècle. Mais la multiplication des terrasses répond à un autre souci. À cette époque, les montagnes de l'Ardèche sont très peuplées ; on manque de terres et leur construction est utilisée pour « optimiser » un milieu difficile. La fonctionnalité de ces « faïsses » a été bien décrite par M. Léonard et C. Dumas (2002) : les murets de pierres sont utilisés pour aménager les versants, mais on s'en sert aussi pour barrer dans les vallons secondaires les ruissellements concentrés, afin de piéger derrière eux les débits solides.

Différents types de terrasses sont étudiés, en fonction de la géologie des lieux : les terrasses sur support schisteux des Cévennes méridionales sont particulièrement fragiles, ces roches étant sensibles à la gélifraction ainsi qu'aux agressions des hommes et des animaux. Celles plus nombreuses sur support granitique et sur pentes généralement plus douces sont assez résistantes aux effets de l'érosion : elles restent souvent aujourd'hui encore en assez bon état. Enfin, celles des régions gréseuses de l'avant-pays cévenol, peu déclives, conservent encore aujourd'hui des vignobles, alors que ceux-ci ont le plus souvent été abandonnés sur les terrasses des versants marno-calcaires aux sols pauvres.

Léonard et Dumas montrent comment l'aménagement de ces terrasses prend en compte l'écoulement de l'eau. Dans celles de milieu de versant, « *l'eau est rejetée sur les bords du champ et canalisée dans des chenaux solidement maçonnés* ». Sur les bas de versant, les constructions de murets sont discontinues de manière à permettre l'écoulement de l'eau entre eux. Les paysans n'étaient certes pas géomorphologues, mais ils ont tenu compte de l'effet de la pente : on constate en effet que plus la pente est forte et plus l'inclinaison de la planche de la terrasse ainsi que le nombre de celles-ci augmentent.

Une autre technique était utilisée en vue de l'irrigation, celle des « béalières ».Une levade en pierres (seuil) était dressée sur la rivière, permettant de diriger l'eau vers un canal. Des systèmes d'écluses permettaient, par l'intermédiaire de ces canaux installés dans les fonds de vallée, de répartir l'eau par système gravitaire sur des surfaces peu pentues et donc peu soumises à l'érosion. Mais on ne peut pas assimiler leur rôle à celui des chenaux aménagés sur les versants du Champsaur, dans les Alpes (Veillet 1994), aménagés au niveau des haies, qui jouent le rôle de drain et permettent une meilleure dispersion des écoulements.

Ainsi ces pratiques avaient pour but de mieux rentabiliser l'espace, mais elles permettaient aussi de maîtriser l'action de l'eau, en jouant le rôle de pondérateur des écoulements. En effet, les murs freinent et entravent le ruissellement, et sur les « planches », à faible pente, l'infiltration est facilitée. La terre accumulée derrière le mur de soutènement facilite le drainage, tandis que le travail du sol rend celui-ci plus perméable. Ces terrasses permettaient ainsi la conservation des sols et la lutte contre l'érosion.

3. L'ABANDON DE CES TECHNIQUES TRADITIONNELLES ET LEURS CONSÉQUENCES

Quel jugement peut-on porter aujourd'hui sur ces diverses techniques utilisées ?

Il faut noter tout d'abord leur abandon dès la fin du XIXe siècle, en relation avec le déclin démographique et la déprise agricole. C'est dans les hautes vallées, les secteurs les plus montagneux, que la population a connu le plus important déclin. Ainsi le canton de Lamastre, sur le haut Doux, a perdu, au cours du XXe siècle, les trois quarts de ses habitants. Saint-André-en-Vivarais a enregistré une perte de 76,5 % entre 1921 et 1990 ; Saint-Jeure-d'Andaure possède aujourd'hui moins du sixième de sa population de 1876. Or ces pratiques demandaient un travail considérable. Henri Pourrat (1941) décrit de manière imagée ce dur labeur :

« Après tant de journées, aigres ou lourdes, à suer, à ahaner, entre les échalas, quand ils voient l'orage crouler sur leurs terrasses peu sûres, les ruisseaux d'eau jaune emporter la terre et ruiner la muraille, ils ne renoncent point. Dès le matin, la hotte au dos, ils remontent, ils rechargent dans cette hotte la glèbe entraînée, ils vont la décharger aux places d'où elle est partie, reconstruisant leur vigne en ses casiers de roche. »

Aujourd'hui, il n'y a plus assez de monde pour réaliser ce travail ; partout, friches et boisements gagnent du terrain. Qu'il y ait déprise humaine, que l'économie se transforme et alors le « système » ne fonctionne plus : les terrasses sont abandonnées et se dégradent. L'activité agricole ne se maintient que dans les

moyennes et surtout les basses vallées, là où les pentes sont les moins fortes. On y trouve des vergers et des vignes, sur les terrasses exposées au sud. Certaines parcelles trop pentues sont reconverties en pâture. À la fin des années soixante-dix, G. Mottet (1981) évaluait déjà à 70 % le nombre de terrasses abandonnées sur la bordure de la vallée du Rhône, entre Vienne et Tournon. Actuellement, 80 % des « faïsses » ardéchoises sont délabrées, surtout dans les secteurs les plus isolés et sur les pentes les plus fortes. Si la planche est colonisée par la végétation, cela peut prévenir des risques d'érosion, mais, le plus souvent, la terrasse s'éboule et devient irrécupérable. J.-F. Blanc (2001) parle alors d'un « paysage fossile ». Les terrasses sur les versants ubac, plus humides, connaissent des phénomènes de solifluxion, les murs se couchent et les planches s'affaissent ; le versant tend à reprendre son profil d'origine. Sur les versants adret, la végétation a du mal à se fixer ; le muret, envahi par les ronces, se déstabilise ; des brèches apparaissent et le mur finit par s'ébouler.

Ainsi différents processus se déclenchent selon le type de sol et la nature de la pente : descente gravitaire de la terre, glissements, mouvements de masse qui menacent parfois les habitations construites sur ces versants. Les « vallats » peuvent aussi soudainement se transformer en torrents aux effets dévastateurs. Il suffit qu'un arbre arraché barre le talweg et les eaux sont déviées ; en un instant, la terrasse cède alors sous le poids et la pression de l'eau. L'eau de ces torrents emporte chaque année de nombreuses terrasses. Si le versant est abandonné par le haut, si les canaux d'irrigation ne sont plus entretenus, c'est tout le versant qui est menacé. Le « système » des terrasses est ainsi fragilisé.

Il arrive que des terrasses abandonnées conservent leur cohésion, comme, par exemple, dans la vallée de l'Eyrieux. Les murets sont alors envahis par une végétation secondaire, les planches sont gagnées par une reconquête arbustive généralisée. Mais le plus souvent, ces versants à terrasses connaissent de multiples agressions et leur abandon les soumet à des problèmes d'érosion et à des risques d'incendie, l'embroussaillement favorisant ce dernier phénomène.

CONCLUSION : QUEL AVENIR POUR CES TERRASSES ?

La question se pose de savoir s'il est possible de gérer cet héritage très lourd. Dans les secteurs situés en altitude, plus ou moins enclavés et dépeuplés, l'avenir des terrasses semble très compromis et la revégétalisation de ces espaces par des boisements ou des prairies peut seule permettre de lutter contre l'érosion. Dans les régions plus favorisées et plus dynamiques, basses vallées, versants exposés au sud, proches de la vallée du Rhône, ces terrasses, recolonisées par des vergers, des vignobles ou parfois par l'habitat, ont sans doute plus d'avenir. De toutes manières, elles font partie du patrimoine culturel et il est certain que, depuis plus de dix ans, avec la prise de conscience de la valeur de ces paysages par de nombreux acteurs du développement, le « système » terrasses semble connaître un regain d'intérêt, mais seule une politique globale d'aménagement pourrait permettre de revitaliser ces espaces.

De nos jours, comme au début du XIXe siècle, les méfaits de l'eau subsistent dans ce pays qui, pourtant, en manque la plupart du temps. Les systèmes agropastoraux ont changé, mais des crues peuvent encore survenir. Les terrasses

ne favorisent plus l'infiltration sur les versants, mais la reconquête du couvert végétal qu'elles connaissent assure un rôle protecteur. Comme le dit M. Léonard (2003), seule une « concertation entre les acteurs d'un bassin-versant » et une démarche de gestion intégrée des eaux et des sols, peut permettre aujourd'hui de lutter efficacement contre l'érosion hydrique.

Références bibliographiques

BLANC J.-F., 1984: *Paysages et paysans des terrasses de l'Ardèche*, 312 pp.

BLANC J.-F., 2001. *Terrasses d'Ardèche ; paysages et patrimoine*, 156 pp.

COLLECTIF, 2004. Les paysages de terrasses : des millénaires d'innovations, Programme Leader II, 72 p, PNR des Monts d'Ardèche.

DE MARTIGNY P. *Rapport sur les grandes crues de l'Ardèche*, 1857-1859, documents d'archives, Fond du Musée Dauphinois, Grenoble.

DESSEMOND R., 1998. *La ressource en eau et son exploitation dans la vallée du Doux (Ardèche)*, mémoire de maîtrise I.G.A. Université Joseph Fourier Grenoble.

LÉONARD M, DUMAS C, 2002. Diversité et fonctionnalités des aménagements de versant : exemple des terrasses ardéchoises, *Bull. Réseau Erosion* 21 : 182-196.

LEONARD M, 2003. *L'érosion hydrique des sols cultivés : analyse systémique et propositions de gestion ; application aux vignobles d'Ardèche méridionale*, 2 vol., thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 546 pp.

MOREL A. (DIR.), 1999. *La gestion de l'eau dans le bassin versant du Doux (Ardèche)*, Institut de Géographie alpine, Grenoble, 76 pp.

MOTTET G., 1981. Les coteaux rhodaniens, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 56, n° 4, 370-387.

POURRAT H., 1941. *L'homme à la bêche*, Flammarion, 284 pp.

ROOSE E., 2002 . Réflexions sur quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Languedoc et Roussillon (France méridionale). *Bull. Réseau Érosion* 21 : 197-212.

VEILLET Y., 1994. *L'érosion liée à l'abandon des structures linéaires bocagères : l'exemple du Champsaur*, mémoire de maîtrise, Institut de Géographie, Grenoble, 150 pp.

GESTION DE L'EAU ET DES SOLS SUR TOPOSÉQUENCES CUIRASSÉES EN AFRIQUE OCCIDENTALE : LIMITES DES MÉTHODES TRADITIONNELLES ET PERSPECTIVES

Drissa DIALLO* et Eric ROOSE**

** IPR/IFRA de Katibougou, Laboratoire d'agropédologie,*
B.P. 6, Koulikoro, Mali, drdiallo@ird.fr
*** UR SeqBio, Centre IRD,*
B.P. 64 501, F 34394, Montpellier, France ; roose@mpl.ird.fr

Abstract

Large iron pan impluviums *are observed under the Sudano-Sahelian climates with monomodal rainfalls in Western Africa (rainfalls: 500 to 1200 mm; 5 to 8 dry months). The landscapes show iron pan plateaus (320 to 400 m high), with marginal soils (thick, gravely, very low permeability and fertility), glacis and valleys with deep and silty ferruginous or hydromorphic soils. Runoff varies from 40% (on iron pan) to 35% (on glacis). Sometimes, runoff attains more than 70% of big rainstorms. To manage this large amount of runoff, the farmers traditionally used various tillage systems and specific SWC techniques : stone lines, stone bunds, earth bunds, zaï practices with living hedge rows. In spite of current techniques efficient, gully development control remains a major problem. So, it is necessary to develop appropriate alternatives for water harvesting, storage and redistribution on the landscape.*

Keywords : *Western Africa* ; *Traditional SWC Techniques* ; *Erosion* ; *Runoff* ; *Efficiency*.

INTRODUCTION

En Afrique occidentale, les stratégies de gestion conservatoire des eaux et des sols (GCES) sur toposéquence avec *impluvium* cuirassé reposent sur l'utilisation de techniques traditionnelles, ayant été souvent sujets de recherche pour amélioration (Roose 1994). Ces techniques doivent être réexaminées actuellement en vue d'apprécier leur efficacité et leur diffusion dans cet environnement en évolution rapide du climat et du contexte démographique et socio-économique.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

La présence de grands *impluviums* cuirassés est fréquemment observée sous les climats à régime pluviométrique monomodal et très contrasté d'Afrique occidentale. L'étude porte spécifiquement sur l'espace incluant les isohyètes 500 à 1 200 mm. À l'échelle des petits bassins versants, la première partie de la toposéquence est occupée par des modelés cuirassés (320 à 400 m d'altitude) avec des sols peu épais et graveleux, de perméabilité très faible. En position basse, les glacis sont occupés par des sols ferrugineux et les bas-fonds par des sols hydromorphes plus ou moins épais, de texture moyenne à fine, présentant des risques élevés de dégradation des états de surface et de leur perméabilité. C'est là que se concentre la production agricole intensive.

Le potentiel de ruissellement est calculé comme suit (Diallo *et al*, 2004a) :

$$P_{RUI} = 10\ Pa \times KRAM$$

P_{RUI} : potentiel de ruissellement (en $m^3\ ha^{-1} an^{-1}$)

Pa : quantité annuelle de pluie (en mm)

KRAM : coefficient de ruissellement annuel moyen (en % de la pluie annuelle)

Pour une gamme pluviométrique retenue (500 à 1200 mm), P_{RUI} est calculé avec les hypothèses simplificatrices suivantes : KRAM = 40 % (pour sol gravillonnaire) et 35 % pour les sols cultivés sur le glacis.

L'analyse des pratiques et techniques actuelles de GCES s'appuie sur des observations et enquêtes auprès de paysans du sud du Mali et divers travaux (enquêtes, expérimentation au champ, analyses de laboratoire) conduits dans la zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale par les chercheurs, en particulier de l'IRD de Montpellier, l'IER de Bamako, le CIEH de Ouagadougou, le KIT d'Amsterdam, la CMDT, DRSPR de Bamako, l'OXFAM.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Potentiel de ruissellement

Le potentiel de ruissellement (P_{RUI}), calculé pour différents isohyètes (500 mm à 1 200 mm), varie de 2 000 $m^3\ ha^{-1}\ an^{-1}$ à 4 800 $m^3\ ha^{-1}\ an^{-1}$ pour le modelé cuirassé, et de 1 750 $m^3\ ha^{-1}\ an^{-1}$ à 4 200 $m^3\ ha^{-1}\ an^{-1}$ pour le long glacis. Ces volumes d'eau, relativement importants à l'échelle bassin versant, sont essentiellement destinés au ruissellement en absence de dispositif approprié de GCES. Si un tel dispositif existe, une partie des eaux s'infiltre et le reste traverse la toposéquence avec une énergie réduite.

2.2. Pratiques culturales traditionnelles de gestion des eaux pluviales et des sols en milieu cuirassé

Piochage de la parcelle sur toute sa superficie

Pratiqué dans les légères dépressions locales du plateau, il favorise l'infiltration dès le début de la saison pluvieuse. Par la suite, une lame d'eau plus ou moins

uniforme de quelques centimètres est maintenue sous la culture de riz (généralement des variétés rustiques).

Confection de planches

La planche a une superficie variable (4 m^2 à 10 m^2) et une hauteur d'environ 50 cm. Elle corrige la faible épaisseur du sol pour offrir plus de volume aux racines des cultures (maïs, sorgho, arachide, gombo) et leur évite l'excès d'eau.

Confection de buttes coniques

La butte (base = 1,5 m ; hauteur = 20 cm à 30 cm) a les mêmes fonctions que la planche et est destinée à l'arachide et à la patate. Roose (1994) a décrit des buttes de 60 cm à 80 cm de haut en pays Sénoufo (Nord de la Côte d'Ivoire), destinées à l'igname et au manioc sur sols gravillonnaires profonds.

Ces méthodes traditionnelles garantissent un minimum de production vivrière sur les plateaux cuirassés, même dans des situations de déficit pluviométrique pas trop excessif. Cependant, à l'échelle de la toposéquence, elles ne permettent pas l'utilisation optimum de l'eau qui peut stagner plus ou moins longtemps entre les planches et les buttes pendant que les cultures souffrent de sécheresse sur le long glacis, au contrebas.

2.3. Pratiques culturales et techniques améliorées de GCES le long de la toposéquence

Le travail minimum du sol

Juste avant le semis**,** la parcelle est brûlée (ou herbicidée sur des adventices de 10 à 15 cm de haut), puis travaillée uniquement sur les lignes de semis. L'activité biologique est stimulée et l'infiltration est améliorée.

L'alignement de pierres

C'est une seule rangée de pierres plantées dans le sol pour ralentir le ruissellement, piéger des particules (limon et matière organique) transportées par le ruissellement ainsi que des sables éoliens.

Les cordons pierreux

Ils sont formés de deux à trois niveaux de pierres solidaires, de 10 à 50 cm de hauteur, disposés en courbe de niveau tous les 10 à 50 m. Ils peuvent être consolidés par des herbes ou des haies vives. Ils permettent l'étalement des eaux de ruissellement et la sédimentation (5 à 15 cm de sable, limon et matière organique).

Le zaï

C'est une cuvette (20 cm à 40 cm de diamètre et 10 cm à 15 cm de profondeur) qui capte le ruissellement à partir d'un *impluvium* de 5 à 20 fois la surface travaillée. Les cuvettes sont creusées tous les 80 cm à 100 cm. Les trous étant faits pendant la saison sèche, ils piègent des particules apportées par le vent : sable, limon, matières organiques. Dès les premières pluies, une à deux poignées de matière organique (1 t ha^{-1} à 3 t ha^{-1}) apportées à chaque trou favorisent l'activité des

termites (du genre *Trinervitermes*), qui creusent des galeries. Généralement, une douzaine de graines de sorgho sont semées en poquet pour leur permettre de soulever la croûte sédimentaire, qui s'y forme lors des premières averses (Roose *et al.* 1993). Ce système a été utilisé avec succès pour réintroduire la jachère arbustive et un système agro-sylvo-pastoral, disparu suite à l'usage intensif de la charrue.

La demi-lune

C'est une diguette en forme de demi-lune (diamètre de 2 m à 6 m) qui permet de concentrer le ruissellement et sa charge en suspension sur des arbustes ou des cultures en poquets. L'extrémité de la diguette peut être protégée par des cailloux.

Les haies vives

Elles sont constituées de deux ou trois lignes d'herbes (*Andropogon* ou *Pennisetum*) ou d'arbustes plantés en quinconce.

L'efficacité des dispositifs de GCES décrits a été mise en évidence dans différentes situations. Le cordon pierreux a un effet positif sur les débits de pointe, l'étalement des écoulements et les risques d'érosion (Roose, 1994). Son influence sur le ruissellement global reste mitigé. Cependant, contrairement aux zones de forte pluviosité, il n'est pas exclu que cette influence soit significative dans les situations les plus arides de la zone soudano-sahélienne (faible total annuel de pluie, nombre de pluies limité, humidité du sol fréquemment bas) : le dispositif semble diviser le ruissellement moyen par 4 et l'érosion par 25 au Niger (Delwaulle, cité par Heusch, 1991). À Kaniko (Sud du Mali), le cordon pierreux et la demi-lune ont permis la recolonisation totale du sol nu par une végétation herbacée, au bout de deux ans (Van der Pool et Kaya, 1991, cités par DRSPR, 1992). Le zaï + fumure améliore le rendement du sorgho au Burkina : 900 kg ha^{-1} contre 300 kg ha^{-1} pour le témoin (Roose *et al.*, 1993). Les enquêtes montrent que les techniques traditionnelles améliorées sont largement acceptées par les paysans soudano-sahéliens (le tableau 1 en donne un exemple), même si des difficultés de mise en œuvre existent souvent, surtout dans les cas où un travail collectif bien organisé est nécessaire. Les haies vives semblent être utilisées dans de nombreux cas, dans tous les pays (Burkina Faso, Mali, Sénégal, Niger), comme un moyen de gestion foncière et de GCES.

Les techniques traditionnelles de GCES, améliorées par l'arrangement spatial du dispositif sur le terrain (cordons mis en place suivant les courbes de niveau, par exemple) et par apport de nutriments (matière organique et complément minéral), s'avèrent efficaces : elles permettent une amélioration des rendements des cultures et de la biodiversité. Cependant, elles sont insuffisantes pour un contrôle total du ruissellement, les raisons étant soit une faible épaisseur du sol, soit un volume important d'eau (quantité annuelle de pluie supérieure à 800 mm) que même les sols profonds ne peuvent pas stocker (Roose *et al.*, 1993).

Classification préférentielle des différentes technologies de GCES d'après les études de Lalba (2005) dans la zone Nord-Ouest du Burkina Faso

Technologies	Critères de préférence				Totaux	Moyenne
	Rendement élevé	Fertilité améliorée	Humidité conservée	Durabilité		
Paillage	3	4	3	1	11	2,75
Zaï + fumure organique	4	5	3	1	13	3,25
Cordons pierreux	2	3	4	5	13	3,50
Diguettes de terre	1	1	2	3	7	1,75
Pondération totale	10	15	13	15	—	—
Moyenne	2	3	2,6	3	—	—

3.4. Nécessité de développer de nouvelles stratégies de GCES

La collecte des eaux de pluie et de ruissellement et leur redistribution dans le paysage agricole soudano-sahélien méritent de faire l'objet de nouvelles analyses. Il est envisageable d'évoluer vers de petits aménagements hydrauliques plus ou moins sophistiqués, l'objectif étant de gérer complètement les eaux disponibles. A priori, on peut penser à deux types d'ouvrage :

- l'endiguement de surfaces raisonnables sur plateau cuirassé avec possibilité de canaliser les excès d'eau au profit des autres segments de la toposéquence. La riziculture et la production fourragère sont proposables à l'intérieur de la digue ;
- le creusement de mares artificielles en tête de ravine (appelées *bouli* chez les Mossi) ou de petits barrages collinaires en contrebas des reliefs cuirassés, à la limite des sols gravillonnaires et limoneux. Dans ce cas, les eaux collectées sont soigneusement distribuées en aval sur les sols argilo-limoneux plus profonds (Dugué *et al.* 1993).

CONCLUSION

En milieux soudano-sahéliens, les sociétés traditionnelles ont souvent caché leurs villages dans les éboulis, en bordure des plateaux cuirassés, et développé des techniques culturales originales sur ces sols gravillonnaires. Les rendements étant modestes sur ces sols pauvres très légers, les sols limono-argileux des glacis ont

été préférés pour développer une agriculture moderne intensive. Un ruissellement très intense est à l'origine d'un ravinement dangereux. D'où le développement de toute une série d'aménagements :

- parcours et reforestation (*zaï* ou demi-lune) sur plateau et glacis gravillonnaires ;
- creusement de mares (*bouli* au Burkina Faso) et petit barrage collinaire pour le bétail et la création de jardins irrigués en aval des sols gravillonnaires ;
- cordons de pierres, haies vives, diguettes isohypes en terre, lignes de paille sur les glacis.

Les études récentes ont bien montré que pour augmenter sérieusement la productivité des terres dans ces zones semi-arides, il fallait combiner les aménagements de gestion de l'eau et l'amélioration du niveau de fertilisation du sol et de nutrition des cultures : fumier, compost, paillage et complément N + P (Roose 1994, Zougmore *et al.* 2004).

Références bibliographiques

DIALLO D., KEITA D., SAWADOGO B., 2004. Les sols peu épais sur cuirasse : Problématiques et alternatives de mise en valeur en agriculture soudanienne. *Revue Malienne de Sciences et de Technologie*, 6, 28-37.

DUGUE P., ROOSE E., RODRIGUEZ L., 1993. L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso). *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 385-402.

HEUSCH B., 1991. Techniques traditionnelles de CES dans l'Ader-Doutchi (Niger). *Bull. Réseau Erosion* ,12 : 269-274.

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

ROOSE E., KABORE V., GUENAT C., 1993. Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées. *Cah. ORSTOM Pédol.,* 28, 2 : 159-174.

ZOUGMORÉ R., MANDO A., RINGERSMA J., STROOSNIJDER L., 2004. Effet synergique des techniques de gestion de l'eau et des nutriments sur le ruissellement et l'érosion en zone semi-aride du Burkina Faso. *Bull. Réseau Erosion* IRD, Montpellier, 23 : 540-553.

Gestion de la biomasse et de la fertilité des sols

DE L'AGROFORESTERIE TRADITIONNELLE À L'AGRICULTURE ÉCOLOGIQUE MODERNE. STRATÉGIES POUR LA CONSERVATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS DES HAUTES TERRES DE L'AFRIQUE DE L'EST

Dieter KÖNIG
Professeur Dr., Département de géographie, Universität Koblenz
Universitätsstraße 1, D-56070 Koblenz, R.F.A. ; dkoenig@uni-koblenz.de

Abstract

In Eastern Africa, traditional agroforestry practices were developed by smallholders to avoid resource degradation in densely populated areas. The paper shows how "modern" agroforestry can learn from these traditions to arrive at a sustainable, "ecological" agricultural production. Based on measurements of runoff and soil losses, of biomass production and nutrient fluxes, the author resumes twenty years of research at the Projet Agricole et Social Interuniversitaire (PASI) at Butare, Rwanda.

Keywords : *Eastern Africa* ; *Agroforesterie* ; *Soil fertility* ; *Erosion*.

1. L'AGROFORESTERIE TRADITIONNELLE EN AFRIQUE DE L'EST

Dans les régions très densément peuplées des Hautes Terres d'Afrique orientale, les agriculteurs ont développé de façon autonome des techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols qui permettent une production agricole soutenable malgré une forte densité de la population (800 à plus de 1 000 hab./km²). Chez les Wachagga au Kilimandjaro et chez les Wahambaa à Usambara — pour donner deux exemples de la Tanzanie étudiés par l'auteur —, il s'agit de systèmes agroforestiers à étages multiples.

Dans l'étage supérieur du système des Wachagga, qui est pris comme exemple parce qu'il est le plus élaboré, les arbres autochtones comme *Albizia schimperiana*, *Cordia africana* et *Olea welwitschii* jouent un rôle clef comme arbres d'ombrage produisant une grande quantité de feuillage. Le deuxième étage est composé par des arbres indigènes comme *Croton macrostachyus*, *Rauwolfia caffra* ou *Ocotea usambarensis*, ainsi que par des arbres exotiques comme *Grevillea robusta* ou *Persea americana* (avocatier). Dans le troisième étage, les bananiers dominent ; ils sont accompagnés de quelques arbres fruitiers comme *Psidium guajava* (goyave), *Morus alba*, et par diverses espèces de *Citrus*. En

dessous de cet étage, les Wachagga cultivent un café de très bonne qualité. L'étage inférieur est occupé par des cultures associées qui couvrent toute la surface ; il s'agit essentiellement de cultures annuelles comme *Colocasia*, *Dioscorea* (igname), patates douces et haricots.

L'énorme production de biomasse de ces jardins occupés par de nombreuses espèces pérennes ou annuelles est garantie par un système d'irrigation très élaboré et par un approvisionnement continuel en matière organique (feuillage, déchets de cuisine, fumier produit par de bétail dans des étables). Pendant toute l'année, le sol est couvert à cent pour cent de feuilles soit vives ou mortes, ce qui garantit une infiltration des eaux de pluies, même pendant les fortes averses. Par conséquent, il n'y a pas la moindre trace d'érosion même sur des pentes fortes. En bref, les expériences paysannes autochtones dans des régions d'Afrique orientale densément peuplées ont mené à la création de systèmes agroforestiers dont les éléments principaux sont : l'intégration des arbres et des haies dans les parcelles de cultures, la mise en place de cultures associées, la substitution de la jachère par l'emploi d'engrais verts, l'intégration de l'élevage dans le système de culture, le recyclage de la biomasse dans un cycle fermé, l'intégration de la lutte antiérosive (König, 1992).

2. L'AGRICULTURE ÉCOLOGIQUE AGROFORESTIERE MODERNE

Ce chapitre donne un aperçu des études menées au sein d'un système agroforestier au Rwanda depuis 1985. Le terrain d'expérimentation, qui fait partie du Projet agricole et social interuniversitaire (PASI) est situé à Butare, au sud du Plateau central rwandais (altitude de 1 700 m, précipitation annuelle moyenne de 1 280 mm en neuf mois — régime bimodal —, température annuelle moyenne de 20 °C). Les expériences ont été menées sur un sol ferralitique fortement dégradé, très acide (pH 3,8 à pH 4) et pauvre en éléments nutritifs.

Les parcelles sont cultivées selon les méthodes de l'agriculture écologique agroforestière qui se base sur les méthodes autochtones décrites ci-dessus et qui 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.

2.1. Érosion et conservation des sols

Malgré une érosivité des pluies relativement modérée (facteur R_{USA} d'après Wischmeier et Smith autour de 350), on a constaté une érosion énorme sur les parcelles non protégées (plus de 400 t/ha/an sur sol nu et plus de 200 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 matière organique et en éléments nutritifs, à un niveau « tolérable » (1 %-3 % des valeurs initiales, v. tableau ci-dessous). Des résultats comparables (jusqu'à 500 t/ha/an sur sol nu, 120 t/ha/an à 250 t/ha/an sous cultures non protégées, 1 t/ha/an à 2 t/ha/an sur parcelles protégées par des haies vives) ont été obtenus par F. Ndayizigiye à Rubona (Roose, Ndayizigiye et Sekanyange, 1993).

Evolution de l'érosion du sol mesuré au PASI, Butare (érosion moyenne annuelle mesuré sur parcelles d'expérimentation de 100 m² avec une pente de 28 %, pendant les six premières saisons de culture, 1987/88 à 1989/90, et les sept saisons suivantes, 1991/1992 à 1993/1994)

Parcelle / traitement	Erosion du sol [t/ha/an]		
	1987/88 à 1989/90	1991/92 à 1993/94	changement relatif [%]
Témoin A : jachère nue (témoin universel)	557	392	- 29,7
Témoin B : cultures paysannes (manioc)	303	195	- 35,6
Parcelles agroforestières :			
1. *Grevillea* + cultures associées sans protection antiérosive supplémentaire	111	57,3	- 48,4
2. *Grevillea* + *Calliandra* (alley-cropping), culture paysanne (manioc)	15,9	2,7	- 83,2
3. *Grevillea* + *Calliandra,* cultures associées	12,2	2,3	- 81,0
4. *Grevillea* + *Calliandra* (semis direct) cult. assoc.	7,5	1,7	- 77,1
5. *Grevillea* + *Leucaena,* cultures associées	7,3	7,1	- 2,8
6. *Grevillea* + *Setaria*, cultures associées	3,2	5,0	+ 55,7
7. *Grevillea* + *Calliandra* (*alley-cropping*), cult. assoc.	2,9	0,6	- 80,1
8. *Grevillea* + *Leucaena* (cult. assoc. + billons)	3,8	1,4	- 64,4

Les résultats obtenus sur la parcelle agroforestière 1 montrent que la seule introduction des arbres et des méthodes d'agriculture écologique ne suffit pas à réduire les pertes de terre à un niveau acceptable (plus de 60 t/ha/an sous *Grevillea*). Seulement, l'intégration des haies de légumineuses fait de l'agroforesterie un système de production valable en vue de la conservation du sol. Grâce au développement rapide de ces haies, l'érosion a été réduite à moins de 16 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.

Les résultats les plus encourageants (une réduction durable de l'érosion à moins de 0,5 % des pertes mesurées sur la parcelle cultivée avec du manioc) ont été obtenus par la méthode d'*alley-cropping* sur des microterrasses d'une largeur de 0,5 m et d'un écartement de 5 m, plantées d'une ligne double de *Calliandra calothyrsus*.

Les lignes d'herbes, qui sont très efficaces pendant les deux premières années, perdent leur efficacité (ainsi que leur productivité) après quelques années (voir tableau). Par contre, les haies arbustives sont toujours très efficaces, même vingt ans après leur plantation.

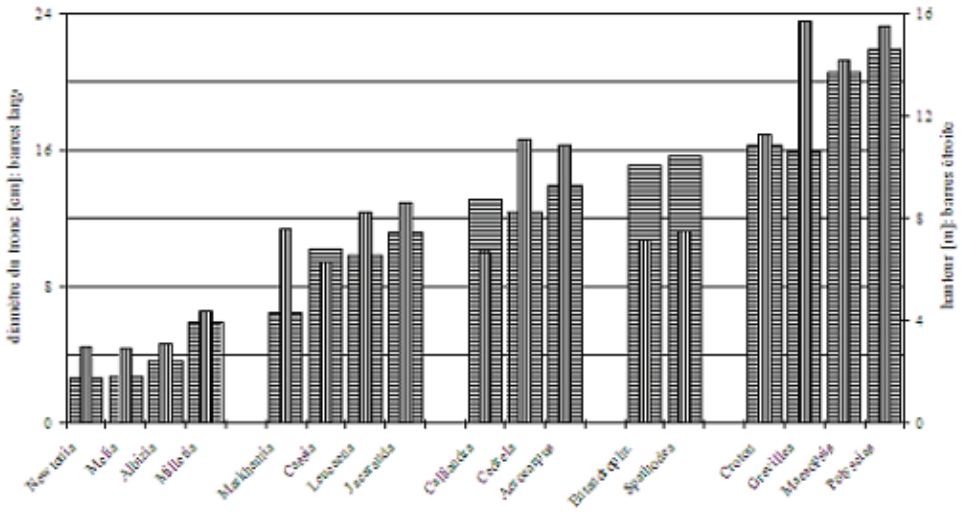
2.2. Production de biomasse

Par l'intégration des arbres et des arbustes dans le système de production agricole, l'agroforesterie permet une haute production en biomasse, même sur des sites dégradés. Puisqu'il existe très peu d'expérience sur l'intégration d'autres arbres que *Grevillea robusta* dans des systèmes agroforestiers, 32 différentes espèces d'arbres ont été plantées en novembre 1985. Des relevés dendrométriques qui ont été faits à maintes reprises montrent que, à Butare, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les arbres autochtones *Maesopsis eminii* et *Polyscias fulva* (voir figure). Pendant que les arbres exotiques (par exemple, *Grevillea, Cedrela*) montrent une bonne croissance initiale, les espèces autochtones sont, à la longue, plus productives et concurrencent moins les cultures vivrières.

En ce qui concerne l'intégration des arbustes, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des haies de *Calliandra calothyrsus* plantées à un écartement de 0,5 x 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* (2 000 m/ha) coupée trois fois par an contiennent jusqu'à 105 kg de N, 47 kg de P_20_5 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.

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 (*Pennisetum purpureum* ou *Setaria splendida*) ont été fortement dégradées ou ont même disparu, tandis que les haies arbustives sont très productives.

L'association « arbres + herbes » dans des « lignes antiérosives » est à déconseiller. Les effets de concurrence entre les herbes et les cultures vivrières et les arbres sont importants, surtout quand ces lignes d'herbes sont composées des espèces à croissance rapide comme *Pennisetum* ou *Tripsacum*. Il en résulte une croissance tardive des arbres et une forte diminution de leur production en biomasse. Même après 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 la production de biomasse supérieure et son effet antiérosif. La baisse de la productivité et de l'effet conservatoire restent souvent méconnues, la période d'observation des travaux de recherche étant souvent limitée à moins de trois ans.



Diamètre moyen et hauteur moyenne des arbres de dix ans (terrain d'expérimentation du PASI)

2.3. Amélioration de la fertilité des sols

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 C et N. Par le compostage, la haute production en biomasse du système agroforestier peut être valorisée pour améliorer la production végétale.

Par contre, 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 oligo-éléments) semble nécessaire. Ce résultat a été confirmé par les expériences de F. Ndayizigiye à Rubona (Roose, Ndayizigiye et Sekanyange, 1993). La valorisation de la biomasse produite dans des systèmes agroforestiers est difficile. Selon nos expériences, la technique de l'engrais vert n'a pas la capacité de régénérer des sols dégradés. Malgré une production de biomasse de 18 t/ha à 25 t/ha, un engrais vert installé sans fumure améliorante 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 P) rencontrées dans le sol ; la reprise trop lente des engrais verts a eu pour conséquence de fortes pertes de sol même en deuxième saison culturale.

Une alternative beaucoup plus prometteuse aux engrais verts est le système d'*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 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 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.

Références bibliographiques

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

ROOSE E., 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, Pédol.*, 28, 2 : 327-349.

EFFICACITÉ DES JACHÈRES LÉGUMINEUSES ARBUSTIVES SUR L'AMÉLIORATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS DÉGRADÉS ET DE LEUR RÉSISTANCE À L'ÉROSION — RÉGION DE MANANKAZO-TAMPOKETSA (N.-O. DE MADAGASCAR)

M.-A. RAZAFINDRAKOTO*, J.-C. RANDRIAMBOAVONJY* et N. ANDRIAMAMPIANINA**

** Enseignant-chercheur au département eaux et forêts de l'École supérieure des sciences agronomiques, université d'Antananarivo, B.P. 175, ma.kisatoo@univ–antananarivo.mg*

*** Chercheur au département de recherches forestières et piscicoles, FOFIFA Ambatobe, Antananarivo*

Abstract

In the region of Manankazo-Tampoketsa, situated in the North-West of the High Lands of Madagascar, the landscape generally presents a state of important degradation of the vegÉtation and the soils (yearly burnt meadow withered by a long dry season of 6 months). The research was carried out to compare the effectiveness of different leguminous shrubs fallows (16 months) to improve the fertility of degraded soil and its resistance to rainfall erosion. The results have shown that Tephrosia vogelii *fallow which presented the best quality and quantity of biomass have improved degraded soil more effectively than associated shrubs fallows as* Tephrosia vogelii + Cajanus cajan *and* Tephrosia vogelii + Crotalaria grahamiana.

Keywords : *Madagascar* ; *Leguminous Fallow* ; *Soil Fertility Rehabilitation* ; *Soil Erodibility*.

INTRODUCTION

Dans la région de Manankazo-Tampoketsa, sur les hauts plateaux, au nord-ouest de Madagascar, le paysage général présente un état de dégradation ultime de la végétation : la steppe monospécifique à *Aristida* témoin d'un sol très dégradé. Ce fait est dû au pâturage, aux feux de brousse quasi annuels et à la longue durée de la saison sèche et froide (de mi-avril à fin octobre). Par conséquent, pendant la saison des pluies à caractère fort agressif (intensité maximale de 110 mm/h), les sols ferrallitiques dégradés désaturés, sensibles à l'érosion, subissent une forte érosion. Il en résulte une baisse importante de la fertilité des sols et la faible productivité des sols engendre une situation de pauvreté pour les rares paysans occupant cette vaste zone.

Aussi, les enseignants-chercheurs de la division Gestion conservatoire des eaux et des sols de l'ESSA-Forêts ont-ils décidé de collaborer avec le FOFIFA (Centre national de recherche pour le développement rural) afin de mener une recherche sur la restauration de la fertilité des sols dans cette zone de grande étendue, encore disponible pour l'agriculture.

L'objectif de notre recherche est de comparer diverses pratiques de jachères légumineuses arbustives et d'en déduire les plus efficaces pour l'amélioration de la fertilité des sols dégradés et de leur résistance à l'érosion.

1. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les différents agroécosystèmes étudiés (jachères légumineuses arbustives) sont :

- parcelle PE1 : jachère associée de *Tephrosia vogelii* + *Cajanus cajan*, durant 16 mois ;
- parcelle PE2 : jachère associée de *Tephrosia* + *Crotalaria grahamiana*, durant 16 mois ;
- parcelle PE3 : jachère de *Tephrosia vogelii* uniquement, durant 16 mois ;
- parcelle PTE : parcelle témoin de prairie nue, dégradée par les feux de brousse annuels.

La méthodologie d'étude adoptée était basée sur :

- l'étude des caractéristiques physico-chimiques et hydriques du sol à la fin de la période de jachère et après enfouissement de la biomasse de jachère dans le sol ;
- l'étude de l'érosion sous pluies naturelles, après enfouissement de la biomasse, mesures sur sol nu et sur sol couvert de paillage.

Les parcelles de mesures d'érosion sont disposées sur une pente de 5 %. Chaque parcelle mesure 20 m x 10 m (20 m selon la plus forte pente). À l'aval, la mesure d'érosion par des cuves collectrices a été effectuée après chaque pluie tombée.

2. RÉSULTATS

2.1. Analyse physico-chimique et hydrique des sols avant et après enfouissement de la biomasse

Il apparaît d'une manière générale que la jachère constituée en totalité de *Tephrosia vogelii* (PE_3) présente l'amélioration de fertilité du sol la plus élevée par rapport au témoin de prairie dégradée par les feux (fertilité chimique et physico-hydrique). On l'explique à la fois par la meilleure qualité de la composition minérale de la biomasse et par sa quantité la plus abondante.

La jachère associée de *Cajanus cajan* + *Tephrosia vogelii* (PE_1) suit de près la jachère de *Tephrosia vogelii* et la jachère associée de *Tephrosia vogelii* + *Crotalaria grahamiana* se situe en dernier rang.

Tab. 1. Analyse chimique des sols avant et après enfouissement de la biomasse et avant mesure d'érosion

Par-celle	Mesure	C %	Mo %	N %	P ppm	Mg $Cmolkg^{-1}$	Ca $Cmolkg^{-1}$	K $Cmolkg^{-1}$	Na $Cmolkg^{-1}$	SB $Cmolkg^{-1}$	S/T %	CEC $Cmolkg^{-1}$	pH
PE3	avant enfoui.	3,93	6,84	0,182	2,7	0,259	0,31	0,095	0,026	0,69	12,3	5,6	4,78
	après enfoui.	4,42	7,69	0,252	31,5	0,368	0,755	0,274	0,056	1,453	18,4	7,9	5,91
PE1	avant enfoui.	3,86	6,72	0,196	1,4	0,265	0,35	0,131	0,039	0,785	13,8	5,7	4,98
	après enfoui.	4,2	7,31	0,24	25,2	0,390	0,705	0,261	0,06	1,416	18,9	7,5	5,81
PE2	avant enfoui.	3,76	6,54	0,189	3,5	0,230	0,335	0,138	0,035	0,738	13,2	5,6	4,81
	après enfoui.	4,1	7,13	0,227	25	0,358	0,635	0,233	0,043	1,269	18,1	7	5,68
PTE	avant érosi.	3,1	5,39	0,15	0,9	0,032	0,071	0,049	0,020	0,172	4,64	3,9	4,42

2.2. Évaluation de la susceptibilité à l'érosion des sols nus améliorés par enfouissement de jachère légumineuse de courte durée

Tab. 2. Comparaison d l'érosion obtenue sur sol nu amélioré par enfouissement de jachère légumineuse de 16 mois par rapport au témoin prairie dégradée par les feux (PTE)

Parcelles	Érosion sur sol nu en t/ha/an	Rapport érosion sur PTE / érosion sur sol nu de jachère
PE3 *(Tephrosia)*	9,77	15,4
PE1 *(Tephrosia +Cajanus)*	12,90	11,6
PE2 (*Tephrosia + Crotalaria)*	14,44	10,4
PTE (Prairie dégradée)	150,20	—

L'érosion totale mesurée sur les parcelles nues améliorées par enfouissement de biomasse de jachère légumineuse arbustive est fortement réduite (9,8 à

14,4 t/ha/an). Elle se situe à la limite du seuil tolérable (2 à 12 t/ha/an) même si la surface du sol est nue.

L'érosion sur les parcelles de jachères légumineuses est diminuée de 10 à 15 fois par rapport à l'érosion obtenue sur la parcelle témoin de prairie brûlée annuellement. C'est la parcelle de jachère à espèce unique de *Tephrosia vogelii* qui réduit au minimum l'érosion du sol. Ainsi, elle améliore le plus efficacement la résistance du sol à l'érosion.

2.3. Évaluation de la susceptibilité à l'érosion des sols améliorés par enfouissement de jachère légumineuse et couverts de paillage

Tab. 3. Comparaison de l'érosion obtenue sur sol paillé et amélioré par enfouissement de jachère légumineuse de 16 mois par rapport au témoin prairie dégradée par les feux (PTE)

Parcelles	Érosion en t/ha/an	Rapport Érosion sur PTE/Érosion sur sol de jachère paillé
PE3 paillée *(Tephrosia vogelii)*	0,003	50 067
PE1 paillée *(Tephrosia vogelii + Cajanus cajan)*	0,005	30 040
PE2 paillée (*Tephrosia vogelii + Crotalaria)*	0,009	16 689
PTE (Prairie dégradée nue)	150,2	—

Lorsque le sol amélioré par enfouissement de jachère légumineuse arbustive est recouvert de paillage, l'érosion devient quasi nulle. Elle est réduite de 17 000 à 50 000 fois par rapport à l'érosion sur sol de prairie dégradée par les feux. On en déduit que l'efficacité de l'enfouissement de jachère légumineuse sur la réduction de l'érosion est nettement accrue si le sol est couvert de paillage.

CONCLUSION

Les résultats ont montré qu'en 16 mois seulement, la pratique de jachère légumineuse arbustive peut améliorer nettement la fertilité des sols fortement dégradés par les feux de brousse annuels et améliorer sa résistance à l'érosion. Ces résultats pourront être diffusés aux paysans pour contribuer au développement durable, d'autant plus que ces techniques biologiques améliorantes ne nécessitent pas d'investissement financier et technique coûteux. Les effets bénéfiques de ces jachères légumineuses arbustives peuvent être appliqués dans les autres zones à sols dégradés de Madagascar, mais aussi dans les zones similaires en Afrique.

Références bibliographiques

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

DUCHAUFOUR H., SIMONART T., 1993. La conservation des sols en milieu paysan Burundais – Étude et hiérarchisation des stratégies antiérosives. *Bull. Réseau Erosion*, Montpellier n° 13 : 71-83.

KÖNIG D., 1990. Contributions des méthodes agroforestières à la lutte anti-érosive au Rwanda – Université de Mainz – *Bull. Réseau Erosion* n° 11 : 185-191.

LE BISSONNAIS Y., 1996. Soil characteristics and aggregate stability. In AGASSI, (ed.): *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York: Dekker, 41-60.

QUANSAH C., AMPONTUAH E., 1999. Soil fertility erosion under different soil and. residue management systems: a case study in the semi-deciduous forest zone of Ghana. Soil Research Institute, Kwadaso, Kumasi, Ghana, *Bull. Réseau Erosion* n° 19 : 111-136

RAHELIARISOA M.A., 1986. *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. Expérimentation au champ sous pluies simulée*s. Thèse de doct. de 3e cycle. Univ. d'Orléans. France, 197 pp.

REBOUL J.L., 1999. Systèmes de cultures sans labour par semis direct sur couvertures permanentes des sols, adaptation et diffusion à Madagascar. CIRAD, Madagascar. *Bull Réseau Erosion,* 19 : 441-455

ROOSE E., SABIR M., LAOUINA A., KARKOURI A.J., 2000. Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée de Beni Boufrah - Rif Central (Maroc). IRD Montpellier. France. *Bull. Réseau Erosion* n°20 : 342 –356

ROOSE E., BARTHES B., PRAT C. *ET AL.*, 2000. Agrégation du sol, ruissellement et érosion à l'échelle parcellaire dans trois régions intertropicales (Bénin, Cameroun, Mexique). IRD Montpellier, *Bull. Réseau Erosion* n° 20 : 373-387.

ROOSE E., DIALLO D., BARTHES 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.

YOUGMA F.R., 1994. Le développement du rôle du NEEM en association avec les cultures. Projet UNSO « Bois collectifs et familiaux ».

KOUDOUGOU, Burkina Faso. *Bull. Réseau Erosion* n° 14 : 334-344.

STRATÉGIES TRADITIONNELLES DE GESTION CONSERVATOIRE ET DE RESTAURATION DES SOLS AU VIETNAM

Ha PHAM QUANG*, Simon POMEL, Nguyen VAN THIET*, Didier ORANGE***, Pascal PODWOJEWSKI*** et Tran DUC TOAN***

** Institut des sols et des fertilisants (NISF), Dong Ngac Tu liem Hanoi, Vietnam ; pqha-nisf@hn.vnn.vn*
*** CNRS, UMR 5185 ADES-DyMSET, université de Bordeaux-III, France*
**** IRD-Vietnam, ambassade de France, 57 Tran Hung Dao, Hanoi, Vietnam*

Abstract

It is generally accepted that deforestation and mismanagement of sloping land are among the main reasons of soil erosion and soil productivity decrease. Meanwhile local people who are leaving for long in their own land have their own way to produce food and protect their land since centuries. We call these knowledge "indigenous or traditional knowledge". This paper reported the results collected from field survey through different works in Northern Vietnam, where minorities have long traditions to cultivate in mountainous areas. Descriptive analysis showed that different techniques may be combined, traditional with conventional methods to protect land and sustain soil productivity. It seems that agro-forestry with some basic minimum inputs together with traditional way is one of the promising technical solution.

Keywords : *Northern Vietnam* ; *GCES* ; *Indigenous Knowledge* ; *Soil Restoration* ; *Mountains Minorities*.

INTRODUCTION

Dans les pays d'Asie et notamment dans le Nord-Vietnam, les minorités ethniques des zones de montagnes ont depuis longtemps mis au point des techniques antiérosives, afin de stabiliser la productivité agricole : rizières en terrasse développées par les H'mong, jachères de longue durée pour améliorer la fertilité des sols, utilisées par les minorités Thai, Tay, Nung et Dao, développement du semis en décalé en zone de montagne depuis les années soixante. Mais la croissance rapide de la population vietnamienne (2,5 % à 3,0 % par an, de 1970 à 1980) a entraîné un exode de la population des plaines vers les montagnes et accéléré la déforestation. La destruction des écosystèmes forestiers et la diminution de la période de jachère ont engendré une rupture des équilibres biologiques et physico-chimiques, accélérant ainsi les phénomènes érosifs en zone de montagne. La perte de fertilité des sols engendrée par l'érosion a entraîné une

chute spectaculaire des rendements agricoles et s'est répercutée sur l'alimentation humaine. L'érosion est la principale cause de la baisse de fertilité du sol.

De nombreux chercheurs ont estimé qu'au Vietnam, environ 5,5 millions d'hectares sont touchés par de graves problèmes d'érosion, 4,6 millions d'hectares par des problèmes mineurs (Cuc 1994, Hong, 1994, Phien *et al.* 1997) et 4,6 millions d'hectares également par des problèmes d'érosion intermédiaires aux deux premiers. Les études ont aussi montré que pour des cultures à cycle court (inférieur à trois années), les pertes en sol en zone de montagne sont comprises entre 40 t/ha et 100 t/ha par an. Dans les systèmes n'utilisant pas de méthodes antiérosives, la dégradation des sols a fait décliner la productivité agricole de 20 % à 60 % (Thiet et Tam 2002).

L'objectif actuel est donc d'expérimenter et de transmettre de nouvelles techniques agricoles durables au milieu rural par l'utilisation de haies de plantes indigènes ou introduites : légumineuses, graminées, théiers, arbres fruitiers, construction de murs en pierres. Mais la diffusion et la mise en commun de ces connaissances dans les villages voisins restent encore quasi inexistantes.

Ce document donne des connaissances autochtones des minorités montagnardes du Nord-Vietnam, lesquelles seront analysées et adaptées à chaque situation, dans le but de protéger les sols et d'augmenter la production agricole des zones de montagnes.

1. MILIEU D'ÉTUDES ET MÉTHODES

Les enquêtes, observations de terrain ont été faites sur les systèmes de production montagnards, en se basant sur les connaissances autochtones des minorités ethniques de la province de Yen Bai (district de Van Chan et Mu Cang Chai) et dans la province de Ha Giang (district de Vi Xuyen) du Nord-Vietnam, en vue de diagnostiquer des techniques antiérosives mises en place et la valorisation de l'agroforesterie.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les techniques culturales sont un élément décisif de l'érosion des sols. Au Nord du Vietnam, il existe trois méthodes principales.

2.1. La culture itinérante et nomade

C'est une méthode de culture peu élaborée. On plante sans engrais et on exploite la fertilité naturelle du sol. Quand le sol s'est appauvri en éléments nutritifs, alors, on va chercher un nouveau terrain à cultiver. Ce type de culture est appliqué par les ethnies H'mong, Dao... La culture itinérante provoque une forte déforestation et engendre une forte érosion.

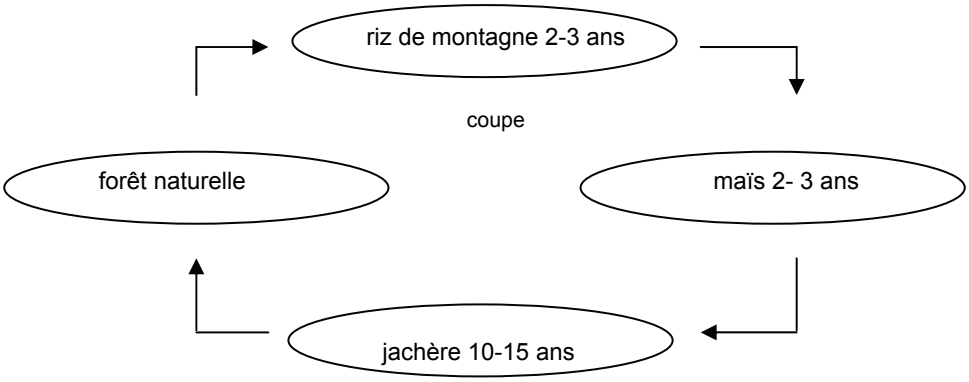
2.2. La culture itinérante en abattis/brûlis

La culture itinérante est la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents à une époque où la population était très peu dense. Après défrichement, on cultive sur les cendres et on abandonne la terre dès qu'elle ne donne plus assez de

rendements. Si le temps de jachère est suffisamment long (environ de 15 ans à 20 ans), on pratique le cycle A (avec la succession riz-maïs-jachère avant 1990). Cette stratégie est bien adaptée à des densités inférieures à 40 habitants/km². Néanmoins, la croissance rapide de la population a entraîné, avec la diminution du temps de jachère, une dégradation progressive du sol. Le cycle de la culture itinérante n'est plus adapté et on adopte le cycle B (avec la succession riz coplanté de larmille-maïs-jachère après 1990).

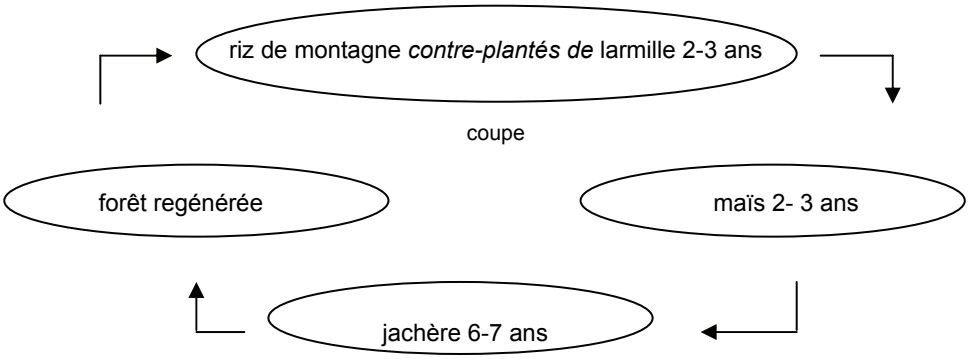
Les cycles des cultures itinérantes de l'ethnie H'mong, district de Mu Cang Chai, Yen Bai

A. Cycle de culture riz-maïs-jachère avant 1990



(coefficient d'usage du sol R = 40 %)

B. Cycle de culture riz coplanté de larmille-maïs-jachère après 1990



(coefficient d'usage du sol R = 40 %)

Dans le district Mu Cang Chai, Yen Bai, la croissance rapide de la population a entraîné une diminution du temps de jachère de 10 ans à 15 ans (cycle A) à 6-7ans (cycle B). Par contre, le coefficient d'usage du sol a augmenté de 40 % (cycle A) à 66 %-85 % (cycle B). Le sol de cycle B se dégrade plus vite que celui de cycle A.

Tab. 1. Effet économique pour la culture itinérante et itinérante en abattis/brûlis (ha/an)

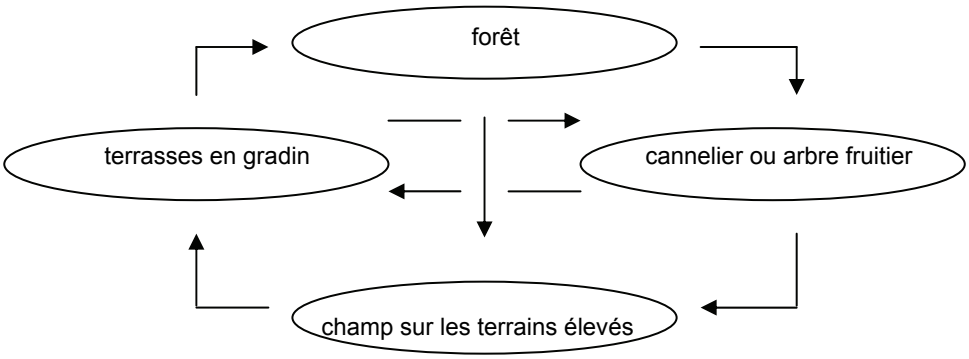
Usage des sols	Valeur produite (1 000 VND)	Coût des entrées (1 000 VND)	Valeur ajoutée (1 000 VND)
Mais	4 098,5	285,0	3 813,5
Riz de montagne	3 126,0	375,0	2 751,0
Larmille (Y Di)	1 050,0	0	1 050,0

La culture itinérante n'a pas besoin de fond de production, mais elle provoque une forte déforestation et engendre une forte érosion.

2.3. Agroforesterie

Ce modèle est fait par des ethnies qui cultivent le riz dans les vallées ou en terrasses, à proximité d'une source ou en murets de pierres sur les versants. Ce modèle est très souvent pratiqué par les ethnies H'mong, Thai, Tay, Nung, Dao, Muong... dans les zones de montagnes au nord du Vietnam. On cultive principalement le riz irrigué, un autre usage du sol est secondaire. Néanmoins, on plante le maïs ou le riz de montagne pour compléter les ressources alimentaires durant la saison sèche (cycle C).

C. Le cycle agro-forestier par ethnie de Dao au district de Van Chan, Yen Bai et ethnie Tay au district de Vi Xuyen, Ha Giang



Dans ce cycle, les agriculteurs ont une bonne connaissance du milieu naturel et des techniques antiérosives (jachères courtes avec haies vives légumineuses,

fruitiers ou même théier), la rotation des cultures ou assolement avec une technique de cultures bien maîtrisée (fumiers/petits intrants/variétés améliorées…).

On trouve un modèle pour toutes les zones tropicales recevant suffisamment de pluie durant l'année. C'est un modèle de culture stable mais peu adapté pour d'autres zones de montagnes.

Tab 2. Effet économique pour l'agro-foresterie (ha/an)

Usage des sols	Valeur produite (1 000 VND)	Coût des entrées (1 000 VND)	Valeur ajoutée (1 000 VND)
Cannelle avec rizière en jardin	20 550	8 155	12 395
Longane avec rizière en jardin	26 260	10 375	15 885
Orange avec rizière en jardin	30 750	15 250	15 500
Acacia montana avec longane et rizière en jardin	36 560	17 000	19 560
Acacia montana avec orange et rizière en jardin	41 050	21 875	19 175
Styrax avec longane et rizière en jardin	32 000	16 355	15 645
Styrax avec orange et rizière en jardin	36 490	21 230	15 260

Les systèmes agroforestiers donnent un effet économique positif ressentis dans la vie de chaque foyer de paysan. Néanmoins, il a besoin de beaucoup de fonds de production.

3. STRATÉGIE DE GESTION CONSERVATOIRE DES TERRAINS DE MONTAGNE

3. 1. Solution politique

On constate que les méthodes traditionnelles ont des effets bénéfiques et sont bien acceptées par les agriculteurs des hautes terres. Néanmoins, un accord politique est nécessaire pour relier la politique avec les règlements intérieurs du village et pour planifier le développement socio-économique de chaque zone.

3.2. Solution technique

Il convient de rétablir la fertilité du sol par la jachère et la mise en place de haies vives. Parmi les solutions techniques possibles : plantations en courbe de niveaux et assolements, développement de toutes les méthodes conservatoires traditionnelles utilisées actuellement dans chaque zone, développement d'un système d'agroforesterie pour reconstituer la couverture végétale de chaque zone éco-géographique.

3.3. Solution de diffusion

Expliquer les nouvelles techniques aux agriculteurs est un point essentiel. Il est nécessaire de construire des réseaux d'encouragement pour l'agriculture dans les villages et de publier des documents, des livres sur les nouvelles techniques dans les langues et les dialectes autochtones.

Références bibliographiques

CUC L.T., 1995. Rétablir des sols dégradés dans la zone de montagne et moyenne montagne du Nord-Vietnam. Les problèmes d'écologie humaines au Vietnam, Maison d'édition de l'agriculture, Ha Noi.

HONG N. H. 1994. Exploiter, protéger et augmenter de la fertilité des terres de montagnes, Province de Bac Thai. 2e Séminaire National sur l'usage des sols, Bac Thai, septembre 1994.

PHIEN T., SIEM N. T., TOAN T.D., 1997. Soil Degradation and Soil Erosion Control on Sloping Lands in Vietnam, Contour ASOCON, 9 , 1: 15-19.

THIET N.V., TAM T. T., 2002. Nouvelle technique pour le développement socio-économique et rural de la montagne au Nord-Vietnam. Centre d'étude pour le développement, ministère Science et Technologie. Hanoi. 2002

STRATÉGIES TRADITIONNELLES DE GESTION DE L'EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS AUTOUR DE LA VILLE DE MOKOLO, MONTS MANDARA (NORD-CAMEROUN)

Michel TCHOTSOUA* et Jean-Marie FOTSING**

** Géographe, université de N'Gaoundéré, B.P. 553, N'Gaoundéré, Cameroun ; tchotsoua@yahoo.fr*
*** Géographe, université d'Orléans ; Jean-Marie.Fotsing@orleans.ird.fr*

Abstract

In the Mandara mountain context of very old and continuous human occupation, the rural populations developed effective traditional techniques around terraces and stone bunds to protect the ground of hillslopes against erosion and to maintain a subsistence agriculture. This communication appreciates these current techniques and their evolutions from field investigations and observations around the city of Mokolo.

Keywords : *Northern Cameroon* ; *Traditional Knowledge* ; *GCES* ; *Mandara Mountain*s.

INTRODUCTION

Cette communication s'inscrit dans le cadre d'une évaluation générale des stratégies de lutte antiérosive en milieu soudano-sahélien tchado-camerounais soutenue par le réseau Érosion de l'AUF. Il s'agit de montrer comment, dans un contexte montagnard d'occupation très ancienne et continue, des populations rurales ont su mettre en place des techniques traditionnelles efficaces pour protéger les sols des fortes pentes et maintenir une agriculture de subsistance. Ces stratégies s'inscrivent dans le cadre de rapports étroits entre paysans dans un contexte foncier particulier. Pour ce faire, nous allons présenter le contexte naturel et humain, les aménagements traditionnels en relation avec les transformations actuelles.

1. UN CONTEXTE MONTAGNARD FORTEMENT PEUPLÉ

Situés en bordure du Nigeria, entre 3° et 10° N, 13° et 14° E, les monts Mandara dominent les plaines de la province de l'Extrême-Nord du Cameroun par une dénivellation de près de 500 m. Leur qualificatif de montagne est donc surtout redevable aux versants raides et aux incisions vigoureuses des rivières qui les compartimentent. Cet ensemble de moyenne montagne qui se définit par opposition aux pédiments, plaines et vallées qui le bordent ou le pénètrent,

culmine au nord, dans les massifs du pays Mafa : 1 494 m au mont Oupay, 1 436 m au mont Ziver, 1 349 m au Touropou, et 1 328 m au Rouva (Morin 1998).

Les monts Mandara sont une collection de plateaux et d'inselbergs que cernent des remparts montagneux, que mordent de profondes vallées et dépressions bordières, et qui se résolvent en monticules sur les piémonts et plaines environnantes. Ils sont plus arrosés et ont une variété floristique plus fournie que les plaines environnantes (Boulet *et al.*, 1984 ; Hiol et Mietton, 2001).

Dans ces massifs, les densités démographiques sont, à certains endroits, parmi les plus importantes du Cameroun. Une douzaine de cantons des monts Mandara septentrionaux accusent encore en 2005 des densités supérieures à 200 hab./km². Les densités dépassent même 250 hab./km² dans certains massifs comme l'arc de montagne au nord de Mokolo. On retrouve aussi des densités très fortes dans les massifs de bordure de Wazang à Mbokou et un record dans les massifs Podokwo et Kirdi Mora à l'extrémité septentrionale avec plus de 250 hab./km².

2. DES ACTIVITÉS AGRICOLES CONTINUES DANS LE TEMPS

Qu'ils fassent du sorgho chaque année ou l'alternent avec du mil pénicilaire, qu'ils s'agissent de champs de montagnes ou de ceux du piedmont, les paysans ne laissent jamais leur terre au repos. L'absence de jachère caractérise leur système agricole. La base de cet agrosystème très performant est constituée par les sorghos adaptés aux lithosols, par la production poussée de légumineuses comme les niébés, par la gestion serrée d'un parc arboré sélectionné ainsi que la reconversion d'un élevage de bovins libres en celui de bœufs de case. Les paysanneries de montagne délimitèrent autant d'isolats qu'il y avait de massifs. Cette mise en cultures ininterrompues, depuis des siècles ou des décennies, d'arènes granitiques ou de sols colluviaux est étonnante de prime abord.

3. DES AMÉNAGEMENTS APPROPRIÉS

L'aménagement des pentes en terrasses, caractéristique majeure des massifs septentrionaux et la permanence des cultures qui y sont associées sont à la fois cause et conséquence des plus fortes charges démographiques et une ingénieuse activité agricole. Comme dans de nombreuses régions d'Afrique, la nécessité de capitaliser sur place la croissance démographique et de répondre à ses besoins a débouché sur une pérennisation de l'agriculture. Il a fallu faire appel à des techniques de production intensive, les terrasses s'intégrant dans ce schéma

agronomique du fait de la disponibilité de la matière première que sont les blocs rocheux et le fumier.

Dans cet article, il est question de recenser les types de stratégies traditionnelles de gestion de la fertilité des sols et de l'eau, d'apprécier leur évolution actuelle. Pour ce faire, deux options avaient été envisagées : faire l'inventaire dans toute la zone ou procéder par massif afin de mieux cerner les variations. La dernière option a été en définitive adoptée. Et le massif de Mokolo a été retenu pour faire l'objet de cette communication.

Les enquêtes et relevés de terrain ont été faits au mois de septembre 2005, juste après les récoltes. Ce qui a permis de voir les parcelles qui ont été exploitées et les types d'aménagement. Sur un rayon d'environ 7 km autour de la ville de Mokolo (constituant ce qui est généralement appelé massif de Mokolo), 720 parcelles appartenant à 347 acteurs ont été identifiées et parcourues avec les propriétaires ou le guide recruté dans chaque village, donc connaissant les zones agricoles et les propriétaires des parcelles. Les enquêtes auprès des propriétaires ou des guides ont permis de connaître les types d'intrants utilisés pour fertiliser les terres, les raisons des abandons de certaines parcelles.

Sur les 720 parcelles visitées, 7 % ont été abandonnées au cours de l'année 2005 à cause essentiellement du vieillissement de la main-d'œuvre. « *Les enfants s'en vont et nous n'avons plus la force de tout faire* », déclare Sali, un agriculteur de 67 ans. En dehors des 34 parcelles — jardins de case — qui ne sont pas aménagées, les autres portent des cordons pierreux. 459 parcelles sont fertilisées : 10 à la fumure prélevée dans les dépotoirs des ordures ménagères dans la ville de Mokolo, 20 aux engrais chimiques, 429 à la fumure animale (parcage, fientes de poules, déchets de cuisines…).

On peut relever que l'agriculture est étroitement liée à la présence des pierres. Entre les mois d'avril et mai, les parcelles sont soigneusement aménagées, les pierres réarrangées en cordons (photo 1) après le passage des bovins ou du petit ruminant à la recherche des éteules (résidus de culture). Les replats des terrasses sont légèrement inclinés vers l'intérieur afin de retenir l'eau et assurer leur infiltration. Sur les secteurs à pente faible, les paysans pratiquent le parcage, tandis que, sur les secteurs pentus, ils apportent des fertilisants naturels (fientes de poules, déchets de cuisines et cendres) qu'ils déposent sur les replats, autour des jeunes plantes de mil.

Le sarclage est aussi un moment important de la fertilisation du sol, car les herbes sont soigneusement entassées sous les plantes et recouvertes généralement de terre, ce qui accélère leur décomposition en saison des pluies. Les parcelles appartenant aux citadins ou se trouvant à proximité de la ville de Mokolo sont de plus en plus fertilisées à l'aide des déchets urbains ou des engrais chimiques achetés au Nigeria voisin.

CONCLUSION

De l'analyse fine des techniques agricoles et des enquêtes auprès de ces acteurs ingénieux, il ressort que le maintien de la fertilité des sols est lié à l'intensité des soins à la terre et à l'adaptation au milieu, à la gestion de la fumure, aux

aménagements pour retenir l'eau et les nutriments. Cependant, une interrogation pèse sur leur pérennisation, suite à la paix retrouvée, à l'ouverture de la région à la modernité et à la migration des populations vers les plaines et vers les villes.

Références bibliographiques

BOULET J., BEAUVILAIN A., COUTY P., HALLAIRE A., BOUTRAIS J., 1984. *Le Nord du Cameroun, des hommes, une région*. ORSTOM, Paris, 551 pp.

HALLAIRE A., 1991. *Paysans montagnards du Nord-Cameroun : les monts Mandara,*. Orstom, Paris, 253 pp.

LOULEO J., 1997. *Emigration des Kirdi des monts Mandara ; le cas des Mafa de Soulédé*, thèse de doctorat 3e cycle, Université de Yaoundé I, 164 pp.

MORIN S., 1998. Géomorphologie. In : *Atlas de la province de l'Extrême-Nord-Cameroun*, 1-49.

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 : F. Bart, S. Morin, J.-N. Salomon *(édit.), Les montagnes tropicales : identités, mutations, développement.* Coll. « Espaces Tropicaux » n° 16 *:* 323 – 354, Pessac.

RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE DE LA COMBINAISON DES MESURES DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS AVEC LA GESTION DES NUTRIMENTS EN ZONE SEMI-ARIDE DU BURKINA FASO

R. ZOUGMORE*, O. MANDO, L. STROOSNIJDER*** et E. OUEDRAOGO******

** Institut de l'environnement et de recherches agricoles (INERA), 04 B.P. 8645, Ouagadougou, 04 Burkina Faso, robert.zougmore@messrs.gov.bf*
*** International Center for Soil Fertility and Agricultural Development (IFDC), Division Afrique, B.P. 4483, Lomé, Togo, amando@ifdc.org*
**** Wageningen University, Erosion and Soil & Water Conservation Group, Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen, The Netherlands, leo.stroosnijder@wur.nl*
***** Centre écologique Albert Schweitzer (CEAS), 01 B.P. 3306, Ouagadougou 01, Burkina Faso, oelisee@hotmail.com*

Abstract

A study conducted in 2001 and 2002 at Saria, Burkina Faso, assessed the combined effects of two types of semi-permeable barriers (stone rows and grass strips of Andropogon gayanus) and the application of compost or urea on sorghum performance and economic benefits. Installation of stone rows or grass strips without addition of nutrient inputs was not cost effective although it induced sorghum yield increase (12%-58%) particularly under poor rainfall conditions. Combining compost with stone rows or grass strips significantly increased sorghum yield that induced positive interaction effects (Mean added effects of 185 kg ha^{-1} for stone rows combined with compost-N and 300 kg ha^{-1} for grass strips combined with compost-N). Economic benefits were substantial (109 480 F CFA ha^{-1} to 138 180 F CFA ha^{-1}) when compost-N was added to both stone rows and grass strips. This may provide farmers with capital to invest in soil management and may also contribute to poverty alleviation in sub-Saharan Africa.

Keywords : *Burkina Faso* ; *Stone Row* ; *Grass Strip* ; *Nitrogen Input* ; *Added Benefit* ; *Sahel*.

INTRODUCTION

La dégradation des sols et l'appauvrissement en éléments nutritifs n'ont de cesse augmenté et sont devenus de sérieuses menaces pour la productivité agricole en Afrique subsaharienne (Vanlauwe *et al.*, 2002). Dans la zone semi-aride ouest-africaine, l'efficience d'utilisation des éléments nutritifs des plantes dans les systèmes de culture céréalière est souvent très faible à cause de mauvaises conditions d'humidité de sol (Buerkert *et al.*, 2002). La faible qualité du sol combinée aux conditions climatiques sahéliennes rudes ont conduit à une faible efficience des

engrais minéraux (Breman *et al.*, 2001). Pour être rentable, l'application des nutriments dans les zones semi-arides devrait être combinée avec des systèmes de collecte et de conservation de l'eau ou encore des systèmes d'irrigation à petite échelle (Dudal, 2002). Aussi, les travaux de Zougmoré *et al.* (2002) indiquent que les impacts bénéfiques des mesures de conservation des eaux et des sols (CES) telles que les cordons pierreux sur la productivité du sol sont limités sous culture continue de céréales sans fertilisation. Cela implique qu'il n'y a pas d'utilisation efficiente des nutriments sans une bonne gestion de l'eau et vice versa.

En outre, le manque de motivation économique a été l'une des contraintes majeures à une plus grande utilisation des sources de nutriments des plantes en Afrique subsaharienne. L'interaction des mesures de CES avec les sources organiques ou minérales de nutriments peut booster la production agricole et par conséquent, pourrait être économiquement bénéfique pour les paysans.

Ce travail a pour but d'analyser les bénéfices additionnels de la combinaison des mesures de CES avec les fertilisants organiques ou minéraux durant deux saisons de cultures successives en zone semi-aride du Burkina Faso. Il a été formulé l'hypothèse que l'application des mesures de CES peut augmenter les effets bénéfiques des intrants organiques ou minéraux dans les systèmes de cultures des petites exploitations agricoles du Sahel.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le dispositif d'étude était situé dans la station de recherche agricole de Saria (12° 16' N, 2° 9' W, 300 m altitude), au Burkina Faso. La pluviosité annuelle au cours des trente dernières années est en moyenne de 800 mm. L'essai (2001-2002) a consisté en un bloc de Fisher randomisé avec neuf traitements, où deux types de barrières semi-perméables (cordons pierreux et bandes enherbées à *Andropogon gayanus* Kunth *cv. Bisquamulatus* [Hochst.] Hack.) étaient combinés avec l'application de compost ou d'urée. Chaque parcelle (100 m de long et 25 m de large) était isolée par une diguette en terre de 0,6 m de hauteur. Les cordons pierreux et les bandes enherbées ont été installés sur les courbes de niveau durant la saison pluvieuse 1999, avec un écartement entre lignes de 33 m (c'est-à-dire trois barrières par parcelle). Le compost était appliqué chaque année avant le semis à une dose équivalente à 50 kg N ha^{-1} (4 800 kg ha^{-1} en 2001 et 5 600 kg ha^{-1} en 2002). L'urée était aussi appliqué à la dose de 50 kg N ha^{-1} en deux temps (25 kg N ha^{-1} appliqué 21 jours après semis et 25 kg N ha^{-1} 56 jours après semis). Toutes les parcelles ont reçu un apport de base de 20 kg P ha^{-1} (TSP) pour éliminer la déficience en phosphore comme facteur dans l'expérimentation. La variété améliorée de sorgho Sariasso 14 (*Sorghum bicolor* [L.] Moench), de 110 jours a été semée manuellement en lignes perpendiculaires à la pente sur toutes les parcelles, à la densité de 31 250 poquets par hectare.

Considérons x_1 = cordons pierreux ou bandes enherbées, x_2 = application de N-compost ou de N-urée, x_0 = témoin (sans CES, ni intrant N), Y= rendement, (x_1+x_2) = combinaison CES (x_1) et N-compost ou N-urée (x_2). Partant des définitions d'« effet additionnel » et d'« effet interactif » par Vanlauwe *et al.* (2002), Giller (2002) et Iwuafor *et al.* (2002), nous considérons que l'effet interactif (EI) sur le rendement de culture est le bénéfice en rendement de culture (en comparaison au

traitement témoin) de l'application combinée des mesures de CES et de l'urée ou du compost ($\Delta Y(x_1 + x_2)$) moins la somme des bénéfices obtenus avec les deux composantes (ΔYx_1 et ΔYx_2) quand elles sont appliquées isolement.

$$\Delta Yx_1 = Y(x_1) - Y(x_0) \quad (1)$$

$$\Delta Yx_2 = Y(x_2) - Y(x_0) \quad (2)$$

$$\Delta Y(x_1 + x_2) = Y(x_1 + x_2) - Y(x_0) \quad (3)$$

$$IE = \Delta Y(x_1 + x_2) - (\Delta Yx_1 + \Delta Yx_2) \quad (4)$$

Il y a interaction positive entre x_1 et x_2 quand EI > 0, et interaction négative entre x_1 et x_2 quand EI < 0. Pour pouvoir déterminer le gain économique des mesures de CES ou des apports d'intrants N appliqués seules ou en combinaison, un rendement économique minimal a été calculé par traitement. Il correspond au rendement excédentaire minimum qui supporterait le coût annuel de l'application de la technologie. À cet effet, le rendement excédentaire par kg de N ($\Delta Y/\Delta N$) a été calculé pour les 50 kg N ha^{-1} d'urée ou de compost. ΔY représente le rendement excédentaire et ΔN la quantité de N appliqué c a d 50 kg N ha^{-1}.

$$\Delta Y/\Delta N\ (x_2) = \Delta Y(x_2)/50 \quad (5)$$

En 2001 et 2002, le prix d'1 kg d'azote-urée (N-urée) était en moyenne de 544 F CFA (1 euro = 656 FCFA). La moyenne de 140 F CFA par kg de sorgho et un minimum de 3,9 kg de sorgho par kg de N-urée ont été utilisés dans cette étude. Le coût annuel actualisé pour l'installation des cordons pierreux (transport des moellons avec un camion) était estimé à 48 312 F CFA ha^{-1}, tandis que l'installation des bandes enherbées (méthode de transplantation des éclats de souches) était de 26 240 F CFA ha^{-1} an^{-1}. Le coût annuel actualisé pour l'établissement d'une fosse compostière était évalué à 37 900 F CFA ha^{-1} et le prix d'un kg de N-compost atteignait 758 F CFA. Les rendements en grain et en paille de sorgho étaient mesurés après séchage au soleil sur l'ensemble des 36 placettes délimitées dans chacune des parcelles.

Le logiciel STATITCF a été utilisé pour l'analyse statistique avec l'ANOVA et le test de Newman-Keuls pour la définition des différences significatives entre les traitements au seuil de $p < 0,05$.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Effet des mesures de CES et de la gestion des nutriments sur la performance du sorgho

Les rendements de sorgho étaient significativement différents entre les traitements en 2001 et 2002. En 2001, le rendement avec cordon pierreux seul (T_{SR}) a accru de 12 %, alors qu'avec la bande enherbée seule (T_{GS}), le rendement du sorgho a baissé de 18 % en comparaison au témoin (T_0). En 2002, le cordon pierreux seul a entraîné une augmentation de rendement de 12 % contre une baisse de 15 % avec la bande enherbée seule en comparaison au témoin. En 2001, l'application de compost (T_C) ou d'urée (T_U) seule a fortement augmenté le rendement du sorgho, respectivement par 107 % et 92 % en comparaison au témoin (T_0). Ainsi, l'application de nutriments

seuls (T_C, T_U) a induit des rendements nettement plus élevés que l'installation de barrières de CES sans apport de nutriments : 80 % comparé au cordon pierreux (T_{SR}) et 145 % comparé à la bande enherbée (T_{GS}). En 2002, tout comme en 2001, l'application d'intrant azoté seul (T_C, T_U) a induit des rendements plus élevés que l'application seule de mesures CES. L'application combinée de compost avec des cordons pierreux (T_{SRC}) a entraîné un accroissement de rendement de 106 % en comparaison à l'effet cordon pierreux seul. De même, l'application combinée des bandes enherbées avec le compost a entraîné une augmentation de rendement de 160 % en comparaison à l'effet bande enherbée seule (T_{GS}). Aussi, l'adjonction d'urée aux parcelles avec barrières CES (T_{SRU}, T_{GSU}) a entraîné un accroissement de rendement de 46 % et 71 % en comparaison aux parcelles avec barrières CES seules respectivement (T_{SR}, T_{GS}). En général, seules de petites différences significatives ont été observées entre les traitements combinant les barrières de CES avec les intrants N (T_{SRC}, T_{GSC}, T_{SRU}, T_{GSU}) et les traitements avec application d'intrant N seul (T_C, T_U). Ces résultats ont été confirmés en 2002.

Des interactions positives ($\Delta Y(x1 + x2)$) de la combinaison mesures de CES et application d'intrant-N ont été observées sauf pour les traitements T_{GSU} in 2001 (-367 kg ha^{-1}) et T_{SRU} in 2001 (-437 kg ha^{-1}) et 2002 (-36 kg ha^{-1}). La forte réponse du rendement de sorgho à l'application seule d'intrants N (T_C, T_U) suggère que l'apport de nutriments plus que la rétention d'eau par les barrières filtrantes (T_{SR}, T_{GS}) a entraîné l'accroissement du rendement sur les parcelles combinant mesures de CES et apport de nutriments.

2.2. Rentabilité économique de la gestion de l'eau et des nutriments

L'accroissement de rendement n'a pas permis de couvrir les coûts annuels d'installation des cordons pierreux ou des bandes enherbées (tab. 1). Par contre, le gain économique par traitement a montré que l'application seule de N-compost ou de N-urée étaient rentables, mais l'apport d'urée est apparu moins bénéfique (6 160 F CFA) en 2002 comparé à l'apport de N-compost (13 3040 F CFA). La combinaison des mesures de CES avec l'apport d'urée (T_{SRU}, T_{GSU}) ou de compost (T_{SRC}, T_{GSC}) a induit des revenus économiques positifs en 2001 (tab. 2), montrant qu'au moins, les coûts annuels d'installation des mesures de CES et d'apport de N-compost ou N-urée ont été couverts par les excédents de rendement obtenus avec les traitements combinant les mesures de CES et les apports d'intrants N.

Tab. 1. Rentabilité économique des cordons pierreux seuls ou des bandes enherbées seules en 2001 et 2002 à Saria, Burkina Faso

	Cordon pierreux		Bande enherbée	
	2001	**2002**	**2001**	**2002**
Coût annuel (F CFA ha^{-1})	48 312	48 312	26 240	26 240
Prix moyen du sorgho grain (F CFA kg^{-1})	140	140	140	140
Rendement minimal économique (kg ha^{-1})	345	345	187	187

	Cordon pierreux		Bande enherbée	
ΔY (kg ha^{-1}) [a]	127	144	- 203	- 181
Rendement excédentaire (kg ha^{-1})	- 218	- 201	- 390	- 368
Gain économique (F CFA ha^{-1})	- 30 520	- 28 140	- 54 600	- 51 520

[a]ΔY représente le rendement excédentaire obtenu avec les cordons pierreux ou les bandes enherbées en comparaison au témoin

Tab. 2. Rentabilité économique des combinaisons de cordons pierreux ou de bandes enherbées avec l'apport de N-compost ou de N-urée en 2001 et 2002 à Saria, Burkina Faso

	2001				2002			
	T_{SRU}	T_{GSU}	T_{SRC}	T_{GSC}	T_{SRU}	T_{GSU}	T_{SRC}	T_{GSC}
Rend^t mini. écon. pour les intrants N (kg ha^{-1})	195	195	271	271	195	195	271	271
Rend^t mini. écon. pour les mesures de CES (kg ha^{-1})	345	187	345	187	345	187	345	187
Rend^t mini. écon. pour les mesures CES + les intrants N (kg ha^{-1})	540	382	615	457	540	382	615	457
Rend^t excéd. (kg ha^{-1})	158	54	821	782	- 193	- 135	987	915
Gain écon. (F CFA ha^{-1})	22 120	7 560	114 940	109 480	- 27 020	- 18 900	138 180	128 100

[a]T_{SRC} : cordons + N-compost ; $\mathbf{T_{GSC}}$: bandes enherbées + N-compost ; $\mathbf{T_{SRU}}$: cordons + N-urée ; $\mathbf{T_{GSU}}$: Bandes enherbées + N-urée.

CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude montrent que :

- lorsque la pluviosité annuelle est bien distribuée dans le temps (comme ce fut le cas en 2001 et 2002 à Saria, Burkina Faso), l'installation de cordons pierreux seule a induit des accroissements très limités de rendements de sorgho, tandis que les bandes enherbées à *Andropogon gayanus* ont entraîné une baisse de rendement de sorgho. Ces rendements n'étaient pas suffisants pour supporter les coûts d'installation en raison de la forte main-d'œuvre des frais de transport et du matériel de chantier ;
- l'apport seul de N-compost ou de N-urée a induit des rendements significativement plus élevés de sorgho que les mesures de CES seules ;
- les cordons pierreux ou les bandes enherbées combinés avec l'apport de compost ont induit des interactions positives, tandis que les cordons pierreux combinés avec l'apport de d'urée ont induit des interactions négatives. Une interaction positive des bandes enherbées combinées avec l'apport de N-urée a été observée seulement après deux ans ;
- les gains économiques, lorsqu'on combine l'application de compost aux cordons pierreux et aux bandes enherbées, ont été substantiels (109 000 F CFA ha^{-1} à 138 000 F CFA ha^{-1}), tandis que les montants les plus élevés obtenus avec l'adjonction de N-urée étaient faibles (7 560 F CFA ha^{-1} à 22 120 F CFA ha^{-1}) ;
- ces résultats indiquent que dans le Sahel, des opportunités existent pour réaliser une utilisation plus efficiente des sources locales de nutriments telles que le compost en combinaison avec des mesures de CES localement acceptées. Cela pourrait renforcer la capacité des paysans à investir pour un apport suffisant de nutriments dans les sols au sud du Sahara, caractérisés par une faible fertilité.

Références bibliographiques

BREMAN H., GROOT J.J.R., VAN KEULEN H. 2001. Resource limitations in Sahelian agriculture. *Global Environ Changes* 11: 59-68.

BUERKERT A., PIEPHO H.P., BATIONO A. 2002. Multi-site time-trend analysis of soil fertility management effects on crop production in sub-Saharan West Africa. *Exp Agric* 38: 163-183.

DUDAL R. 2002. Forty years of soil fertility work in sub-Saharan Africa. In: VANLAUWE B., DIELS J., SANGINGA N., MERCKX R. (eds.), *Integrated plant nutrient management in Sub-Saharan Africa: From concept to practice*. CAB International, New York, 7-21.

GILLER K.E. 2002. Targeting management of organic resources and mineral fertilizers: can we match scientists' fantasies with farmers' realities? In: Vanlauwe B., Diels J., Sanginga N. AND Merckx R. (eds), *Integrated plant nutrient management in Sub-Saharan Africa: From concept to practice*. CAB International, New York, 155-171.

IWUAFOR *ET AL.*, 2002. On-farm evaluation of the contribution of sole and mixed applications of organic matter and urea to maize grain production in the Savannah. In: Vanlauwe B., Diels J., Sanginga N. AND Merckx R. (eds), *Integrated plant nutrient management in Sub-Saharan Africa: From concept to practice*. CAB International, New York, 185-197.

VANLAUWE B., DIELS J., SANGINGA N. AND MERCKX R. 2002. *Integrated plant nutrient management in Sub-Saharan Africa: From concept to practice*. CAB International, New York, pp: 1-5.

ZOUGMORÉ R., GNANKAMBARY Z., GUILLOBEZ S., STROOSNIJDER L. 2002. Effect of stone rows on soil chemical characteristics under continuous sorghum cropping in semiarid Burkina Faso. *Soil Till Res* 66: 47-53.

INDIGENOUS TECHNICAL KNOWLEDGE FOR SOIL AND WATER CONSERVATION AND SOIL FERTILITY RESTORATION IN FOOTHILL REGION OF THE HIMALAYAS IN NORTH-WEST INDIA

Sanjay ARORA* et M.S. HADDA**

** Division of Soil Science and Agricultural Chemistry, S.K. University of Agricultural Sciences and Technology, FoA, Chatha-180 009, Jammu, India*

*** Department of Soils, P.A.U, Ludhiana -141004, Punjab, India, aroraspau@yahoo.co.in*

Résumé

Les piedmonts de l'Himalaya, au Nord-Ouest de l'Inde, ont bien du mal à assurer la CES, un développement durable et la sécurité alimentaire. Les sols des versants sont grossiers, pauvres en M.O. et en nutriments. Les paysans sont pauvres et s'adonnent à une agriculture pluviale comportant une rotation maïs-blé. Les rendements en blé atteignent seulement 65 % du potentiel. Le climat est subtropical avec 800 mm à 1 400 mm de pluie.

Les paysans ont développé de nombreuses pratiques de CES : labour avant la mousson, bandes filtrantes, sarclo-buttage du maïs, paillage, tassement du sol sous canne à sucre, talutage des champs, terrasses, techniques capables de protéger les sols et de conserver l'eau et les fertilisants dans les sols. Ces pratiques peu coûteuses, améliorées par des interventions des scientifiques, demandent d'être adoptées par la majorité des paysans pour surmonter le défi.

Mots clés : N.-O.de l'Inde, techniques traditionnelles, CES, restauration de la fertilité des sols.

INTRODUCTION

The part of Himalayan mountain chain Shivaliks run in a continuous belt from Jammu in North-west to North-eastern states of India, continuing through Nepal. The width of varies from a few kilometers to around 40 km at different places and about 2000 km in length. The tract is dominant in Punjab, Himachal Pradesh, Uttaranchal and Jammu and Kashmir states of India. This foothill region or the sub-montaneous tract is rainfed in nature and the major occupation of the human in this area is agriculture.

The prime cause for the backwardness of the Shivalik belt is a reduction in soil fertility and productivity, due to massive soil erosion. Most of the farmers are depending on renewable natural resources for their livelihoods. For example, the inhabitants of the foothill region of North-west India have fragmented land holdings and generally resource poor. This poverty is partly due to inadequate availability of

water for crops, livestock and other enterprises. However, the shortage of water is not caused by low rainfall as normally perceived but rather by lack of capacity for sustainable management and use of available rainwater.

The climate is sub-tropical with average annual rainfall is 800 mm-1.400 mm, about 80 % of rain occurs in summer monsoon months and only 20 % in winter months. The farmers are economically poor and follow dry land agriculture with maize and wheat crop rotation. They are illiterate and tradition bound and little conversant with the available improved technology. Among various problems, encountered by the area, soil erosion is one of the most dominating problems in the area which aggravates because of the erratic, high intensive, short duration rainfall. There is great challenge for developmental activities including soil moisture conservation and nutrient management.

Farmers in the area had developed an innovative technology of soil and water conservation and crop production which has helped them to sustain so far. But this technology is not able to meet the emerging challenges in ecological rehabilitation and to meet the need of fuel, fodder and food.

Farmers were ranked high in the social system and village management was in their hands. In order to manage land, water and vegetation, technical knowledge suitable to the specific conditions of a region was required. They gained this knowledge and developed skill through experience and learning by doing.

Traditional knowledge has a sound base as it has been tested and practiced over the years. It is appropriate technology in particular climatic conditions and in the living conditions of people. The indigenous practices which vary from place to place in the sub-hill region are stepping stones for development of any improved technology for soil and water conservation and crop production in the area. Efforts have been made to identify the existing indigenous practices followed by the farmers in the tract.

1. METHODOLOGY

The investigations in different areas of the foothills has been carried out since a long time by different agencies, with a view to obtain comprehensive information on traditional knowledge of local people for soil and water conservation in relation to crop productivity in foothills of Shivaliks. The information was collected by means of informal interviews, interaction with old and young farmers, social agencies, village leaders and other agents involved in the area. In the present paper, we have tried to compile the information after through investigation in foothills of Shivaliks in Punjab and Jammu & Kashmir state.

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. Farmers' condition

People of the area are generally poor, illiterate and tradition bound. They are little conversant with the available improved technology. Majority of farmers are poor and marginal having land holdings less than 2 ha which exist in small fragmented

pieces. The farmers' capacity to invest is very limited. Inputs needed for improving soil fertility and productivity viz. Fertilizers, pesticides, weedicides and improved seeds are generally not made by the farmer because of uncertainty about the returns, poor economic conditions and lack of education and extension gaps.

2.2. Yield gaps

Farmers in the area are obtaining only 2.965 kg/ha of maize and 618 kg/ha of wheat on an average when there are satisfactory rains as per the survey of the area conducted by author recently. The average yield of wheat and maize in the area is about 45%-80% and 25%-45% less than that obtained in the irrigated conditions. It is found that more than 65% lower yields were obtained in case of wheat in comparison to potential or maximum yield (Y_{max}), and main limiting factor in wheat was soil moisture/water.

3. INDIGENOUS SOIL AND NUTRIENT MANAGEMENT PRACTICES

3.1. Field bunding

It has been noticed that rain water is lossed, which is essential for crops and in addition erodes soil, washes nutrients and disfigure farmers land. Formation of bunds is an easy, cheap and adaptive method which is supported by modern scientific knowledge to facilitate infiltration and percolation of rainwater to help soil and groundwater recharge, in addition to avoid surface runoff which often results in erosion of fertile top soil. In modern technology, the proper shaped bunds with water disposal structures can be very effective.

3.2. Pre-monsoon ploughing

Ploughing the fields before onset of summer monsoon rains can make the field surface rough and cloddy, exposing more surface area for intercepting and increasing residence time for runoff. This is very economical and helps in imbibitions of rainwater into the deep soil layers and, at the same time, controlling pests and diseases. Reports from rainfed areas of Haryana state have proved the effectiveness of this practice in preventing soil loss apart from improving soil moisture. This practice is more effective if the farmer ploughs the field across the slope in hilly terrain.

3.3. Filter strips

Runoff from fields occasionally concentrates and run on the field in small channels called rills. Runoff from these rills concentrate and breach the field bund at vulnerable point, where often gullies on agricultural fields develop. Gullies then cut into the fields, and these fields slowly may go out of cultivation owing to this water erosion. Automatic response of the farmer was to strengthen the water outlet point to save fields. This he did either by putting stones at the point where bunds breached or put some strong stemmed vegetation like *Sachharum munja*. Such strips are commonly found on boundaries of different fields. Filter strips are innovative cheap way of safe disposal of excess runoff from the fields. Recently efforts have been made in certain development projects to put vegetation on whole

field boundaries. Farmers have objection to this on the basis: these obstruct to their movement in the fields, these vegetative boundaries harbour rodents and pests.

3.4. Haloding

It is an important monsoon season indigenous practice for maize crop. In this, an inverted plough is run in inter row spacing in a month old maize crop. The practice destroys weeds, does earthing up and creates shallow ditches between the rows. The ditches intercept and detain running rain water. In addition, earthing up supports the plants, aerates the rooting zone and decrease resistance to growing roots. The practice of haloding has been found to decrease weeds, conserved water and increase maize yield by 24% than control.

3.5. Soil mulching

This is also one of the refined indigenous practice used for conserving soil moisture for raising a successful winter (wheat) crop. In this practice, at maturity of maize, it is harvested and the field is ploughed on the same day in evening hours. Next day, in the morning hours, the field is planked. During night, the exposed clods pick up moisture from cool air and get softened which easily break on planking and form fine surface soil mulch. This checks surface evaporation and conserve profile water. By creating soil mulch at the first opportunity, the farmer conserves the profile water by checking upward movement through breaking the continuity of capillaries towards the soil surface.

3.6. Hoeing, compression and mulching

Farmers in the area also grow rainfed sugarcane. The quality of jaggery made from this sugarcane is relatively better and fetches good premium in market. Practice of hoeing, compression and mulching is common in rainfed sugarcane raised during the month of February. When the sprouted plant attains a height of about 10 cm, the farmer carries out inter row hoeing. He then gives a good thrashing with a wooden long baton, especially made for the purpose to break the clods and compress the surface soil layer. After this, the farmer spread the available organic residue on the soil surface in between the rows.

3.7. Organic farming

Farmers in most of region of foothills of Shivaliks are aware of the soil condition, *i.e.* low in organic matter and poor in fertility. They are also very much concerned about soil erosion, nutrient loss and water scarcity impairing crop yields. Farmers apply Farm yard manure (FYM) obtained from their animals. But its quantity is far lower than recommended and it is only possible to apply in the fields adjoining the village. Also crop residues are applied by many of the farmers with large landholdings which help in addition of organic matter and nutrients. The wheat crop stubbles are generally ploughed in the soil, but only when there is sufficient moisture in the soil.

In Doon valley, farmers use FYM in the fields before sowing. In lowland areas, for paddy, they go for green manuring also. Use of chemical fertilisers has increased, but people retain their belief in traditional methods. Farmers do not dig compost pits for the collection of cowdung, residues and garbage. Instead, they accumulate

the matter in heaps in the open for decomposition. The reason behind it is that decomposition is slow due to low temperature and little sunshine. In pits, compost would not get ready in time. In the open, rapid decomposition takes place. This practice is traditional but has a scientific basis.

3.8. Cropping knowledge

Typical situation exists in the area where maize-wheat sequence and sugarcane is also grown on the upper slope transect and at the middle slope transect, rainfed horticulture is being practiced and however, on the lower slope transect, forestry is generally practiced. The farmers of the area are not at all using chemical fertilisers for crop production, but they are practicing organic farming.

3.9. Mechanical soil and rainwater conservation measures

As per the survey by CSWCRTI, Dehradun, the farmers of Doon Valley usually construct terraces for cultivation known as *nala*, with risers known as *pusata*. These terraces are small, but there are many of them. In one hectare of land, a farmer possesses 125 *nala*. In these, it is possible to manage rainwater. Construction of terraces depends upon space and grades of land. The farmers, with their expertise, are able to prepare fields for crop production. According to scientific recommendations, cultivation is allowed to 33% of land slope. But in the hills, farmers are able to make terraces from top to bottom of the mountain terrain without taking into account the land slope. With terraces, they construct loose boulder retention walls (risers) by putting grass on them. These grasses keep stones and land intact.

Farmers make the slopes of the terraces inwards to check soil erosion and enhance *in situ* moisture conservation. On mild slopes, farmers construct shoulder bunds to protect their lands from soil erosion and grow vegÉtation over the bunds, particularly grasses for binding the soil. Farmers of the hill region used to make brushwood or longwood check dams across the drainage channels for controlling soil loss by means of local materials. They are economical. Gabion walls and stone check dams are by and large cost intensive and beyond not affordable to hill farmers.

Farmers in the Doon Valley in order to train torrents use *Ipomea carnea* and *Arando donex* plants sps. as vegetative spurs, and they are found to be very successful.

3.10. Rainwater harvesting

The region of Garhwal comes in the high rainfall area, and in the lack of proper management system, most of the rainwater goes waste as runoff. Farmers of the hill region have their traditional technology for making small dug-out ponds to harvest rainwater. They construct such ponds at several places and use the water for survival or for supplemental irrigation. In foothill region of Punjab and Himachal Pradesh, farmers have rainwater harvesting structures in the form of village ponds for domestic and livestock use and farm ponds for irrigating winter crops during stress. But there is need of improvement over the traditional practices, where at the bottom LDPE sheets can be placed to check seepage losses.

CONCLUSION

All these traditional practices adopted since ages and transmitted from one generation to other are easy, beneficial for soil fertility management, reducing soil erosion and optimum crop yields. But there is need to refine these traditional practices on scientific basis to produce full potentials and ultimately improve the soil fertility and socio-economic status of the farmers in the region.

LE COÛT DES NUTRIMENTS DE SOL S'ACCUMULANT DANS LES LACS DE RETENUES AU TIGRÉ (ÉTHIOPIE SEPTENTRIONALE)

N. HAREGEWEYN*/, J. POESEN**, K. PARIDAENS***, J. NYSSEN*/**, J. MOEYERSONS****, J. DECKERS***, G. VERSTRAETEN G.**, WOLDE MEKURIA*, M. HAILE*, G. GOVERS****

** Department of Land Resources Management and Environmental Protection, Mekelle University, P.O. Box 231, Mekelle, Ethiopia ; niguha@yahoo.com*
*** Physical and Regional Geography Research Group, K.U. Leuven, Redingenstraat 16, B - 3000 Leuven, Belgium ; Jean.Poesen@geo.kuleuven.be*
**** Institute for Land and Water Management, K.U. Leuven, Vital Decosterstraat 102, B - 3000 Leuven, Belgium ; seppe.deckers@agr.kuleuven.ac.be*
***** Agriculture and Forestry Economics, Royal Museum for Central Africa, B-3080 Tervuren, Belgium ; jan.moeyersons@africamuseum.be*

Abstract

A comparative study was done between the sediments silted up in the reservoirs and the soils in the catchments in 13 microdam sites in Tigray (Northern Ethiopia). It was aimed to assess the export of sediment and sediment bound nutrients out of the catchments due to erosion, and to investigate whether the soils in the catchment and the sediment in the reservoir differ in granulometry and nutrient content. The results show that sediments in the reservoirs are relatively rich in nutritive elements and fine grain fraction compared to the soils in the catchments from which the sediments are derived. This is assigned to selective erosion and runoff. The sediment in the reservoir also sequesters important quantities of organic carbon. Although the catchment soils are not fertile, the high erosion leads to considerable absolute losses of nutrients. The market value of only the N and P losses equals more than one third of the annual gross budget of Tigray. The catchments need integrated soil fertility management practices.

Keywords : *Ethiopia* ; *Nutrient Export* ; *OC Sequestration* ; *Reservoir* ; *Soil Fertility Management.*

1. PROBLEMATIQUE

L'érosion du sol constitue la forme de dégradation environnementale la plus menaçante pour une agriculture durable dans le monde. Mais trop souvent, la dégradation créée par l'érosion est mesurée en termes de vitesse de disparition de sol sans s'occuper trop de l'impact de cette érosion sur la productivité (Pierce et Lal, 1994). De même, les coûts économiques de l'érosion sont rarement adéquatement documentés (Robinson et Blackman, 1987). Haregeweyn *et al.*

(2006) ont constaté que cinq sur dix réservoirs dans le Nord de l'Ethiopie subissent un colmatage tellement rapide que leur espérance de vie n'est que la moitié de celle prévue. En plus, les matières minérales érodées apportent avec eux une quantité de nutriments arrachés. Les objectifs de cette étude sont :

- la vérification de la teneur en nutriments des sols du bassin hydrographique et des terres colmatées dans les réservoirs, la relation existante et son explication ;
- l'évaluation de la fertilité des dépôts et leur réutilisation possible pour la fertilisation des sols ;
- la vérification de la vitesse de l'exportation de nutriments ;
- et l'évaluation de la valeur vénale des nutriments érodés.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude a été conduite au Tigré, dans le Nord de l'Ethiopie (fig. 1). La région compte 54 petits lacs de retenue, construits depuis 1994 pour des raisons d'irrigation. Dans 13 de ces réservoirs, des échantillons représentatifs de sol du bassin-versant ont été comparés aux échantillons des sédiments du lac sur leur teneur en nutriments majeurs et leurs propriétés physiques. Les analyses des nutriments étaient conformes aux procédures standardisées d'analyse de sol, adoptées par l'*Ethiopian National Soil Laboratory*. La quantité des nutriments liés au sol érodé, déposée dans le réservoir est calculée comme :

$$NE = \frac{SV * \sum_{i=1}^{n} (dBD_i * NC_i)}{10 * n * A * NTE}$$ (Verstraeten et Poesen, 2002)

où NE représente les pertes en nutriments en kg ha^{-1} an^{-1}, SV est le volume mesuré (m^3) du sédiment dans le réservoir, dBD le poids spécifique apparent sec (Mg m^{-3}), NC la teneur en nutriments de l'échantillon (mg de nutriment kg^{-1} de sol), NTE l'efficacité d'interception de nutriments du réservoir, À la surface du bassin drainé en ha. Le coût des pertes des nutriments par l'érosion a été estimé selon l'approche du « coût de remplacement » (Bojö 1996).

Tab. 1. Caractéristiques pour l'ensemble des 13 réservoirs étudiés au Tigré (Haregeweyn, 2006)

SV (m^3)	SM (t)	Âge (années)	A (km^2)	TE (%)	SSY(t km^{-2} an^{-1})
33740 ±39775	36691 ±40594	5 ±1	7,8 ±6,46	98 ±5	866 ±506

SV : volume total de dépôt annuel par réservoir ;
SM : masse totale de dépôt annuel par réservoir ;
A : surface moyenne de bassin-versant ; TE : l'efficacité moyenne d'interception de sédiments par un réservoir ; SSY : érosion spécifique moyenne.

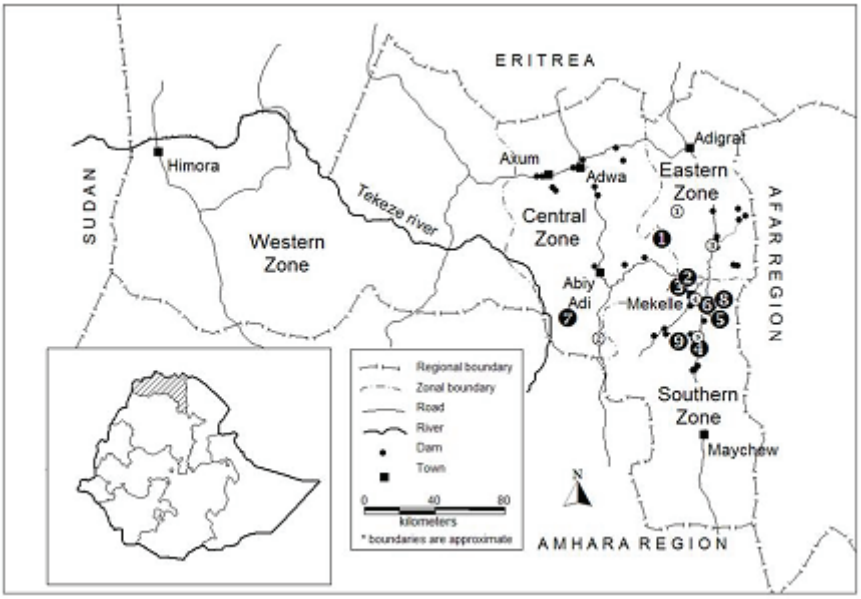


Fig. 1. La région et les réservoirs étudiés

Les mouchetures représentent des réservoirs visités. Les chiffres sur fond noir sont des réservoirs dans lesquels les dépôts ont été mesurés : 1. Gindae ; 2. Gereb Shegel ; 3. Sewhimeda ; 4. Gereb Segen, Grashitu, Mejae, Maideli, Gum Selassa ; 5. Adiakor ; 6. Adihilo ; 7. Agushella ; 8. Endazoey ; 9. Adikenafiz. Les chiffres sur fond blanc sont des stations pluviométriques : 1. Hawzen ; 2. Yechila ; 3. Wukro ; 4. *Mekelle Airport* ; 5. Adigudom. Ces stations sont gérées par l'*Ethiopian Meteorological Authority*.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Les taux de nutriments sur les bassins versants et dans les réservoirs

3.1.1. L'azote totale (N)

En moyenne, le taux en azote dans les sédiments de réservoir est de 1,11 celui dans les sols des bassins. Il s'agit d'un facteur d'enrichissement (ER) de 1,11 avec une différence non significative entre les moyennes (tab. 2, 3 et 4). Il existe une corrélation positive significative (r = 0,49) entre le sol des bassins et les dépôts dans les réservoirs (tab. 4). L'azote dans les réservoirs est d'origine organique puisqu'il est fortement relié au carbone organique OC (r = 0,88 ; tab. 5).

Tab. 2. Taux moyen d'éléments nutritifs dans 13 bassins et réservoirs au Tigré

	Bassins	Réservoirs
n (nombre d'échantillons)	14±6	8±2
pH	7,78±0,2	7,76±0,21
N (%)	0,14±0,03	0,15±0,04
P (ppm)	4,97±2,46	8,13±2,75
OC (%)	1,53±0,46	1,31±0,56
K (mg kg^{-1})	273±137	429±164
Ca (mg kg^{-1})	10762±3090	14926±1560
Mg (mg kg^{-1})	182±116	240±138
C:N	11±15	9±2
Ca:Mg	59±27	97±78
K:Mg	2±1	3±2

3.1.2. Le phosphore disponible (P)

Le niveau du phosphore est significativement plus élevé dans les réservoirs que dans les sols des bassins avec un ER = 1,82 (r = 0,68 ; tab. 2, 3 et 4). Ce taux élevé est partiellement dû à l'érosion sélective puisqu'il existe une forte correspondance (r = 0,73 ; tab. 5) entre la fraction des silts et le niveau du P dans les réservoirs. La corrélation négative entre P et les fractions argileuses (r = - 0,67; tab. 5) est interprétée comme le résultat d'une disponibilité décroissante en P, due à l'absorption élevée des ions de phosphates par les minéraux argileux.

3.1.3. Le carbone organique (OC)

Le niveau de OC dans les sols sur les versants est relativement élevé et dépasse légèrement celui des sédiments dans les réservoirs (ER = 0,93), mais cette différence est statistiquement non significative (tab. 2, 3 et 4). Il manque en même temps une relation nette entre bassin-versant et réservoir (tab. 4). Le taux relativement bas en C dans les réservoirs peut résulter d'une décomposition rapide sous forme d'une humification puisque le rapport C/N est de 9 ± 2, ce qui encourage les activités microbiennes.

3.1.4. La potasse échangeable (K)

La teneur en K est significativement plus élevée dans les réservoirs que sur les pentes des bassins (ER = 1,81 ; tab. 2, 3 et 4). En même temps, la correspondance entre les sols des bassins et les sédiments dans les réservoirs est très significativement positive (r = 0,63 ; tab. 4). Le taux élevé en K dans les

réservoirs s'explique par une érosion et un transport sélectifs parce que K est fortement corrélée avec la fraction argileuse des dépôts (r = 0,72 ; tab. 5).

3.1.5. Le calcium échangeable (Ca)

La différence moyenne entre bassin et réservoir est significative (ER = 1,54 ; tab. 2 et 3) et les deux sont fortement reliés (r = 0,52 ; tab. 4). Le taux élevé en Ca dans les réservoirs s'explique par l'affleurement prépondérant de formations de calcaire et de schiste/marne dans les bassins.

3.1.6. Le magnésium échangeable (Mg)

Le taux d'enrichissement moyen dans les réservoirs est clair (ER = 1,5 ; tab. 2, 3 et 4) avec une corrélation positive significative avec le niveau de Mg dans les bassins (r = 0,70 ; tab. 4). On estime que la Mg dans les réservoirs arrive par précipitation de dolomie dissoute. La dolomie et le calcaire affleurent dans la plupart des bassins.

3.2. La fertilité et la disponibilité des nutriments dans les sédiments de réservoir

Le niveau de chaque élément nutritif individuel et la relation avec le sédiment déposé (tab. 2) a été utilisé pour la détermination de l'état de fertilité. Le niveau est bas et marginal pour N, P, OM, moyen pour K et élevé pour Ca et Mg. En plus, la proportion C:N indique l'intensité d'humification et les rapports K:Mg, Ca:Mg montrent l'indisponibilité de magnésium (Landon, 1984).

Tab. 3. Enrichissement moyen en nutriments (ER) et classes texturales dans 13 bassins au Tigré

N	1,11±0,24
P	1,82±0,64
OC	0,93±0,43
K	1,81±1,09
Ca	1,54±0,60
Mg	1,50±0,79
Argile	1,57±0,43
Silt	1,07±0,31
Sable	0,42±0,35

ER a été calculé comme la concentration moyenne pour tous les réservoirs, divisée par la concentration moyenne dans les sols de tous les bassins.

Tab. 4. Comparaison couplée des moyennes et corrélation des échantillons dans 13 bassins au Tigré.

Couples	Comparaison des moyennes		Corrélation	
	Différence moyennes couplées	dl	R	n
pHB & pHR	0,015^{ns}	12	-0,01^{ns}	13
NB & NR	-0,01^{ns}	12	0,49*	13
PB & PR	-3,00**	12	0,68**	13
OCB & OCR	0,22ns	12	0,28^{ns}	13
KB & KR	-0,40**	12	0,63*	13
CaB & CaR	-21,00**	10	0,52*	11
MgB & MgR	-0,48*	10	0,70*	11

Suffixes B et R : bassin et réservoir ; dl : degrés de liberté ;
R : coefficient de corrélation ; n : nombre d'échantillons ;
ns : non significatif, * et ** significatif à 10 % et 1 % respectivement.

Tab. 5. Matrice des corrélations Pearson entre les nutriments et les classes texturales dans les sédiments dans les réservoirs.

	N	P	OC	K	Ca	Mg	Argile	Silt	Sable
pH	-0,11^{ns}	0,11^{ns}	-0,04^{ns}	-0,31^{ns}	0,08^{ns}	0,51^{ns}	-0,15^{ns}	0,32^{ns}	0,43^{ns}
N		0,55*	0,88**	-0,14^{ns}	0,65*	0,55*	-0,35^{ns}	0,22^{ns}	-0,08^{ns}
P			0,49*	-0,43^{ns}	-0,22^{ns}	0,63*	-0,67**	0,73**	0,13^{ns}
OC				-0,08^{ns}	0,33^{ns}	0,60*	-0,32^{ns}	0,12^{ns}	0,17^{ns}
K					0,34^{ns}	-0,012^{ns}	0,72*	-0,32^{ns}	-0,54^{ns}
Ca						-0,03^{ns}	0,30^{ns}	-0,16^{ns}	-0,30^{ns}
Mg							-0,23^{ns}	0,31^{ns}	0,12^{ns}
Argile								-0,66**	-0,50*
Silt									0,12^{ns}

ns : non significatif ; * et ** significatif à 10 et 1 % respectivement.

3.3. Les pertes en nutriments (NE) et la relation avec l'érosion spécifique (SSY)

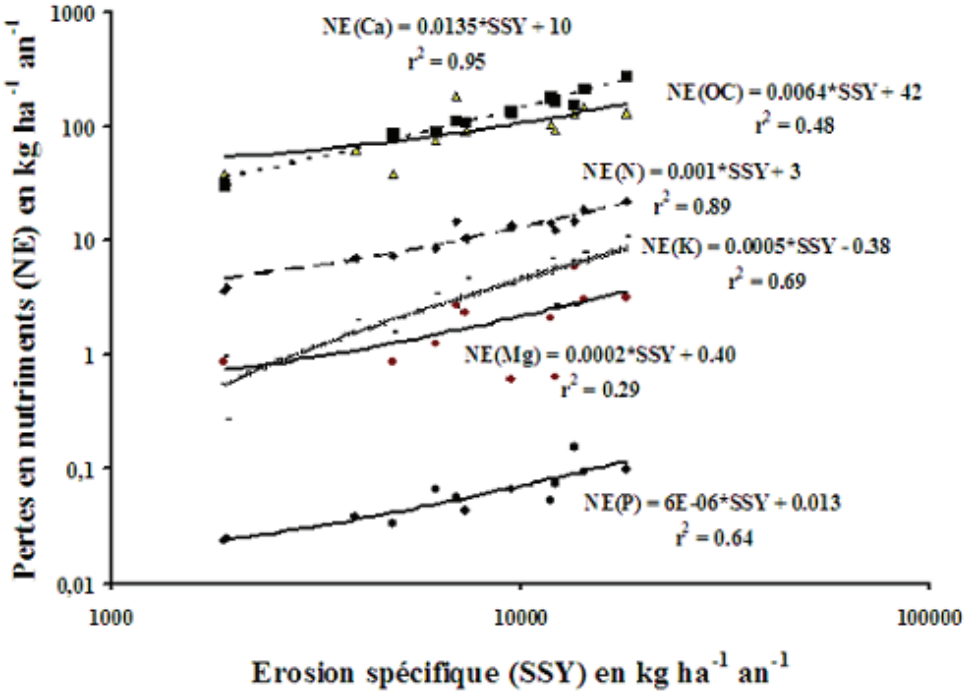


Fig. 2. Corrélations entre l'érosion spécifique (SSY) et les taux d'exportation de nutriments de sol (NE) par l'érosion au Tigré

Les taux moyens d'exportation (en kg ha^{-1} an^{-1}) calculés sont : 11,56 ± 5,22 pour N ; 0,063 ± 0,035 pour P ; 97,11 ± 44,96 pour OC ; 3,85 ± 2,85 pour K ; 140,97 ± 62,83 pour Ca ; 2,11 ± 1,49 pour Mg. Comparés avec la Belgique (Verstraeten et Poesen, 2002), les taux d'exportation de N, P, K et Mg semblent être assez bas, mais il faut tenir compte des basses concentrations de ces nutriments dans les sols éthiopiens. L'exportation de Ca est significativement plus importante en Ethiopie du fait de la lithologie, riche en carbonates, qui affleure dans les bassins tigréens. Aussi, l'exportation de OC est relativement élevée mais varie considérablement entre les bassins. La valeur calculée s'élève à 97,11 ± 44,96 kg ha^{-1} an^{-1}, ce qui équivaut à un dépôt annuel de 980 t de OC dans les 13 réservoirs, qui drainent une surface totale de 101 km². Les 64 réservoirs, construits depuis 1970 au Tigré, recevraient 6 640 tonnes de OC par année.

Les taux d'exportation de nutriments ont été corrélés avec l'érosion spécifique dans les 13 bassins (fig. 2). La corrélation est significative dans tous les cas avec des valeurs de r² de 0,95 ; 0,89 ; 0,69 ; 0,64 ; 0,48 et 0,29 pour le Ca, N, K, P, OC et Mg respectivement. La forte corrélation de l'exportation des nutriments (NE) avec l'érosion spécifique (SSY) indique que le stockage des nutriments dans les

dépôts est proportionnel à l'érosion dans les bassins versants, et que le taux de fertilité varie très peu entre les 13 bassins. Néanmoins, il est important d'identifier d'autres facteurs responsables de la variation spatiale entre les bassins, notamment dans le cas du Mg.

3.4. La valeur vénale des nutriments de sol érodés des bassins-versants

Le tableau 6 montre que la valeur vénale des quantités en N et P qui quittent annuellement les 13 bassins-versants s'élève à la somme de 68,47 Eth Birr ha^{-1} an^{-1}. Au niveau de la région des Hautes Terres de l'Ethiopie (4.48 x 10^5 km^2), il s'agit d'une somme globale de 3,06 milliards de Eth Birr par année. Si l'on tenait compte des pertes en OC et en autres nutriments et de la diminution de la fertilité physique du sol, le coût serait encore beaucoup plus élevé.

Tab. 6. Coût de l'érosion pour les pertes en N et P dans 13 bassin-versants au Tigré

Addition Urée		Addition DAP		Coût total*
(Kg ha^{-1} an^{-1})	Cost (Birr ha^{-1} an^{-1})	(kg ha^{-1} an^{-1})	(Birr ha^{-1} an^{-1})	(Birr ha^{-1} an^{-1})
25,01 ±11,77	67,54 ±31,78	0,31 ±0,18	0,94 ±0,54	68,47 ±32,17

* 10,5 Eth Birr = 1 € en octobre 2005
DAP = phosphate de diammonium

4. CONCLUSIONS

L'érosion sélective donne lieu à des pertes importantes de nutriments dans les sols des bassin-versants et à un état de fertilité relative des terres accumulées dans les réservoirs. Les pertes dans les bassins-versants sont les plus élevées pour le Ca et la M.O. La forte corrélation entre les pertes en nutriments (NE) et l'érosion spécifique (SSY) s'explique par une variabilité réduite de l'état de fertilité dans les différents bassins-versants. Le coût annuel des pertes uniques en N et P dépasse déjà le tiers du budget annuel de la région des Hautes Terres de l'Ethiopie. Il faut admettre que la grandeur du problème n'est pas encore totalement saisie par les politiciens. Il faut donc continuer à faire prendre conscience du problème, mais, en même temps, introduire l'idée de remédier à la situation par la CGES.

Références bibliographiques

BOJÖ J., 1996. The costs of land degradation in Sub-Saharan Africa. *Ecological Economics* 16: 161-173.

HAILESELASSIE A., PRIESS J., VELDKAMP E., TEKETATY D., LESSCHEN J.P., 2005. Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on stallholder's mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 108: 1-16.

HAREGEWEYN N., 2006. *Reservoir sedimentation in the North Ethiopian Highlands: assessment and modelling of controlling factors and impacts*. PhD thesis. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Geography and Geology. 243 pp.

HAREGEWEYN N., POESEN J., NYSSEN J., DE WIT J., HAILE M., GOVERS G., DECKERS J., 2006. Reservoirs in Tigray (northern Ethiopia): characteristics and sediment deposition problems. *Land Degradation & Development* 17: 211-230.

LANDON J.R. 1984. *Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics.* Longman Group, 474 pp.

MARX E.S., HART J., STEVENS R.G., 1999. *Soil Interpretation Guide*. Oregon State University Extension Service, 8 pp..

OLARIETA J.R., BESGA G., RODRIGUEZ R., USON A., PINTO M., VIRGEL, S., 1999. Sediment enrichment ratios after mechanical site preparation for *Pinus radiata* plantation in the Basque Country. *Geoderma* 93: 255-267.

PIERCE F.J., LAL R., 1994. Monitoring the impact of soil erosion on crop productivity. In: LAL (ed.): *Soil Erosion Research Methods*, Soil and Water Conservation Society, 2nd option, 234-263.

ROBINSON D.A., BLACKMAN J.D., 1987. Some costs and consequences of soil erosion and flooding around Brighton and Hove, Autumn. In: Morgan (ed.), *Soil Conservation, Problems and Prospects*, John Willey and Sons, Chichester, UK, 369-382.

VERSTRAETEN G., POESEN J., 2002. Regional Scale Variability in Sediment and Nutrient Delivery from Small Agricultural Watersheds. *Journal of Environmental Quality* 31: 870-879.

RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS FERRUGINEUX EN ZONES AGROPASTORALES DU NORD-CAMEROUN (*RESUMÉ*)

Henri-Dominique KLEIN
CIRAD-IEMVT, Montpellier, dominique.klein@cirad.fr

INTRODUCTION

Les évolutions actuelles de l'élevage et de l'agriculture dans ces zones conduisent presque partout à :

- une augmentation des surfaces cultivées et une diminution, voire une disparition de la jachère, qui conduit à une dégradation de la fertilité des sols ;
- un émiettement et une diminution de l'espace pastoral qui entraîne une dégradation et une diminution des ressources fourragères.

1. LES SOLS FERRUGINEUX

De très nombreuses études sur les sols menées dans cette région (Boli 1996, Vallée 1996) ont montré que les sols les plus cultivés (ferrugineux tropicaux sableux) s'appauvrissent et que le complexe argilo-humique est détruit. Il en résulte une érosion en nappe, évoluant très rapidement vers les ravines, dont l'origine est liée à quatre causes fondamentales : l'intensité de la pluie, l'appauvrissement en particules fines, la minéralisation des matières organiques, la réduction de l'activité biologique.

Roose (1993) pense qu'à l'avenir il faudra rechercher à :

- limiter et améliorer le travail sur la ligne de plantation uniquement,
- fractionner la fumure en fonction des risques de drainage,
- couvrir le sol par un paillis ou par une plante de couverture.

2. L'UTILISATION DES HERBACÉES ET LE ROLE DE L'ÉLEVAGE

Pour améliorer la production fourragère, des plantes fourragères ont été diffusées dans la plupart des pays de cette région au cours des trente dernières années, sous différentes formes : les parcours améliorés, les pâturages permanents, les banques fourragères, les jachères améliorées, les haies vives (Klein 2002). Les différentes formes sont, bien sûr, liées à l'évolution des systèmes agraires et la

transformation concomitante des relations entre l'agriculture et l'élevage (Jouve 2001) :

- dans les premiers stades agraires, l'entretien de la fertilité des champs est assuré par la jachère longue et l'alimentation des troupeaux bovins par la transhumance ;
- avec le raccourcissement des jachères, l'association entre agriculture et élevage devient une pratique avantageuse pour agriculteurs et éleveurs (contrats de fumure) ;
- avec le développement d'exploitations mixtes, on entre dans une phase de compétition pour la terre et les ressources naturelles, et la mise en place de plantes fourragères devient une nécessité vitale pour le développement de l'élevage, voire de l'agriculture. Mais quelle que soit la forme utilisée, le développement est inégal, toujours réduit et non durable à cause :
    - des contraintes agronomiques (manques d'espaces et de temps) ;
    - des contraintes liées à la gestion (parcellaire peu adéquate, divagation du bétail et droit de vaine pâture en saison sèche) ;
    - des cultures fourragères non traditionnelles ;
    - de la rentabilité économique pas évidente, sauf embouche et production laitière ;
    - des semences beaucoup trop chères et difficiles à obtenir.

Pour répondre au mieux à ces contraintes, il apparaît à l'usage évident pour tous qu'il est préférable d'implanter les cultures fourragères dans les soles de culture plutôt que d'améliorer les parcours pour les raisons suivantes :

- « implantation au moindre coût » en association dans une céréale ;
- protection plus facile pendant toute la saison des pluies (proximité des cultures) ;
- appropriation possible au même titre qu'un résidu de culture ;
- forte demande des agriculteurs pour l'amélioration de la fertilité des sols de culture ;
- possibilité d'utiliser les plantes fourragères comme plantes de couverture (SCV).

Les solutions préconisées doivent viser à la fois le recyclage des éléments nutritifs et l'accroissement de la biomasse sous toutes ces formes :

- dans les zones arides et semi-arides (< 600 - 800 mm), il n'existe pas de réponses satisfaisantes et il est préférable d'utiliser des aménagements mécaniques (*cf.* R. Zougmoré) ;
- dans les zones sub-humides, les plantes recommandées sont toutes à usages multiples (PLUM) et, pour la plupart, des légumineuses (*Vigna sinensis*, *Dolichos lablab*, *Stylosanthes hamata*, *Calopogonium mucunoides*, *Mucuna pruriens*, etc.). Les graminées, toutes à fort

enracinement, apportent une concurrence beaucoup trop forte (hydrique et minérale).

Malgré toutes ces « bonnes raisons » et des besoins évidents, le développement des soles fourragères intégrées aux soles de culture dans les zones sub-humides reste faible en raison de :

- la technicité nécessaire pour le pilotage de certains itinéraires techniques (associations, semis directs sur couvertures végétales) ;
- la compétition pour l'eau et les éléments nutritifs, surtout en association, certaines années ;
- la compétition pour la biomasse entre les différents usages (fourrages, fertilité, antiérosif).

3. PROPOSITIONS : RECHERCHES À VENIR

En zones agropastorales sub-humides, les modèles techniques restent encore à construire avec les producteurs et, surtout, les organisations des producteurs, ainsi que de nouvelles règles d'usages et d'accès aux ressources naturelles.

Il faut aujourd'hui concevoir un nouveau cadre d'analyse des relations agriculture-élevage pour développer de nouveaux modes d'intervention et favoriser les processus d'innovations (Dugué *et al.*, à paraître) aux différentes échelles de l'exploitation, du terroir et de la région. C'est l'objet de plusieurs projets que le CIRAD EMVT et TERA présentent actuellement.

Références bibliographiques

CARSKY R. J., DOUTHWAITE B., MANYONG V. M., SANGINGA N., SHULZ S., VAN LAUWE B., DIELS J., KEATINGE J. D. H., 2003. Amélioration de la gestion des sols par l'introduction de légumineuses dans les systèmes céréaliers des savanes africaines. *Cah. Agricultures,* 12, 4 : 217-233.

DUGUE P, LE GAL P-Y, LELANDAIS B, PICARD J, PIRAUX M., 1998. Modalités d'intégration de l'agriculture et de l'élevage et impact sur la gestion de la fertilité du sol en zone soudano-sahélienne. In : *Gestion de la fertilité des sols dans les systèmes d'exploitation d'Afrique de l'Ouest*, Weikersheim : Margraf Verlag Editor, 369-380.

DUGUE P., 1999. Utilisation de la biomasse végétale et de la fumure animale : impacts sur l'évolution de la fertilité des terres en zones de savanes. Montpellier : CIRAD-TERA, Document 57/99 : 175.

DUGUE P., 2002. Recyclage des résidus de récolte en vue d'accroître l'utilisation de la fumure organique : le cas du Sine Saloum (Sénégal). In : *Dégradation des sols au Sahel : techniques et méthodes de lutte.* Montpellier : Coll. « Études et Travaux du CNEARC », 23 : 103–122.

DUGUE P., VALL E., KLEIN H.-D., ROLLIN D., LECOMTE P. 2003. Évolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Un nouveau cadre d'analyse pour développer de nouveaux modes d'intervention et favoriser les processus d'innovation. OCL (soumis à publication).

KLEIN H.-D., 2001. Utilisation des plantes fourragères à usages multiples (plum) dans les savanes d'Afrique Centrale. Rapport de mission d'appui à la composante du PRASAC « Innovation pour les systèmes de culture et d'élevage ». N'Djamnéna : PRASAC : 69.

KLEIN H.-D. 2002. Gestion et développement des plantes fourragères à usages multiples dans les savanes d'Afrique Centrale et de l'Ouest. In : JAMIN J-Y, SEINY BOUKAR L. (édit.), *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*, Ndjaména : PRASAC (sous presse).

LANDAIS E., LHOSTE P. 1990. L'association agriculture-élevage en Afrique intertropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités de terrain. *Cah. Sciences Humaines,* 26 (1-2) : 217-235

LANDAIS E., LHOSTE P., GUÉRIN H. 1991. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité. In : Min. Coop. et du Dév. (éd.), *Savanes d'Afrique terres fertiles ?*, Paris, France, 219-270.

LES ASSOCIATIONS CULTURALES TRADITIONNELLES AMÉLIORÉES : UNE ALTERNATIVE ÉCOLOGIQUE À L'INTENSIFICATION AGRICOLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, DÉMOGRAPHIQUE ET À LA « MONDIALISATION »

S. VALET
Expert, Passerelles, 9, rue du bât. d'Argent 69001, Lyon, France
valet.serge2@wanadoo.fr

Abstract

In the West-Cameroon, traditional mixed cropping (food crops, market gardening and industrial cultures), 8 to 12 species, inserted or not in areas with trees and bushes, are complex anthropogenic ecosystems. In fact, peasants vary qualitatively (species) and quantitatively mixed crops according to the fertility of the soil, the year of culture, their financial needs, the alimentary uses, the variability of the local and global prices and the export demand. Yields of the three basic cultures (maize, taro and macabo) are 1.2 to 2 times higher than those of intensified monocultures related to the same surface, not talking of the yield of the additional 6 to 10 cultures. The benefits of mixed cropping (factor 7 for maize and peanut; factor 2.25 for tubercules in intensified monocultures) explain why peasants have not abandoned them. The mixed crops have to be maintained in a framework of multispecific quickhedges that additionally will generate an organic amendment from the Ramial Chipped Wood (RCW). This innovative system shows its superiority on the intensified monocultures by its great variety of possible combinations for an alternative ecological development face to climatic and demographic change and globalisation. Cooperation must be chosen and not be undergone by the countries of the South.

Keywords : *Mixed Cropping* ; *Intensification* ; *SOR* ; *LER* ; *Quickhedge* ; *RCW* ; *Cameroon*.

1. OBJECTIF

Dans de nombreuses régions du monde de climats et d'écosystèmes très contrastés, les cultures associées vivrières insérées ou non dans des zones arborées et arbustives représentent le système ancien courant et traditionnel de production agricole vivrière, fruitière et industrielle (Baldy, 1963 ; Valet, 1966 ; de Ravignan, 1969 ; Mbomda, 1985). L'échec de l'intensification de la monoculture vivrière, la seule « *technique perfectionnée, la seule existant dans les agricultures modernes, la seule permettant la mécanisation que tôt ou tard les populations*

seront amenées à adopter » (Tardieu, 1970), prônée dès 1950, est patent. Ceci est reconnu et expliqué en partie par quelques agronomes : « *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* » (CIRAD, 2007). Or la majorité des populations africaines et asiatiques continue d'être nourrie par l'agriculture associée traditionnelle.

L'Ouest-Cameroun représente un bon exemple de système traditionnel d'association culturale ultra perfectionné. L'objectif de cette étude est de comprendre ces écosystèmes complexes anthropiques :

- en identifiant et hiérarchisant les facteurs discriminants des types d'associations à différentes échelles spatiales ;
- en mesurant les rendements comparés de diverses associations culturales à ceux des monocultures intensifiées ;
- en estimant les bénéfices comparés de ces associations et des monocultures intensifiées ;
- en proposant un écodéveloppement soutenu reposant sur un aménagement adapté aux milieux et à leur risque et degré de dégradation.

2. LE MILIEU

2.1. Le climat

L'Ouest-Cameroun forme un groupe de régions très diversifiées à méso-climats variés et contrastés (tab. 1).

Tab. 1. Zonation géoclimatique, période 1921 à 1968 (Valet 1966)

Caractéristiques des provinces géoclimatiques - zones homo-climatiques	Lieux	Altitude m	P mm moy./an	T° C moy. an.	Insolation h moy.	Indice d'aridité
II-d. Chaude, pluvieuse	Kondjock	600	2500	24	1650	100
III-d. Douce, relativement sèche	Dschang	1400	1900	19	1900	> 60
III-b. Très chaude, très ensoleillée et sèche	Foumbot	1100	1675	22	2400	< 60
III-e. Fraîche et brumeuse	Bambui	>1600	>2400	16	1500	90

2.2. La géologie

Sa très grande complexité est due aux formations pétrographiques nettement distinctes : le vieux socle (ou bouclier précambrien) granito-gneissique et les formations volcaniques d'acides à basiques.

2.3. La géomorphologie

Le socle granito-gneissique s'élève en gradins successifs de 100 m à plus de 1 800 m, limités par des failles ou des flexures. 57 % des superficies s'étagent de 1 040 m à 1 520 m d'altitude et 10 % de 1 520 m à 2 500 m (Valet, 1980). Chaque gradin est lui-même fortement faillé, favorisant une érosion hydrique qui entaille différemment chaque formation géologique.

2.4. Zonation écologique

Devant la complexité et l'hétérogénéité des conditions pédoclimatiques, géomorphologiques et géologiques du milieu de cette région, le concept d'organisation des régions naturelles en « 32 strates homogènes » ou géofaciès ou écosystèmes a été élaboré (Valet, 1967a). Ces strates forment des bassins versants unitaires à caractéristiques physiographiques et géomorphopédologiques spécifiques et à fonctionnement hydrique particulier. Elles ont des pentes dont les plus faibles (< 12 %), situées au sommet et en bas de pente, correspondent aux sols les plus fertiles et les moins susceptibles à la dégradation (Valet, 1967b, 1985).

3. RÉSULTATS

3.1. À l'échelle du champ

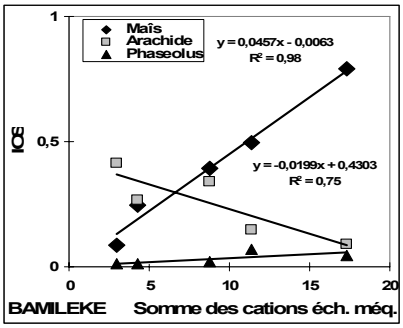
3.1.1. Variabilité des associations culturales (IOS)

Une étude démarrée en 1966, sur huit principales « strates homogènes » ou écosystèmes (cinq en région bamiléké et trois en région bamoun) bien différenciés montre leur très grande variabilité (Valet, 1974). Les densités mesurées par la somme des IOS de chaque culture (indice d'occupation du sol), hors arbres et arbustes, varient de 1,04 à 3 environ en région bamiléké et de 1,4 à 1,74 en région bamoun. La couverture du sol de ces associations est supérieure de 1,04 à 3 fois à celle d'une monoculture. Le nombre d'espèces varie de 7 à 13 et de 9 à 13 respectivement en région bamiléké et bamoun. Ces valeurs ont été confirmées par de Ravignan (1969) et Autfrey (1985) : 92 % des champs avaient un IOS supérieur à 1 (extrêmes : 0,8 à 9 avec une valeur moyenne de 3,22, une médiane de 2 et un quartile faible de 1,1). Ces associations appartiennent à la classe des cultures associées hétérogènes et en relais (Baldy et Stigter, 1997).

3.1.2. Identification des facteurs discriminants de la variabilité des associations culturales

Fertilité actuelle du sol

Les IOS, hors arbres et arbustes, croissent fortement avec la fertilité actuelle du sol (exprimée par la somme des cations échangeables ou le C %) pour le maïs et les phaseolus, mais celui de l'arachide et du *vigna sinensis* décroît (fig. 1). Les tubercules locaux (taros, macabos, manioc et ignames) et les pommes de terre ont tendance à augmenter avec la fertilité des sols. Cette affinité maïs-phaseolus et cette répulsion maïs-arachide sont une constante importante bien intégrée par les paysans mais pas observées par Autfrey (1995) et Kleitz (1988).



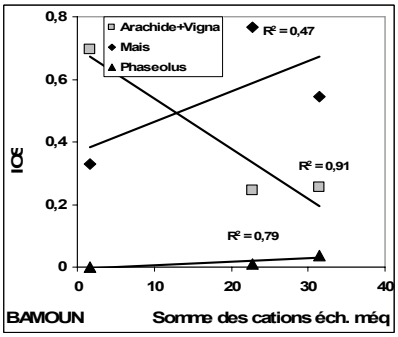


Fig. 1. Relation entre l'IOS du maïs, arachide et haricot, et la fertilité actuelle des sols (somme des cations échangeables en m.éq/100 g) en régions A, Bamiléké (Be), et B, Bamoun (Bm), 1967

L'effet symbiotique entre le maïs et les phaseolus est dû au transfert d'azote vers la céréale (Trenbath, 1976). Le plus fort IOS des phaseolus en région bamiléké qu'en région bamoun assurerait un plus grand apport d'azote au maïs, compensant la mauvaise minéralisation de la matière organique sous un climat plus humide, plus nuageux et brumeux et moins chaud qu'en région Bamoun.

Risque de déficit hydrique climatique et édaphique

Dans l'Ouest-Cameroun, c'est bien ce double risque qui a été empiriquement intégré par les agriculteurs. Ils limitent les IOS à moins de deux en région bamoun où existe un risque plus élevé de sécheresse climatique, dont les effets sur les rendements seraient plus importants qu'en région bamiléké. En effet, la richesse des sols, la plus forte insolation et le plus faible ennuagement entraînant une meilleure minéralisation de l'azote avec une demande hydrique du double favorisent des rendements pratiquement du double de ceux des différentes cultures de la région bamiléké : maïs 24 qx ha^{-1} à 33 qx ha^{-1} contre 33 qx ha^{-1} à 64 qx ha^{-1}, et pour le café, 2,50 qx ha^{-1} contre 5 qx ha^{-1} (Valet, 1966-1971). Pour réduire le risque d'une sécheresse édaphique dans ces deux régions sur les sols à régime Ustic, les paysans limitent les IOS à 1,5 sur les versants et en sols gravillonnaires. Sinha *et al.* (1985) indiquent que quatre plantes consomment seulement 28 % de plus par hectare que chaque monoculture.

Ameublissement du sol

Le billonnage manuel assure un plus fort ameublissement sur une plus grande profondeur que le labour mécanique suivi d'un billonnage sur tous les types de sol très contrastés, favorisant donc une plus intense infiltration et un meilleur ressuyage du sol qui limitent les engorgements éventuels. Il permet une meilleure densité racinaire (*Root equivalent Ratio*) grâce à une grande vitesse d'installation du système racinaire et son meilleur étagement. Ceci assure un large éventail de services écologiques et des facilités d'interconnections des mycorhizes (Hauggaard et Jensen, 2005).

3.1.3. Variabilité des rendements (LER)

Les essais conduits dans l'Ouest-Cameroun, de 1968 à 1972, sur l'association ternaire basique (maïs, taro et macabo), montrent une corrélation positive entre engrais et les rendements augmentant avec la fertilité actuelle du sol (fig. 2). Les rendements des associations ont été rapportés a ceux des monocultures définissant un LER (*Land Equivalent Ratio*). Cette réponse (pente des droites) décroît du taro au macabo et au maïs, reflétant leur sensibilité croissante à la fertilité du sol. Pour seulement trois plantes, les LER varient déjà de 0,6 à 1,53, alors qu'en milieu traditionnel, avec un total de sept à treize plantes, les LER dépassent 2.

Njoku *et al.* (1984) ont démontré que les associations culturales réduisaient le lessivage de l'azote et des nutriments, ce dû à une meilleure utilisation.

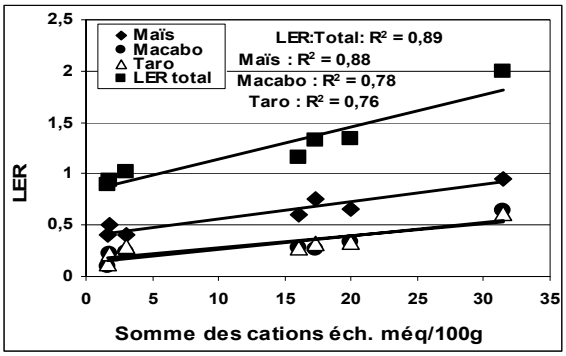


Fig. 2. Relation entre le LER total, le LER du maïs, du macabo et du taro, et la fertilité actuelle des sols (somme des cations échangeables en m.éq/100g) dans l'Ouest-Cameroun (1968-1972).

3.2. À l'échelle du bassin versant unitaire

Une enquête conduite dans la chefferie de Bafou, proche de Dschang, sur 486 champs a montré une grande variabilité de la répartition des trois principaux systèmes agricoles associés : cultures vivrières sans café (CV), avec café (CV + Café) et prairie et jachère (PA + Jac) (Autfrey, 1985). Cette variabilité s'explique par la géomorphologie et la distribution de la fertilité sur le versant et entre les géofaciès (Valet, 1967b et 1999). La corrélation est excellente entre le pourcentage qu'occupent ces systèmes et le pourcentage de la pente la plus faible (12 %) sur les trois positions du versant en fonction de l'altitude (fig. 3A, B, C). En haut de versant, le système « prairie-jachère » diminue alors que le système « cultures vivrières et café » augmente, le système « cultures vivrières » reste quasi constant (fig. 3A).

Fig. 3A

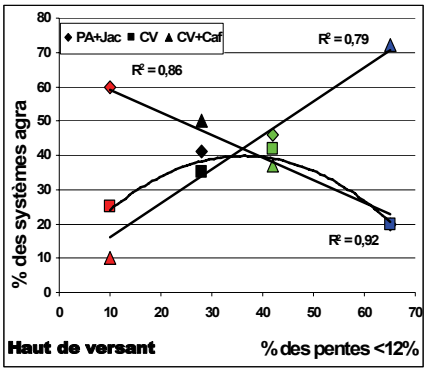


Fig. 3B

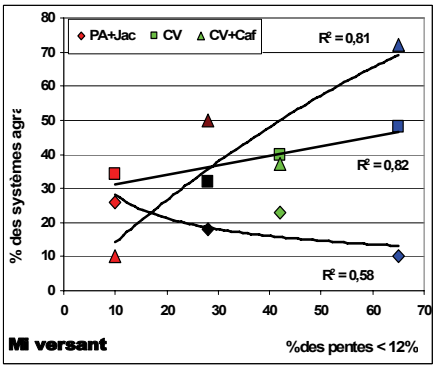


Fig. 3C

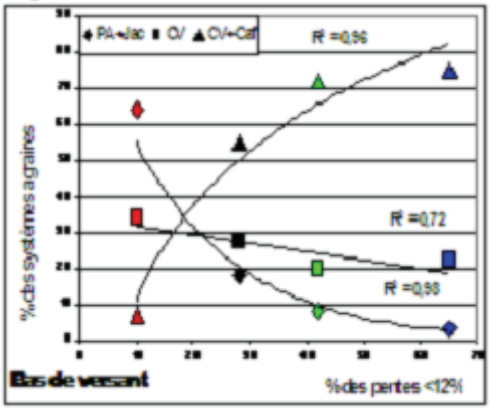


Fig. 3. Corrélation entre le pourcentage des pentes ≤12 % et celles des systèmes de cultures selon la fertilité des paysages agrogéologiques. A : haut de versant ; B : mi-versant ; C : bas de versant (rouge : > 2 000 m, trachytes et roches acides ; noir : 1 600-2 000 m, basalte ; vert : 1 400-1 600 m, granite ; bleu : 1 400-1 600 m, basalte)

Au milieu du versant, les deux systèmes « cultures vivrières » et « cultures vivrières et café » augmentent alors que la « prairie-jachère » diminue proportionnellement (fig. 3B). Et en bas de versant, seul le système « cultures vivrières et café » augmente fortement bien que non proportionnellement alors que les deux autres systèmes diminuent (fig. 3C). La part de la prairie par rapport à celle de la jachère diminue de 38 % à 10 % puis 0 % au sommet et de 40 % à 0 % en bas de pente, en même temps que l'augmentation des systèmes « cultures » et « café ». La présence de café est en général un indicateur de la bonne fertilité des géofaciès de bas de versant et sur basalte à 1 400 m. La répartition spatiale des systèmes agricoles correspond à une connaissance empirique de la qualité agricole des terroirs répartis sur des paysages agrogéologiques de fertilité à très large spectre de fertilité.

3.3. Pertes et bénéfices financiers comparés

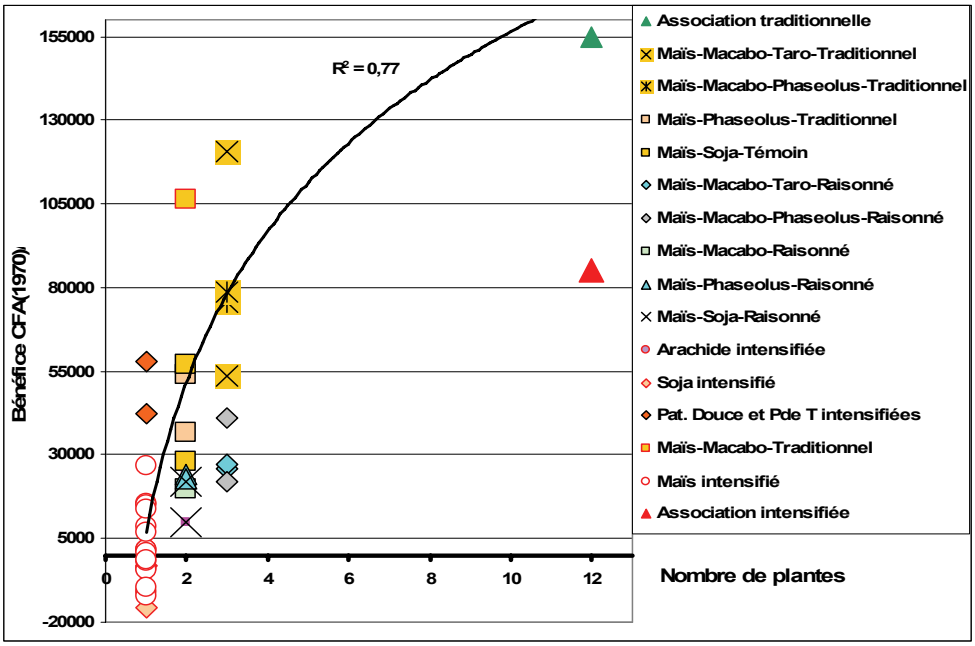


Fig. 4. Évolution des pertes et des bénéfices (CFA) en fonction des systèmes de culture : monoculture, bi-tri et multi spécifique traditionnel, raisonné et intensifié (1970)

Les bénéfices de divers systèmes de cultures associées traditionnelles et raisonnées comparés aux monocultures intensifiées ont été calculés en 1970 pour l'Ouest-Cameroun à partir des essais en station et aux champs (Valet 1972 et 1976). L'accroissement des bénéfices est proportionnel au nombre de plantes par unité de surface ou LER (fig. 4). On constate :

- pour la monoculture intensifiée, des pertes pour le soja, l'arachide et le maïs pour la moitié des essais et des gains plafonnés à 30 000 F CFA pour ces deux dernières ;
- pour la patate douce et les pommes de terre des gains de 40 000 F CFA à 57 000 F CFA environ ;
- pour les associations bispécifiques, le système traditionnel ou le témoin rapporte plus de 55 000 F CFA jusqu'à 105 000 F CFA (maïs–macabo), alors que le système raisonné rapporte moins de 30 000 F CFA ;
- pour les associations trispécifiques, on observe la même césure à 55 000 F CFA entre le système raisonné et le système traditionnel, avec des bénéfices maximums de 120 000 F CFA environ.
- pour les cultures associées traditionnelles, avec 12 plantes vivrières, le système traditionnel rapporte 155 000 F CFA contre 85 000 F CFA en culture intensifiée ; les revenus des arbres et arbustes n'ont pas été comptabilisés.

La dérégulation libérale obligeant le Cameroun à supprimer les subventions agricoles dans les années quatre-vingt, suivie en 1994 de la dévaluation de 50 % du franc CFA, imposée par la Banque mondiale, la disparition de la protection douanière puis de la baisse constante des cours mondiaux due à la « mondialisation » devraient encore creuser l'écart entre les bénéfices obtenus dans les associations traditionnelles et celles des monocultures intensifiées au profit des premières !

3.4. Éco-aménagement traditionnel et innovant soutenu

L'échec des divers aménagements antiérosifs (LAE, PDRPO puis PHPO) repose sur l'incohérence totale entre l'objectif « intérêt général » de lutte antiérosive par une logique d'équipement lourd et par les techniques inconcevables et les objectifs des cultivateurs (Roose *et al.*, 1995 ; Roose et De Noni, 2004). Pourquoi faire compliqué et onéreux quand il est possible de faire simple à moindre coût ? C'est l'écologie qui doit fournir le modèle conceptuel de la gestion conservatoire des écosystèmes anthropiques en associant les méthodes autochtones complétées par d'autres empruntées à l'extérieur et des apports modernes complémentaires innovants qui ne seraient pas contradictoires avec les stratégies paysannes. L'agroforesterie regroupant les cultures associées traditionnelles et le « bocage tropical » enserrant ces cultures est la meilleure technique biophysique à implanter (Valet *et al.*, 2007). Cela correspond bien aux techniques recommandées par la GGES et à certaines de ses applications, notamment au Rwanda, pour restaurer des terres particulièrement dégradées (Roose et De Noni, 2004). L'élagage des haies et des arbres dans les associations fournirait de plus un amendement organique (bois raméaux fragmentés) (Dodelin et Valet, 2007). C'est une technique originale mise au point par les forestiers canadiens basée sur l'utilisation des rameaux (diamètre inférieur à 8 cm) fragmentés, considérés normalement comme des déchets non exploités. Ils représentent une source d'énergie à lente dégradation de la lignine en fournissant un carbone stable (Dodelin, 2007 ; Lemieux *et al.*, 1999). Ils sont riches en nutriments, sucres, protéines, cellulose et lignines après biotransformation et non-décomposition qui jouent un rôle spécifique :

- dans l'aggradation des sols productifs ;
- dans l'augmentation significative de la production agricole : tomate amère, maïs, seigle, aubergine locale et niébé (Kalemba et Ndoki, 1995 ; Furlan et Lemieux, 1996) ;
- dans la baisse et le contrôle des attaques des nématodes, pucerons et sclérotes, des fongus et des insectes sur le seigle avec limitation de la germination des adventices (Chervonyl, 1999).

Il réduit l'effet de serre et se positionne pour l'après-pétrole.

Au Cameroun, après six mois seulement, ces haies filtrent et retiennent 95 % de la charge solide, mais maintiennent le ruissellement, alors qu'au Burundi, elles éliminent le ruissellement et le report hydrique (Duchaufour *et al.*, 1996). De plus, ces haies permettent une amélioration de la fertilité et du rendement, notamment par remontée des nutriments et par la biomasse produite : 102 kg ha^{-1} an^{-1} à 124 kg ha^{-1} an^{-1} de N, 6 kg ha^{-1} an^{-1} à 9 kg ha^{-1} an^{-1} de P_2O_5 et 18 kg ha^{-1} an^{-1} de K

et le CO (Ndayzigiye 1993). À la Réunion, sur fortes pentes et sous climat tropical, une haie de *Calliandra calothyrsus* améliore l'état structural des andosols très sensibles à l'érosion (Cattet, 1996).

CONCLUSION

Après deux siècles d'exploitation intensive et ininterrompue dans l'Ouest-Cameroun, malgré la forte densité démographique, l'agriculture multistratifiée traditionnelle reste encore largement excédentaire en produits vivriers. Ceci démontre irrémédiablement que les cultures associées traditionnelles constituent un écosystème déjà innovant et raisonné par la très grande variété des combinaisons possibles pour un développement écologique alternatif face au changement climatique et démographique mais aussi à la « mondialisation » (Valet, 1999). En effet, les paysans font varier qualitativement (espèces et variétés) et quantitativement (IOS) les associations culturales selon la fertilité du sol, l'année de culture, les besoins monétaires, les utilisations alimentaires, la variabilité des cours locaux et mondiaux et la demande locale et internationale. Les rendements cumulés (LER) sans ou avec peu d'engrais minéraux sont nettement supérieurs à ceux des monocultures intensifiées. Leurs bénéfices restent encore les plus attrayants depuis la dévaluation du franc CFA et la dérégulation mondiale. Au Lesotho, pour faire face à la crise agricole due à la sécheresse et à la dégradation du milieu, quelque mille paysans sont revenus au « système Machobane » (7 espèces vivrières cultivées simultanément et en relais). Ces associations et systèmes agraires traditionnels variés structurent le paysage à l'échelle du champ comme à celle du versant.
Je souscris, pour l'avoir fait depuis 1966, au vœu de Milleville (1995) : « *Il serait souhaitable que les savoirs paysans soient plus largement appropriés par les agronomes.* » À l'inverse de la démarche descendante européocentriste proposée par Reyniers (1998), je conseille de développer la démarche ascendante rationnelle utilisée dans cette étude : « Savoirs des paysans – Écosystèmes – Recherche pluridisciplinaire – Écosystèmes – Savoirs des paysans ». Cette démarche nous permettrait de mettre au point une « intensification écologique » en tablant sur les processus écologiques de facilitation interspécique, grâce aux interactions exercées aux niveaux microbiologique, nutritionnel, physicochimique, hydrique, ensoleillement… Un large éventail de services écologiques assure un net accroissement stable du rendement et de la survivance des plantes. Cette approche qui va de pair avec la préservation de l'environnement permettra de réduire les nuisances, de mieux valoriser les ressources rares comme l'eau et le sol, ou encore de contribuer à la conservation de la biodiversité afin de reconstituer les services écologiques que l'agriculture peut rendre à la société. Mais il faut analyser les paramètres de la diversité fonctionnelle des écosystèmes cultivés pour l'optimisation des ressources, la résilience et l'économie d'intrants.

Il serait souhaitable de commencer à étudier les associations vivrières et industrielles (café, bananes, ananas, plantain…), si variées et exubérantes sous les différentes latitudes, que pratiquent les paysans, avant d'étudier comme le propose Malézieu (CIRAD, 2007) les associations à base de cocotiers, cacao, hévéa, et palmier à huile en association avec des bananiers, plantain et tubercules mais aussi la vigne, avec une couverture herbacée pour les « booster ». Le souci

du CIRAD, depuis soixante ans, n'est-il pas d'éradiquer enfin la faim et la pauvreté à l'horizon 2012 ? Ne va-t-on pas vers un nouveau forçage scientiste ? N'assisterons-nous pas à une nouvelle mystification si ces systèmes ne sont étudiés que pour sauver les grandes plantations industrielles et satisfaire les grandes sociétés mondialisées ? La coopération ne doit-elle pas être choisie et non toujours subie par les pays du Sud ?

Références bibliographiques

AUTFREY P., 1985. *Cultures associées et systèmes de culture en pays bamiléké (Ouest-Cameroun)*. Centre universitaire de Dschang-CNEARC, mémoire 1re année ESAT. 82 pp. + annexe.

AUTFREY P., 1995. Systèmes de cultures associées sur les hauts plateaux bamilékés de l'Ouest-Cameroun. Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. Actes du séminaire, 13-17 nov. 1995. 310-317.

BALDY C., STIGTER C. J., 1997. Agrometeorology of multiple cropping in warm climate. INRA, Paris, 236.

CATTET R., 1996. La légumineuse arbustive *Calliandra calothyrsus* comme protection des Andosols à la Réunion. *Cahiers Agricultures*. AUPELF-UREF/John Libbey Eurotext. 5, 3 : 157-160.

CIRAD Lettre d'Information, n° 22, octobre 2007.

CHERVONYL A. Y., 1999. *Rapport d'étape sur la technologie des BRF, utilisant le seigle comme référence pour les années 1997-98*. N° 107. Université Laval. Département des Sciences des Bois et de la Forêt. Québec. 61 pp.

DODELIN B., VALET S., 2007. *Du bois raméal fragmenté ? Tout commence avec la forêt*. Journée du Lycée agricole d'Ismier.

DUCHAUFOUR H., GUIZOL P., BIZIMANA M., 1996. Avantage et inconvénients comparatifs de la haie mixte Calliandra/Setaria et du mulch comme dispositif anti-érosif en milieu rural burundais. *Bull. Réseau Érosion*, 16 : 132-151.

FURLAN, LEMIEUX G., 1996. Méthode d'application et d'évaluation pour l'utilisation des bois raméaux fragmentés. N° 67. Groupe de coordination sur les BRF. Université Laval. Département des Sciences des Bois et de la Forêt. Québec. 8 pp.

HAUGAARD-NIELSEN, JENSEN E. S., 2006. Facilite root interactions in intercrops. *Plant and Soil* 274 : 237-250.

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 1995. CIRAD, Montpellier, 231-237.

LEMIEUX G., LACHANCE L., STEVANOVIC-JANEZIC T., 1999. *La structure des sols et le bilan du carbone : une fonction de l'effet de serre*. Groupe de coordination sur les BRF. Université de Laval. Département des Sciences des Bois et de la Forêt. Québec. 8 pp.

NDAYIZIGIYE F., 1993. Effets des haies arbustives (*Calliandra et Leucena*) sur l'érosion, le ruissellement et les rendements (Rwanda) *Bull. Réseau Érosion*, Montpellier, 13 : 41-51.

MBOMDA J., 1985. *Essai de classification des exploitations agricoles de la chefferie de Bafou*. CUDS, 35 pp.

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 pp.

RAVIGNAN DE, 1969. *Étude de la production vivrière dans la ZAPI de Menguémé (Centre Sud du Cameroun)*. Doc. ronéoté MD 206, 24pp.

REYNIERS .F.-N. 1998. Présentation du projet DHMC et des objectifs du séminaire final : pour une approche éco systémique de l'amélioration des écotypes locaux de sorgho et de mil. « Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride ». (Bacci et F.-N. Reyniers (édit.). Actes du séminaire Projet STD3 TS3 93.0223 : *Risques et intensification : le diagnostic hydrique et minéral des céréales dans les pays sahéliens et les zones communautaires du Zimbabwe*, CIRAD, Montpellier, p. 19.

ROOSE E., NDAYZIGUIYE F., SEKAYANGE L., 1995. 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. Pédologie,* 28, 2 : 327-349.

ROOSE E., DE NONI G., 2004. La Gestion Conservatoire de l'Eau et de la Fertilité des Sols (CGES). Une stratégie nouvelle pour faire face à un double défi du XXIe siècle : la pression démographique et l'environnement rural. IRD, Montpellier, *Bull. Réseau Érosion*, 23, 2 : 10-27.

SINHA A. K., NATHAN A. K., SINGH A. K., 1985. Radiation climate and water-use studies in intercropping systems. *J. Nuclear Agric. Biol*. 14, 2 : 64-69.

TARDIEU M., 1970. *Tentative dans la fertilisation des cultures associées*. Séminaire Fondation Ford/IRAT/IITA sur les systèmes traditionnels de l'agriculture africaine et leur amélioration. Ibadan, 16-20 nov. 1970.

TRENBATH B. R, 1976. Plant Interaction in mixed crop communities. In Multiple Cropping Eds., RI Papendick, P.A. Sanchez, G.B. Triplett. pp. 129-169. ASA special Publication N° 27, ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI, USA.

VALET S., 1966. *Le climat de Dschang*. IRAT/DEVE-CIRAD, Montpellier. 12 pp.

VALET S., 1967a. Principe d'organisation des régions naturelles en strates homogènes et son application à l'Ouest-Cameroun. (Premiers résultats). *Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux*. Tananarive, 19-25 nov.1967. 355-380.

VALET S., 1967b. Recherche des carences minérales des sols de l'Ouest-Cameroun, en vases de végétation. *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux*. Tananarive, 19-25 nov.1967. 341-354.

VALET S., 1968. *Premiers résultats de la fertilisation minérale dans les conditions pédoclimatiques de l'Ouest-Cameroun*. Miméo IRAT-Dschang Cameroun. 55 pp.

VALET S., 1969. *Besoin en eau et production végétale dans l'Ouest-Cameroun*. Miméo IRAT Réunion de Programmation Bouaké, Côte d'Ivoire. IRAT, Montpellier. 12 pp.

VALET S., 1974. Note sur des observations et mesures de quelques facteurs climatiques, physiques et pédologiques et de leur incidence sur la production agricole à la station de Dschang (Cameroun). *Agron. Trop.* 29, 2 : 1266-1287.

VALET S., 1976. *Observations et mesures sur des cultures associées traditionnelles en pays bamiléké et bamoun. (Essais de fertilisation et de pré vulgarisation de fumures- Cameroun).* IRAT, Dschang-Cameroun. IRAT, Montpellier. 38 pp.

VALET S., 1980. *Etude des paramètres du milieu physique pour l'élaboration de cartes de zonation géoclimatique des pentes des paysages agro-géologiques et de mise en valeur de l'Ouest-Cameroun. 1/200 000*. 24 pp. IRAT, Montpellier.

VALET S., 1985. *Notice explicative des cartes du climat, des paysages agro-géologiques et des propositions d'aptitude à la mise en valeur des paysages agro-géologiques de l'Ouest-Cameroun (1/200 000)*. IRAT-CIRAD-DEVE. Montpellier.118 p, 7 cartes.

VALET S., 1999. L'aménagement traditionnel des versants et le maintien des cultures associées traditionnelles : cas de l'Ouest-Cameroun. Colloque International *L'homme et l'Erosion*. IRD-CIRAD. Montpellier, 12-15/12/1999. Yaoundé, Cameroun. 17 pp.

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., LE COUSTUMER P., MOTLICA M.-H. 2007. Les techniques de contrôle du ruissellement et du report hydrique comme outils de gestion et de valorisation agro-forestières : séquestration du carbone et augmentation de la biomasse. Colloque international *Les rémanents en foresterie et agriculture- les branches : matériau d'avenir !*, Lyon, université de Savoie.

ÉROSION ET STOCKAGE DU CARBONE SOUS L'EFFET DE L'UTILISATION DES TERRES EN ZONE DE SAVANE SOUDANIENNE BASSIN DE DJITIKO (SUD-MALI)

Drissa DIALLO*, Didier ORANGE et Eric ROOSE*****

** Laboratoire d'agropédologie, IPR de Katibougou, B.P. 6, Koulikoro, Mali, drdiallo@ird.fr,*
*** IRD, UR ECU, 57 Tran Hung Dao, Hanoi, Vietnam, d.orange@cgiar.org*
**** IRD, UR SeqBio, B.P. 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France, Eric.Roose@ird.fr*

Abstract

For the first time, in Mali, carbon eroded and C-stored in the soil have been measured on 17 runoff plots during two campains (1998 and 1999), in relation to two main cropped soils (vertisols and tropical ferruginous soils) and 4 land uses: bare fallow, long bush fallow, intensive cropping rotation corn and cotton with conventional tillage or direct drilling in the residues litter. In the 10 cm topsoils, the C storage under long fallow or no-till system attained 40 t ha^{-1} in the vertic soil, but less than 15 t ha^{-1} in the ferruginous tropical soil. Under conventional plowing or bare fallow, the storage was clearly lower than under long fallow or no-till. The average runoff coefficient was lower on the vertic plots (27%) than on the ferruginous soils (34%). The runoff attaint 39% on bare fallow, 36% under crops with plowing, 25% under crops with no-till and only 22% under long fallow. Erosion increased from vertic soil (respectively, 1,7 t ha^{-1} year^{-1} and 6 t ha^{-1} year^{-1} on fallow and no-till) to (4,8 t ha^{-1} year^{-1} et 7,4 t ha^{-1} year^{-1}) on ferruginous soils.

During these two campains, the average loss of carbon by runoff and erosion varied respectively from 146, to 395 and 184 kg of C ha^{-1} year^{-1} for the fallow, the conventional tillage and the no-tillage on red soil. On the vertic plots, these data varied from 181 kg ha^{-1} year^{-1}under fallow, to 215 kg ha^{-1} year^{-1} under tillage and 283 kg ha^{-1} year^{-1} under no-tillage. The losses of carbon were mainly associated with particles eroded (78% to 90% of the total C losses) during the main storms and the C richness of the topsoil. Erosion explained only a limited part of the Carbon storage variations in the topsoil : the accelerated mineralisation of the organic matters seems also important.

Keywords : *Mali* ; *Vertic or Ferruginous Soils* ; *Carbon Stocks* ; *Carbon Eroded* ; *Land-Uses*.

INTRODUCTION

Les mesures d'érosion sur parcelles (de 100 m^2 à 500 m^2), commencées dans les zones agricoles soudaniennes d'Afrique occidentale au cours des années soixante

et soixante-dix, ont montré que les pertes en terre peuvent être plus ou moins importantes selon les modes d'utilisation des terres (Fauck, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967 et 1981 ; CTFT, 1979 ; Birot, 1981 ; Mietton, 1988). En zone soudanienne du Mali, d'importants bouleversements ont été observés dans les modes de gestion des terres à partir des années quatre-vingt : la diminution de la durée de la jachère, l'intensification des cultures industrielles et la surexploitation pastorale des parcours sont notées parmi ces changements.

Pour la première fois au Mali Sud, l'influence des pratiques culturales (le labour conventionnel et le travail minimum du sol) et du type de sols a été mesurée sur parcelles d'érosion au cours des saisons pluvieuses 1998 et 1999, sur cultures de maïs et coton et sur jachère longue. L'érosion a pu être calculée par la mesure des pertes en terre et du ruissellement. Par ailleurs, le carbone organique étant un élément clé de la valorisation durable des sols, les pertes de carbone dissous et particulaires liées à l'érosion ont été mesurées. Au cours de l'érosion, les nutriments et le carbone organique du sol sont redistribués à travers le paysage et une partie de ces éléments est transférée dans les écosystèmes aquatiques (Starr *et al*., 2000), où ils contribuent au processus d'eutrophisation des eaux de surface et aux émissions de gaz à effet de serre (Feller et Beare, 1997 ; Orange *et al*., 2002). Notre étude concerne donc à la fois les problèmes de développement durable de l'agriculture en milieu soudanien et ceux de la séquestration du carbone à l'échelle globale.

1. LE MILIEU

L'étude a été conduite dans le terroir du village de Ouronina (commune de Bancoumana), dans le bassin versant de Djitiko (12° 03 N., 8° 22 O). Il est situé en zone climatique soudanienne dans le haut bassin du Niger au Sud Mali. Le régime pluviométrique est de type monomodal, avec le maximum mensuel de pluies en août. Au cours des deux campagnes expérimentales (1998 et 1999), la pluviosité a été respectivement de 995 mm et de 1355 mm (mesurée par un pluviomètre au niveau des parcelles d'érosion). Ces valeurs se situent de part et d'autre de la moyenne interannuelle régionale (1 076 mm) mesurée à Kangaba (sur la période 1939-1995), station climatique de référence située à 20 km. Les observations ont donc eu lieu une année légèrement déficitaire (en 1998) et une année fortement excédentaire (en 1999).

Le substratum géologique est formé du socle précambrien (constitué de granite et schiste), couvert par des altérites et des alluvions atteignant 15 m à 35 m d'épaisseur. Les parcelles d'érosion sont placées, d'une part, sur un sol brun vertique et, d'autre part, sur un sol ferrugineux tropical rouge. Ces deux types de sols ont été choisis du fait de leur importance dans les programmes actuels d'intensification agricole au Mali. Ils ont un taux d'argile similaire (de l'ordre de 26 %) et se différencient principalement par la composition du complexe absorbant : il est près de deux fois plus important sur le sol brun vertique que sur le sol rouge. Le sol brun est un sol basique à argile montmorillonitique à CEC élevée alors que les argiles des sols ferrugineux sont essentiellement kaolinitiques. Enfin, les sols vertiques sont situés en bas de la toposéquence étudiée.

La durée du cycle cultural est de l'ordre de 120 jours par an (Sivakumar, 1989). La végétation naturelle est une savane arborée (à *Vitellaria paradoxa, Parkia biglobosa*, *Isoberlinia doka* et diverses combrétacées), avec un tapis graminéen très dense et essentiellement annuel. Le mode de gestion actuel de la biomasse est caractérisé par le passage annuel des feux de brousse (brûlant végétation spontanée et résidus de culture) et le surpâturage des parcours et des champs par les troupeaux de bovins. La rotation coton-maïs est encouragée par les services techniques du ministère chargé de l'agriculture. Le labour à traction bovine atteint une profondeur de l'ordre de 12 cm. Nos mesures d'état de surface mettent en évidence un net contraste entre saison sèche et saison humide, et une nette différence entre jachère et milieu cultivé (Diallo 2000). Il apparaît que le couvert végétal est toujours inférieur sur le sol rouge (SR), surtout en saison des pluies. Le travail minimum du sol permet d'atteindre un recouvrement quasi total (98 %) de la surface du sol. Par contre, c'est la vieille jachère qui donne un meilleur recouvrement en fin de saison sèche : sur sol brun, 41 % contre 13 % et 21 % pour respectivement le labour et le semis direct. Sur sol rouge, le recouvrement descend jusqu'à seulement 8 % avec une parcelle de labour (contre 34 % pour la parcelle de jachère).

2. MÉTHODES

2.1. Évaluation du stock de carbone de l'horizon superficiel

Le prélèvement de sol pour le dosage du carbone au laboratoire a porté sur les 10 premiers centimètres du sol avec trois répétitions sur chaque sol et en fonction de son occupation. Ces prélèvements ont été effectués en saison sèche à la fin de l'automne 1997 puis en début 2000.

2.2. Expérimentation au champ

Les résultats expérimentaux faisant l'objet de cet article sont obtenus sur des parcelles de 100 m² où la pente est comprise entre 1 % et 2 %.

Trois occupations du sol (vieille jachère, culture de maïs puis coton avec la pratique du labour conventionnel, culture avec travail minimum du sol), choisies en fonction des pratiques locales et des objectifs d'amélioration des agrosystèmes, sont testées dans un dispositif incluant des parcelles nues travaillées et sarclées, représentant le « témoin universel ». La jachère arbustive est vieille d'au moins vingt ans. Les cultures sont installées sur des parcelles exploitées par les paysans depuis plus de cinq ans. Le labour est pratiqué en début de saison des pluies, juste avant le semis. Dans le cas de la parcelle cultivée avec travail minimum du sol, en début de saison, les adventices de 15 cm à 20 cm de haut sont tuées par un herbicide total. La parcelle est ainsi couverte par une fine couche de *mulch*. Elle est ensuite travaillée à la pioche sur 15 cm de profondeur, uniquement sur les lignes de semis, juste avant de semer les cultures. Par la suite, l'entretien des cultures est assuré en faisant deux sarclages manuels 15 et 45 jours après le semis.

Les parcelles d'érosion (20 m x 5 m) ont été aménagées de façon classique (Roose, 1980 ; Diallo, 2000). Chaque parcelle est isolée au milieu d'un champ par

des tôles de 25 cm de large, fichées dans le sol sur 15 cm pour éviter tout débordement du ruissellement. À l'aval, un canal réceptionne le ruissellement, et les terres de fond (sables et agrégats, TF) qui circulent par charriage sont collectées dans une première cuve de sédimentation. Puis, les eaux qui débordent avec les suspensions (MES) sont collectées dans deux cuves en béton reliées par un partiteur à tubes. À chaque pluie, sont mesurées les hauteurs de pluie (à 0,1 mm près), la lame ruisselée (à 0,05 mm près), les terres de fond (par pesée humide dans un volume constant en kg ha^{-1}) et les suspensions (turbidité en g l^{-1}). Les paramètres calculés sont le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM en % de la pluie annuelle), la pluie d'imbibition sur sol à l'état sec (Pis en mm) et à l'état humide (Pih), l'érosion totale (E en t $ha^{-1}an^{-1}$) qui cumule les pertes de terre sous forme de sédiments grossiers circulant par charriage (TF en t $ha^{-1}an^{-1}$) et les matières en suspension sous forme de sédiments fins (MES en t $ha^{-1}an^{-1}$), qui peuvent circuler jusqu'au réseau hydrographique.

Après chaque pluie donnant lieu à un ruissellement, trois échantillons sont prélevés par parcelle : un échantillon d'eau de ruissellement, un échantillon de terre de fond et un échantillon des matières en suspension. Ces échantillons sont stockés au laboratoire et les terres sont séchées à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs. En fin de campagne, pour limiter le nombre d'analyses, nous avons réalisé des échantillons moyens, représentatifs des quatre périodes fonctionnelles de la campagne culturale : des premières pluies à la date du labour (de mai à fin juin), le mois de juillet (allant jusqu'au buttage), le mois d'août, et de septembre jusqu'à la récolte, en novembre ou décembre.

2.3. Dosage du carbone organique et évaluation de la perte de carbone par érosion

Le dosage du carbone organique particulaire (POC) sur les échantillons de sols, sédiments et suspensions, a été fait au laboratoire commun du CIRAD (Montpellier) sur un CHN (Fisons Instrument Na 2000 N-Protein). Le dosage du carbone organique dissous (DOC) sur les échantillons d'eau de ruissellement a été réalisé au laboratoire des sols de l'IRD (Montpellier) sur un Shimadzu TOC-5000. Connaissant le volume d'eau ruisselé et les pertes en terre (TF + MES), il est possible d'évaluer la perte de carbone organique particulaire dans les sédiments et de carbone organique dissous dans les eaux de ruissellement.

3. RÉSULTATS

3.1. Le stock de carbone organique dans le sol

Le stock de carbone dans les 10 premiers centimètres du sol est fonction du type de sol, des techniques culturales et du mode de gestion de la biomasse végétale (tab. 1). Le sol brun vertique montre des stocks trois fois plus importants que ceux du sol ferrugineux tropical : 42,7 t ha^{-1} contre 14,3 t ha^{-1} en situation de jachère. Le stock de carbone du sol sous jachère est toujours nettement supérieur à celui noté sur parcelle cultivée en utilisant le labour conventionnel. Par contre, sur parcelle cultivée avec la technique du travail minimum du sol, le stock de carbone est du même ordre de grandeur que celui mesuré sous jachère : ceci montre l'importance du sous-étage sur l'érosion et sur l'apport de carbone au sol.

Les rapports C/N sont toujours élevés (de l'ordre de 15 à 16), ce qui désigne une matière organique relativement mal décomposée et pauvre en azote sur tout le profil.

3.2. Caractéristiques du ruissellement

Les mesures faites au cours des deux campagnes (1998 et 1999), sur parcelles de 100 m^2 montrent que les valeurs caractéristiques du ruissellement (KRAM, Pis et Pih des tableaux 3 et 4) diffèrent selon le type de sol et son occupation (végétation naturelle, milieu cultivé). Dans chaque cas, les caractéristiques du ruissellement sont influencées par la quantité annuelle de pluie.

3.2.1. Coefficient de ruissellement annuel moyen

Le coefficient de ruissellement annuel moyen est plus faible sur sol brun vertique que sur sol ferrugineux tropical, et cela, quelles que soient la couverture végétale et les techniques culturales : en moyenne, 27 % sur sol brun contre 34 % sur sol ferrugineux rouge. La parcelle de jachère ruisselle environ deux fois moins que la parcelle nue (22 % contre 39 % en moyenne). Toutes les parcelles cultivées montrent un plus fort coefficient de ruissellement par rapport à la jachère : 36,3 % sur parcelle labourée et 25,3 % sur parcelle de travail minimum du sol. Le travail minimum du sol et le maintien de la litière entre les lignes réduit de 30 % le ruissellement des champs labourés.

3.2.2. Pluie d'imbibition

Le sol brun vertique montre les plus fortes valeurs de pluie d'imbibition : en moyenne, 21,4 mm sur sol brun contre 13,6 mm pour le sol ferrugineux à l'état sec et, respectivement, 10,1 mm et 8,5 mm à l'état humide. Le ruissellement commence donc plus tardivement sur les sols bruns et nécessite des pluies plus abondantes que sur sol ferrugineux.

Il faut noter d'autre part que la pluie d'imbibition dépend de l'occupation du sol et des pratiques culturales : à l'état sec, elle est de l'ordre de 20 mm en milieu cultivé, labouré ou pas, contre, respectivement, 15 mm et 14,1 mm pour la jachère (végétation naturelle) et la parcelle nue (deux surfaces couvertes de pellicules de battance lors des premières pluies). Le travail du sol augmente donc temporairement la rugosité de la surface du sol et sa capacité d'infiltration.

Tab. 1. Qualité chimique de l'horizon de surface (0 cm-10 cm) du sol brun vertique (SB) et du sol rouge ferrugineux (SR) sous différents usages culturaux en novembre 1997 et en janvier 2000 (moyenne de 3 répétitions par prélèvement)

Propriétés du sol	Sol brun vertique (SB)						Sol rouge ferrugineux (SR)					
	Jachère		Labour		TMS	nu	Jachère		Labour		TMS	nu
	1997	2000	1997	2000	2000	2000	1997	2000	1997	2000	2000	2000
pF 2,5 (%)	49,7	-	45,1	-	-	-	26,9	-	27,7	-	-	-
pF 3 (%)	33,1	-	36,5	-	-	-	21,0	-	19,5	-	-	-
Granulométrie												
Argile (%)	27,1	20,8	25,8	27,5	20,8	20,6	35,6	24,8	20,8	14,4	13,1	14,2
Limon (%)	58,0	68,3	58,0	54,3	69,3	56,4	37,2	51,6	51,8	54,3	56,8	65,2
Sable (%)	14,9	10,9	16,2	18,2	9,9	23,0	27,2	23,6	27,4	31,3	30,1	20,6
Complexe absorbant (*)												
Ca (meq/100 g de sol)	24,1	20,7	18,4	25,0	24,1	16,2	4,5	3,5	2,8	1,6	2,3	3,3
Mg (meq/100 g de sol)	8,1	5,9	6,3	8,6	6,0	5,5	3,0	2,4	1,4	0,7	1,1	1,2
K (meq/100 g de sol)	1,1	0,7	0,8	0,6	0,9	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1
CEC (meq/100 g de sol)	35,1	26,4	27,7	35,0	31,2	20,1	8,8	6,7	5,0	3,2	3,8	4,7
S(Ca, Mg, K, Na) (meq/100 g de sol)	33,4	27,5	25,7	34,3	31,1	22,3	7,8	6,3	4,4	2,5	3,7	4,4
pH (cobalt)	6,6	6,4	6,8	6,5	6,6	6,1	5,6	6,2	5,0	5,7	6,5	6,2
Matière organique (mg g^{-1})	-	6,61		6,55	7,04	3,94	-	1,89		1,19	1,49	1,26
C (mg g^{-1})	2,29	3,84		3,81	4,10	2,29	1,15	1,10		0,69	0,87	0,74
N (mg g^{-1})	0,15	0,246		0,231	0,250	0,145	0,075	0,074		0,048	0,062	0,051
C/MO	-	0,58		0,58	0,58	0,58	-	0,58		0,58	0,58	0,59
C/N	15,3	15,6		16,5	16,4	15,8	15,3	14,9		14,4	14,0	14,5

(*) Méthode cobalti-hexamine

Tab. 2. Influence du type de sol et de la gestion de la biomasse sur le ruissellement (valeurs moyennes de 1998 et 1999)

Occupation du sol et pratiques agricoles	Coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM %)		
	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Moyenne
Parcelle nue	32,6	45,5	39,1
Jachère	21,6	21,9	21,8
Labour	27,4	45,2	36,3
Travail minimum du sol	25,8	24,8	25,3
Moyenne	26,9	34,4	

3.3. Les pertes en terre

Les plus fortes érosions annuelles sont mesurées sur le sol ferrugineux tropical quels que soient le couvert végétal et les pratiques culturales. Sur les deux types de sol, l'érosion mesurée sur parcelle labourée est nettement plus importante que celles mesurées sous jachère et sur parcelle de travail minimum du sol. Il faut noter que la perte en terre varie d'une année à l'autre, quels que soient le sol et son occupation, en fonction de l'agressivité des pluies.

Tab. 3. Influence du type de sol et du mode de gestion de la biomasse sur l'érosion annuelle

Occupation du sol et pratiques agricoles	Érosion annuelle t ha^{-1} an^{-1}		
	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Moyenne
Parcelle nue	43,1	46,8	45,0
Jachère	1,7	4,8	3,3
Labour	14,1	21,4	17,8
Travail minimum du sol	6	7,4	6,6

3.4. Les pertes de carbone

3.4.1. Les teneurs en carbone dissous (DOC) des eaux de ruissellement

Les teneurs des eaux de ruissellement en carbone organique dissous (DOC) varient nettement d'une année à l'autre : de 1 mg l^{-1} à 4 mg l^{-1} en 1998 et environ de 10 mg l^{-1} à 13 mg l^{-1} en 1999. L'influence des pratiques agricoles sur ces teneurs n'est pas nette. Cependant, les eaux de ruissellement issues des parcelles

« travail minimum » présentent, le plus souvent, les plus faibles teneurs en carbone dissous.

3.3.2. Les teneurs des sédiments en carbone organique particulaire (POC)

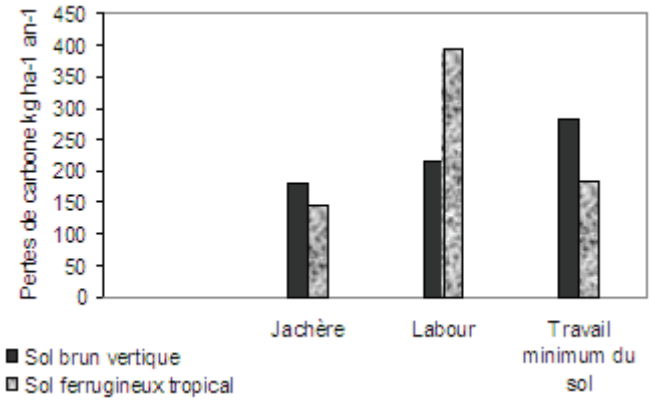
Tout comme les eaux de ruissellement, les sédiments prélevés montrent des teneurs de carbone très variables d'une année à l'autre, mais en sens contraire. La comparaison des teneurs en POC pour diverses pratiques agricoles montre, dans la plupart des situations, des teneurs plus élevées dans les sédiments issus de jachère, suivis par ceux du travail minimum du sol. Dans tous les cas, à l'opposé des eaux, les sédiments de 1998 sont plus riches en carbone que ceux de 1999, et cela, quels que soient le type de sol et la pratique agricole. Les sédiments fins (MES) montrent, dans le cas général, des teneurs de carbone particulaire plus élevées que les sédiments grossiers, avec un rapport restant inférieur à 2.

3.3.3. Les pertes annuelles de carbone à l'échelle de la parcelle de 100 m^2

Les pertes de carbone varient beaucoup d'une année à l'autre, quels que soient le type de sol, son occupation et la pratique agricole. Par exemple, sous jachère, les pertes mesurées ont été de 125 kg ha^{-1} an^{-1} sur sol brun vertique et de 90 kg ha^{-1} an^{-1} sur sol ferrugineux en 1998 contre, respectivement, 238 kg ha^{-1} an^{-1} et 202 kg ha^{-1} an^{-1} en 1999. Les valeurs moyennes des deux années montrent de plus faibles pertes de carbone sous jachère par rapport aux parcelles cultivées (v. fig. page suivante). Le labour occasionne plus de perte de carbone que le travail minimum (rapport voisin de 2) sur sol ferrugineux tropical, contrairement à ce qui est observé sur sol brun vertique, où la perte de carbone est plus importante avec le travail minimum du sol (sol plus riche, semble-t-il). Dans toutes les situations, les pertes de carbone sont nettement plus importantes sous forme particulaire que dissoute (environ 10/1).

3.3.4. Évolution des flux de carbone

Dans une situation (de sol, de couvert végétal ou de pratique culturale) donnée, les flux de carbone sont différents d'une période à l'autre au cours de la saison pluvieuse. De façon générale, ces flux sont plus importants en juillet et août, qui correspondent aussi aux mois les plus pluvieux de l'année.



Influence du type de sol et des pratiques agricoles sur l'érosion du carbone (valeurs moyennes de 1998 et 1999)

4. DISCUSSIONS

4.1. Le stockage du carbone dans le sol

La variabilité du stock de carbone en fonction du sol peut s'expliquer par la nature minéralogique des matériaux pédologiques. Une nette prépondérance de la kaolinite (à faible charge électrique) dans le sol ferrugineux tropical n'est pas favorable au stockage du carbone dans le sol. Les meilleurs stocks enregistrés sous jachère et sur parcelle cultivée avec la pratique du travail minimum du sol peuvent s'expliquer par des raisons différentes. La jachère correspond à une plus longue période d'accumulation et de décomposition des débris végétaux. Ce qui est observé au niveau de la parcelle de travail minimum du sol peut s'expliquer par deux facteurs favorables : la stimulation de la production de biomasse (fertilisation minérale) et l'accélération de l'activité faunique, liée à l'accumulation de *mulch*, suite à l'herbicidage de début de saison.

4.2. Ruissellement et érosion

Les différences de caractéristiques de ruissellement et d'érosion observées ici entre sol brun vertique et sol ferrugineux tropical sont principalement liées aux caractéristiques minéralogiques et organiques de ces sols. Toutes ces propriétés qui influent sur la stabilité structurale et la résistance à l'érosion sont plus favorables sur le sol brun vertique en place (Diallo *et al*., 1998 ; Diallo 2000). En ce qui concerne l'influence du mode de gestion de la biomasse, notons que la jachère et le travail minimum du sol ont le mérite de protéger le sol contre l'agression des pluies et de favoriser l'infiltration. La plus forte érosion annuelle de 1999 est une conséquence de la forte pluie enregistrée.

4.3. Érosion du carbone

La teneur en carbone des eaux de ruissellement et des sédiments semble dépendre des types de sol, et, dans une moindre mesure, des pratiques agricoles :

la concentration en carbone du matériau pédologique influence directement la teneur en carbone des sédiments qui y sont arrachés, de même que celle des eaux qui véhiculent ces sédiments. Cela explique les plus fortes teneurs des eaux et des sédiments issus des parcelles de sol brun vertique, plus riche en carbone que le sol ferrugineux tropical. Dans la même situation pédologique et d'utilisation des sols, la quantité annuelle de pluie semble avoir une nette influence sur la teneur en carbone des eaux de ruissellement et des sédiments. Une forte quantité annuelle de pluie favorise la désagrégation des particules du sol et la libération de la matière organique : les eaux de 1999 sont, en effet, plus riches que celles de 1998. Dans tous les cas, la quantité annuelle de terre érodée et le volume d'eau ruisselé déterminent la quantité de carbone perdue par an, d'où les plus importantes pertes de carbone en 1999. Dans le détail, les pertes de carbone au cours de différentes périodes de la saison restent fonction des précipitations reçues, facteur déterminant le ruissellement et l'érosion, toute condition étant égale par ailleurs.

CONCLUSION

Le stock de carbone dans la couche superficielle du sol dépend fortement du type de sol, de la teneur et du type d'argile, des pratiques agricoles et du mode de gestion de la biomasse. La pratique du travail minimum du sol, testée dans ce milieu pour la première fois, se montre efficace par son influence sur le stock organique du sol, le ruissellement et l'érosion. Son rôle dans le contrôle de la perte de carbone par érosion est comparable à celui de la jachère. Les deux années de mesure ont montré que le labour est responsable d'une plus grande perte de carbone. Cependant, la poursuite des expérimentations est nécessaire pour caractériser davantage l'influence des pratiques agricoles sur les pertes de carbone, en fonction des variations climatiques.

Références bibliographiques

BIROT P., 1981. Les *processus d'érosion à la surface des continents*. Masson. 607 pp.

CTFT, 1979. *Conservation des sols au Sud du Sahara*. Min. Coop., Paris, 295 pp.

DIALLO D., 2000. *Érosion des sols en zone soudanienne du Mali. Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut-Niger)*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier de Grenoble : 202 pp.

DIALLO D., ROOSE E., BARTHÈS B., KHAMSOUK B., ASSELINE J., 1998A. Recherche d'indicateurs d'érodibilité des sols dans le bassin versant de Djitiko (Haut-Bassin du Niger au Sud Mali). *Bull. Réseau Érosion* 18 : 336-347.

DIALLO D., ROOSE E., BARTHES B., 1999. Comparaison de tests d'érodibilité des sols en laboratoire et de mesure sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko (zone soudanienne du Mali-sud). *Bull. Réseau Érosion* 19 :168 –175.

FAUCK R., 1956. *Érosion et mécanisation agricole en Casamance (Sénégal)*. Bureau des Sols d'Afrique occidentale, 24 pp.

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

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

MIETTON M., 1988. *Dynamique de l'interface litho-atmosphère : érosion en zone de savane au Burkina Faso*. Thèse d'État en géographie, Univ. Grenoble, 511 pp.

ORANGE D., ARFI R., BENECH V., KUPER M., MARIEU B., SIDIBE I., 2002. Impact de la dynamique hydrologique sur les cycles de nutriments en zone inondable tropicale sahélienne. In Orange D. *et al.* (édit.) : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires, IRD, Paris : 259-277.

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

ROOSE E., 1978. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du plateau Mossi (Haute-Volta) : Gonsé 1968-74. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 16, 2 : 193-223.

ROOSE E, 1979. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite, sous culture et sous savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire : Korhogo, 1967-75. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 17, 2 : 81-118.

ROOSE E., 1981. *Dynamique actuelle de sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées.* Thèse de doctorat ès. Sc. de l'Université d'Orléans, Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, n° 130 : 567 pp.

ROOSE E., PIOT J., 1984. Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau Upper-Volta) . *AISH*, 144 : 485-498.

SIVAKUMAR M.V.K., 1989. *Agroclimatic aspects of rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. Procedings of an international workshop: Soil, crop, and water management systems for rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian Zone (11-16 janvier 1987)*, ICRISAT Sahelian Center Niamey, Niger , 17-38

STARR G.C., LAL R., MALONE R., HOTHEM D., OWENS L., KIMBLE J., 2000. Modeling soil carbon transported by water erosion process. *Land Degrad. Develop*. II: 83-91.

LA GESTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET SES EFFETS SUR LA CONSERVATION DE LA FERTILITÉ DU SOL DANS LE NORD-OUEST DE L'ALGÉRIE

M. MAZOUR*, M. BOUGHALEM, et N. MEDEDJEL*****

** Université de Tlemcen, Algérie, mohamed_mazour@yahoo.fr*
*** Université de Tlemcen, Algérie, boughalem_2000@yahoo.fr*
**** INRF, B.P. 88, Mansourah Tlemcen, Algérie, belaidi_medejel@yahoo.fr*

Abstract

The decrease of total carbon stock in soils of North Western of Algerian landscapes is an important preoccupation in agriculture. Soils which support productivity are highly degraded by water erosion. Traditional land uses practices on these soils show that the continuous exploitation of the soils doesn't present a great erosive risk but affect carbon stocks, particularly by selective sheet erosion. After five years, the improved systems tested may reduce sufficiently erosion risks and increase to 12% organic carbon stock due to biomass produced and restoration of the humic soil layer. The application of conservation water, soil and biomass practices in modern strategy such as GCES is interesting for increased soil organic carbon content and improvement fertility.

Keywords : *Fertility* ; *Land Uses* ; *Erosion* ; *Soil Organic Matter Storage* ; *N.W. Algeria*.

Résumé

La gestion de la matière organique dans les terres cultivées marneuses dans les bassins versants du nord-ouest algérien (région de Sidi Abdelli) a eu des conséquences fâcheuses sur la dégradation de la fertilité des sols. C'est un souci d'actualité pour les différents acteurs des secteurs de l'agriculture, de l'hydraulique et des forêts. L'étude qui rentre dans ce cadre a été menée à l'échelle du versant et des parcelles expérimentales de 100 m² type Wischmeier dans le microbassin versant de Sidi Ahmed Chérif (bassin versant de Isser), en climat semi-aride de l'ouest algérien. Les résultats obtenus montrent que le ruissellement et l'érosion en nappe, quoique modestes (Kram = 6 % ; E =2 t/ha/an), entraînent une perte importante des nutriments et du carbone et affectent ainsi la fertilité des sols. En effet, le carbone organique, élément essentiel de la fertilité, présente des teneurs généralement faibles à l'échelle du versant et des parcelles expérimentales et ne dépasse guère les 2 %. Différents facteurs sont à l'origine de ces faibles taux, notamment les modes d'utilisation des terres. Sur les sols nus et les systèmes traditionnels, les stocks en carbone organique ont diminué de 14 % durant la période 1991-2005, tandis que pour les systèmes améliorés testés, une augmentation d'environ 10 % du stock de carbone a été

enregistrée ; ceci est principalement dû à la biomasse produite et restituée en partie au sol. Pour tous les systèmes d'utilisation des terres, nous pouvons dire que la fertilité est significativement affectée par le caractère sélectif du processus d'érosion dans les versants marneux de Sidi Abdelli comme le montre l'indice de sélectivité du carbone (IS) qui varie de 1,33 à 2. En plus des facteurs qui interviennent sur l'évolution de la matière organique, tels que la pente, les sols et les précipitations, l'exposition semble avoir un rôle particulier sur la séquestration du carbone (environ 60 % de carbone organique en plus sur les versants nord). Enfin, il apparaît que l'application des techniques de conservation de l'eau, du sol et de la biomasse dans le cadre d'une stratégie moderne, tel que la GCES, est intéressante pour une évolution favorable des taux de carbone dans le sol et, donc, de l'amélioration de la fertilité.

Mots clés : N.-O. Algérie, érosion, ruissellement, systèmes de gestion, carbone organique, fertilité, bassin versant.

INTRODUCTION

Les zones situées dans le Nord de l'Algérie constituent l'essentiel des zones productives. Or, du fait de l'érosion qui touche 20 % de leur surface, ces zones à la fois riches et fragiles sont de plus en plus menacées par l'érosion hydrique. Même si les conséquences de ce phénomène ne sont pas toujours spectaculaires, cela induit une diminution du stock des nutriments dans le sol par érosion sélective et, indirectement, affecte la fertilité des sols et leur potentiel productif et provoque une chute grave des rendements.

Dans les systèmes traditionnels appliqués, le rôle attribué à la gestion de la fertilité est tout à fait aléatoire. Aujourd'hui, le souci de préserver la qualité des sols à long terme et les préoccupations environnementales sur l'érosion, les polluants des eaux ou l'évolution de la teneur en CO_2 de l'atmosphère remettent l'accent sur ce constituant des sols (Chenu et Balabane, 2001).

Actuellement, les terres en Algérie font l'objet de modifications d'usage des sols (reconversion, programmes de reboisement, plantations fruitières….). Les recherches actuelles tendent vers l'application de systèmes de gestion qui visent essentiellement un maximum de couverture du sol en augmentant la biomasse aérienne et souterraine pour relever le niveau de fertilité et limiter l'érosion hydrique. Le présent travail a pour objectif de caractériser la fertilité des sols par l'analyse du ruissellement, des pertes en terre et des stocks de carbone en fonction de certains modes de gestion. Les résultats obtenus permettront de mieux appréhender le problème de la gestion de la fertilité des sols et proposer une nouvelle démarche s'inscrivant dans le cadre de la gestion conservatoire de l'eau et du sol.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Notre étude à été menée principalement à l'échelle des parcelles d'érosion de 100 m² localisées dans les zones marneuses des montagnes semi-arides. Les mesures ont porté sur les pertes de terre, le ruissellement et les stocks de carbone. Les parcelles représentent trois modes d'utilisation des sols :

- un sol nu travaillé annuellement, dépouillé de tous débris végétaux ;

- un système traditionnel qui représente les différentes cultures de la région (rotation céréales/jachère, travail du sol dans le sens de la pente et pâturage libre) ;
- et un système amélioré testé (une rotation biennale blé/vesce-avoine, blé/pois-chiche, une fertilisation raisonnée, une semence sélectionnée et un travail du sol perpendiculaire à la pente).

Le ruissellement et les pertes en terre ont été mesurés, après chaque pluie, à l'aide des dispositifs de cuves installés en aval de chaque parcelle. Pour analyser la dynamique du carbone, des prélèvements d'échantillons moyens de sol sur une épaisseur de 0 cm-10 cm ont été recueillis pour chaque parcelle du dispositif expérimental au cours de quinze années de mesures pour la détermination des stocks, tandis que les pertes de carbone ont été mesurées au niveau des sédiments par des prélèvements sur les terres fines érodées, et ceci, après chaque évènement pluvieux durant l'année 2001.

À l'échelle du versant, nous avons procédé à un échantillonnage aléatoire sur terres cultivées et sur parcours sur les versants exposés nord et sud, selon un transect amont-aval. Pour caractériser le statut organique, nous avons mesuré les teneurs en carbone selon la méthode Anne.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats du ruissellement et des pertes en terre présentés dans le tableau 1 sont modérées durant ces dernières années déficitaires (hauteur moyenne des pluies de 331 mm) sur sol brun vertique. Le coefficient moyen annuel (Kram) le plus élevé se rencontre notamment sur le sol dénudé et exposé aux différents aléas climatiques (parcelle standard, sol nu), légèrement moins pour la parcelle cultivée traditionnelle, et diminue de 25 % sur parcelles améliorées. Sur cette dernière, on note une diminution du taux de ruissellement maximum de 38 % par rapport à celui de la parcelle standard.

Tab. 1. Érosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Sidi Ahmed Chérif A. Exposition sud-ouest (1991-2005) Tlemcen

		Parcelle nue standard			Système traditionnel			Système amélioré		
	Pluies (mm)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)
1991	371	09,9	34,6	3,60	7,1	33,0	3,20	4,4	20,0	1,20
1992	243	08,8	26,5	2,22	6,1	12,7	0,87	2,8	08,1	0,40
1993	268	05,1	12,5	0,73	4,1	11,2	0,41	0,9	02,4	0,28
1994	256	09,2	13,1	0,99	7,5	12,8	1,00	3,9	06,0	0,40
1995	541	10,8	36,5	05,9	7,8	28,7	3,95	6,4	20,0	2,10
1996	260	05,5	09,8	1,68	5,2	12,8	1,20	3,5	07,0	0,30
1997	349	09,9	27,2	4,30	7,1	18,0	2,60	6,6	16,0	2,00
1998	260	04,3	08,6	1,52	4,6	09,0	1,60	2,6	08,9	0,60

		Parcelle nue standard			Système traditionnel			Système amélioré		
	Pluies (mm)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)
1999	253	03,6	08,2	0,61	2,0	08,0	0,40	1,4	06,0	0,20
2000	413	07,5	29,8	3,24	6,5	26,0	2,30	5,0	15,6	0,72
2001	422	07,8	27,6	3,90	7,9	22,8	2,90	6,0	13,0	1,10
2002	405,6	06,8	16,6	2,80	4,2	18,8	1,20	3,4	16,0	0,92
2003	367,2	04,5	14,6	1,98	3,9	16,2	0,96	3,1	14,2	0,80
2004	320,6	05,2	16,1	2,21	4,8	18,7	1,24	3,2	16,1	0,80
2005	321	04,7	13,8	1,87	3,5	16,6	1,28	3,2	12,1	0,78
Moy	336,69	6,90	19,70	2,50	5,48	17,68	1,67	3,76	12,09	0,84
Ecart type	84,99	2,38	9,64	1,46	1,80	7,27	1,06	1,67	5,40	0,57

A Sidi Ahmed Chérif B. Exposition nord-est (1991-2005) Tlemcen

		Parcelle standard			Système Traditionnel			Système amélioré		
	Pluies (mm)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram(%)	Krmax(%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax(%)	Erosion (t/ha/an)
1991	371	9,9	34,6	3,60	7,1	33,0	3,20	4,4	20,0	1,20
1992	243	8,3	25,0	2,20	6,0	13,1	0,92	2,2	08,7	0,37
1993	268	3,8	10,0	0,70	2,6	07,0	0,40	3,3	09,4	0,31
1994	256	6,0	11,1	0,92	5,5	12,8	1,00	3,9	07,0	0,41
1995	541	7,9	35,5	4,90	7,7	28,7	3,90	7,4	22,0	2,10
1996	260	4,5	09,7	1,28	5,6	13,8	0,80	3,5	08,0	0,30
1997	349	8,9	25,2	3,90	6,0	18,0	2,20	6,6	16,0	2,00
1998	260	4,0	08,0	1,22	3,6	07,0	0,90	2,2	08,1	0,30
1999	253	2,0	07,2	0,31	2,0	08,0	0,20	1,3	06,0	0,10
2000	413	6,8	28,8	2,64	5,5	20,0	1,30	5,0	15,0	0,90
2001	422	7,1	22,6	1,90	7,9	22,6	1,80	6,0	14,0	1,20
2002	405,6	6,6	14,2	2,20	4,0	15,8	1,10	3,3	12,0	0,80
2003	367,2	4,5	12,6	1,88	3,8	12,2	0,86	2,7	14,2	0,82
2004	320,6	5,0	15,1	2,11	4,7	12,7	1,14	2,4	11,1	0,76
2005	321	4,4	13,2	1,66	3,2	13,6	1,18	3,2	12,1	0,72
Moy	336,69	5,98	18,18	2,09	5,01	15,88	1,39	3,82	12,24	0,81
Écart type	84,99	2,19	9,60	1,25	1,80	7,53	1,00	1,75	4,68	0,59

Les pertes en terre moyennes annuelles sont modérées, et le sol nu durant toute l'année présente les plus grandes pertes de terre avec une moyenne de 2 t/ha/an sur une période de quinze années, mais qui présente parfois une grande variabilité interannuelle de l'érosion, laquelle peut aller de quelques kg (0,31 t/ha/an en 2000) à quelques tonnes (4,90 t/ha en 1995).

Dans les systèmes améliorés où sont appliquées des techniques culturales adaptées avec une meilleure couverture des sols, les pertes de terre annuelles diminuent d'environ 50 % par rapport aux sols nus. La protection permanente du sol a été reportée en effet par différents auteurs (Mazour, 1992 et 2004 ; Morsli, 1996 ; Blavet *et al*., 2004) : elle offre une protection, d'une part, par l'enracinement des végétaux qui renforce la stabilité et améliore l'infiltration du sol, et d'autre part, enrichit la surface du sol par la production de litière riche en matière organique.

Les stocks de C évalués sur les dix premiers cm du sol et calculés à partir des teneurs de C varient de 9 t/ha à 13 t/ha sur une durée de quinze années et en fonction des modes d'utilisation des sols. Dans le cas où le sol ne serait pas couvert, les sols perdent 13 % de leurs stocks initiaux (tab. 2). Dans le système traditionnel qui comporte la culture des céréales et des fourrages (blé tendre et blé dur, orge, vesce + avoine), en rotation avec une jachère de courte durée, les stocks présentent une légère diminution. Dans les systèmes intensifs, les résultats montrent un gain de l'ordre de 10 % par rapport aux stocks initiaux déterminés en 1991. Plus le système de culture est intensif, plus il est productif de biomasse et moins il perd d'eau, de matière organique et de terre riche en nutriments (Roose, 2004).

À l'échelle du versant, les taux de carbone varient de 0,13 % à 1,9 %. Ceci s'explique, d'une part, par les faibles ou l'absence quasi totale d'apports organiques qui peuvent restituer les pertes de C, et d'autre part, par le surpâturage des chaumes et le ramassage excessif des résidus des cultures pour répondre au besoin du cheptel. Les plus faibles valeurs se trouvent en général dans les terres de cultures les plus accessibles et les plus pâturées, mais parfois dépassent les 2 % dans des terres cultivées situées à l'aval du micro-bassin versant. Ceci signifie que les zones labourées et cultivées ne sont pas systématiquement pauvres en MO.

Tab. 2. Carbone érodé (POC) sous systèmes cultivés sur sol brun calcaire argileux dans les parcelles expérimentales en l'an 2000-2001 (Mazour 2004)

Utilisation des terres	Parcelle standard	Système traditionnel	Système intensif
Carbone du sol en place /10 cm (%)	0,80	0,90	1,03
Carbone des sédiments %	1,00	1,68	2,06
Indice de sélectivité CER)	1,33	1,86	2,00
POC erodé (kg ha^{-1} an^{-1})	20	27	33
Erosion (t ha^{-1} an^{-1})	1,84	1,6	1,6

D'autre part, l'exposition des versants semble constituer aussi un facteur important sur la variation des teneurs de carbone. Sur sols cultivés et les parcours, les

versants exposés au nord montrent une augmentation de l'ordre de 60 % de leur teneur en carbone (tab. 3) par rapport aux versants exposés au sud souvent dénudés, asséchés et fortement affectés par l'érosion superficielle.

Tab. 3. Variation des teneurs moyennes en carbone en fonction de l'exposition des versants

Formes d'occupation des sols	Exposition	Teneur en carbone (%)
Terres cultivées	Nord	2,1/0,5*
	Sud	0,9/0,6*
Terrain de parcours	Nord	2,8 /0,6*
	Sud	1,5 / 0,6*

* Écart type

Tab. 4. Stocks en carbone (t/ha) sur 0-10 cm en fonction des systèmes de gestion des sols à Sidi Ahmed Cherif

	Système cultivé (Ahmed Chérif A) Sols bruns calcaires			Système cultivé (Ahmed Chérif B) Sols bruns calcaires		
	Sol nu	B/J tradit.	Blé intensif	Sol nu	B/J tradit.	Blé intensif
1991	11,62	11,92	12,01	11,06	11,84	11,61
1992	11,48	13,84	12,19	11,54	13,02	13,36
1993	10,40	13,72	12,41	10,20	13,42	13,44
1994	10,11	11,87	12,42	10,44	12,27	12,78
1995	11,14	12,10	12,82	11,28	12,80	12,92
1996	11,12	12,68	13,14	10,52	12,88	13,16
1997	09,88	12,30	13,00	09,58	12,60	13,08
1998	10,32	12,14	12,11	10,04	12,66	13,01
1999	10,06	11,66	12,14	10,15	11,76	13,18
2000	10,80	12,82	13,08	09,56	12,78	13,48
2001	10,22	12,38	13,26	10,52	12,49	13,44
2002	09,78	11,25	12,50	10,50	12,50	13,20
2003	09,90	12,00	13,00	10,60	12,50	13,25
2004	09,80	11,90	12,90	10,10	12,80	13,20
2005	10,00	11,90	12,95	09,90	12,90	13,40
Moyenne	10,44	12,29	12,66	10,39	12,62	13,10

CONCLUSION

Les cultures céréalières pratiquées depuis longtemps dans les zones marneuses des montagnes dans le nord-ouest algérien ont conduit à une baisse importante

des stocks de carbone d'environ 14 % par rapport à leur stock initial et, donc, à une perte de fertilité due à une érosion en nappe sélective qui, même avec des taux modérés par rapport au seuil de tolérance (2t/ha/an), semble dangereuse par érosion sélective.

Les résultats montrent aussi qu'il est possible de protéger le sol contre la dégradation, ainsi que d'améliorer les taux de carbone (augmentation de 12 %) en intensifiant les systèmes de culture avec un apport d'engrais, de compost, des semences sélectionnées, des rotations avec des légumineuses, des plantations d'arbres et des cultures intercalaires. Ces systèmes permettent une meilleure couverture des sols, qui perdront donc moins d'eau, de matière organique et de terre riche en nutriments. En parallèle, le changement des techniques culturales telles que les labours en sens perpendiculaire à la pente ou un billonnage s'accompagne d'une diminution de l'érosion et du ruissellement et d'une augmentation des teneurs de carbone.

Enfin, seule une gestion appropriée des sols permettra de réduire le ruissellement qui vient des versants, de compenser les pertes de fertilité et d'enrichir le sol par des méthodes simples, telles que la mise en défens, des techniques culturales adaptées et des cultures assurant une couverture même pâturée. Ces modes de cultures avec couverture permanente génèrent à la fois une restauration et une amélioration de la fertilité des sols, grâce à l'amélioration des caractéristiques physicochimiques et biologiques et l'amélioration de la productivité des cultures, principal moteur de la participation paysanne.

Références bibliographiques

BLAVET D., DE NONI G., ROOSE E., MAILLO I., LAURENT J.-Y., ASSELINE J., 2004. Effet des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 15 : 111-120.

CHENU C., BALABANE M., 2001 .Une approche des matières organiques par leurs fonctions. *Perspectives Agricoles,* 272 : 42-45.

MAZOUR M., 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser, Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion,* 12 : 303-313.

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 Algérie*. Thèse de doctorat d'État en foresterie, 184 pp.

MORSLI B. 1996. *Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne. Cas des Monts de Beni Chougrane-Mascara*. Thèse de Magistère en Sciences agronomiques, 166 pp.

ROOSE E., DE NONI G. 2004. La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES), une stratégie nouvelle pour faire face à un double défi du XXIe siècle : la pression démographique et l'environnement rural. *Bulletin Réseau Érosion* 23 : 10-24.

RAINFALL, LIVESTOCK AND SOIL MANAGEMENT PRACTICES: FACTORS AFFECTING NUTRIENT CYCLING IN THE WEST AFRICAN SEMI-ARID TROPICS (WASAT)

F. IKPE*, J.M. POWELL, P. HIERNAUX***, S. FERNANDEZ-RIVERA**** et S. TARAWALI****

International Livestock Research Institute (ILRI) / ICRISAT Sahelian Centre, Sadore, B.P. 12404, Niamey, Niger; fikpe@yahoo.com
** Department of Crop / Soil Science, Rivers State University of Science and Technology, P.M.B. 5080, Port Harcourt, Nigeria*
*** USDA-ARS Dairy Forage Research Center, 1925 Linden Drive West, Madison, WI 53706-1108,*
**** University of Hohenheim, Hohenheim, Germany*
***** International Livestock Research Institute (ILRI), Addis Ababa, Ethiopia*

Résumé

Les systèmes mixtes de production des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest sont basés sur le recyclage des éléments nutritifs à support organique en vue du maintien de la productivité des sols. Le passage de la biomasse végétale à travers l'appareil digestif des ruminants joue un rôle primordial dans les cycles d'éléments nutritifs dans cette région. La décomposition de matière organique a été plus rapide et plus importante dans les tiges du mil que dans le fumier. Les modes de minéralisation de l'azote et du phosphore dans les tiges du mil et le fumier sont très différents. Compte tenu de la complémentarité entre l'élevage et l'agriculture dans le Sahel, les activités de recherche ne devraient pas seulement viser à accroître la production des cultures au niveau de l'exploitation, mais également à accroître la quantité et la qualité du fourrage disponible.

Mots clés : Niger, pluie, élevage, cycle des nutriments, décomposition, fertilité des sols.

INTRODUCTION

West Africa covers an area of about 7.3 million km^2, divided into four principal agroecological zones: arid, semi-arid, subhumid and humid (ILCA 1987; Jahnke 1982) on the basis of plant growth days (PGD) and amount and distribution of rainfall. The highland based on altitude and its effects on temperature during the growing period are not significantly represented in West Africa. The major characteristics of the arid, semi-and, subhumid and humid zones of West Africa are summarized in table 1.

Tab. 1. Characteristics of agro-ecological zones of West Africa

Zone	Plant growing days per annum (PGD)	Annual rainfall (mm)[1]	Area (% of total)[1]	Total human population 1990 (%)	Distribution of population		Cattle numbers (10^6) 2000
					Cattle (%)	Sheep and goats (%)	
Arid	< 90	0-500	54	25.8	25.8	42.3	9.9
Semi-arid	91-180	500-1,000	20	38.2	38.2	29.0	14.7
Sub-humid	181-270	1,000-1,500	16	28.3	28.3	18.2	10.9
Humid	> 270	>1,500	10	7.7	7.7	10.5	3.0
Total	-	-	100	100	100	100	38.4[4]

Source: Fernandez-Rivera *et al.* 2004.

West Africa's human population was recently estimated at 263 millions people, with 51% depending on agriculture and 39% living in urban centres (Thornton *et al*. 2002; FAO 2003). With a growth rate of about 3% per annum, it is projected that by 2020 human population in West Africa will reach about 370 millions, of which 42% will live in rural areas and 35% will be engaged in agriculture (FAO, 2003). Agriculture is the basis of the economies of all West African countries and contributes about 35% of their gross domestic product (GDP). Poverty is widespread, and it is common for more than 80% of the inhabitants in the poorer countries in the region to live on less than US$1/day (World Bank, 2001).

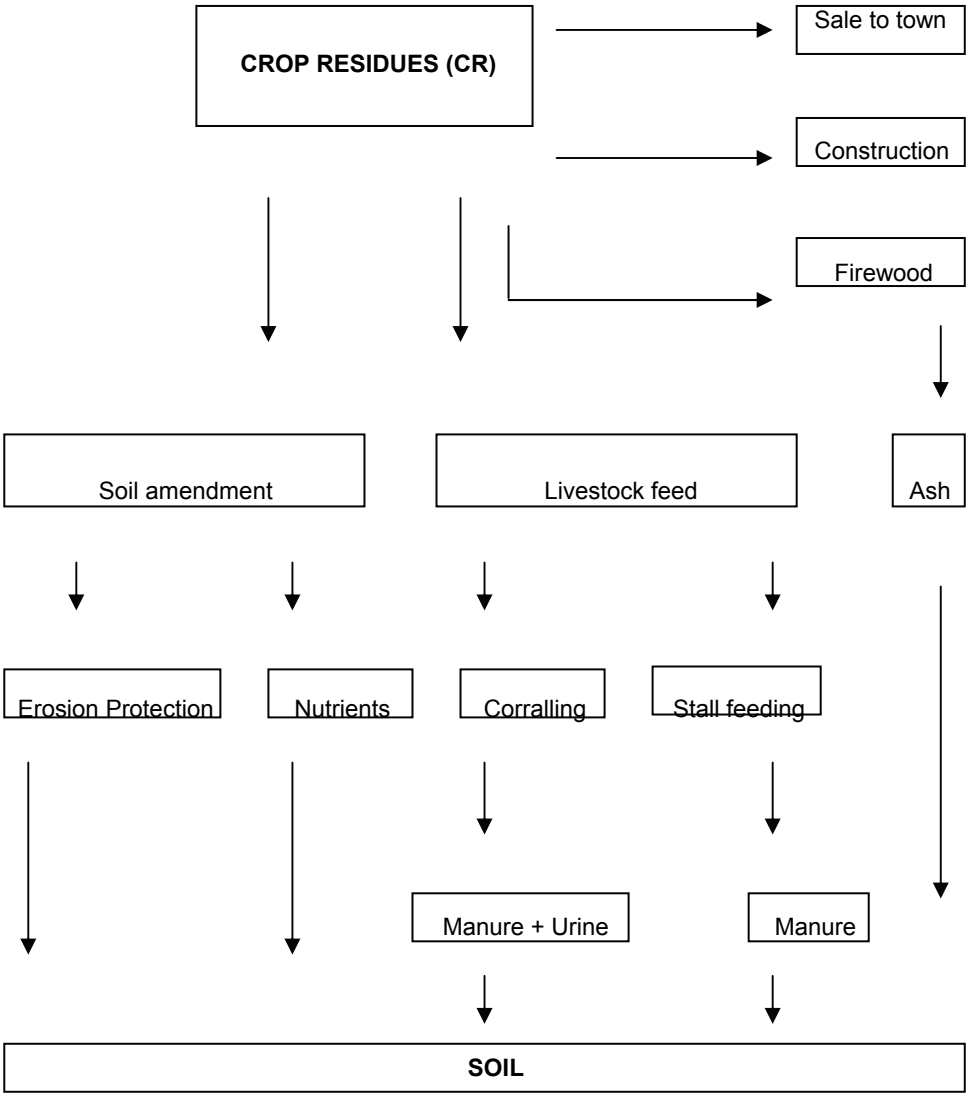
Population growth, urbanization trends and rising incomes are leading to a rapidly growing demand for food, in particular that of animal origin. Although West Africa has one of the world's highest population growth rates, the countries in the region are also among those in the world with the lowest increase in agricultural productivity. The modest increase in agricultural output that arise from farmer generated technical change are not capable of sustaining high rates of population increases (Pingali & Binswanger, 1988).

With an average cultivated area of 25.2%, a high livestock density of 19.4 TLU/km²(13.5 cattle/km^2) and a human population density of 61.3 persons/km² putting pressure on its predominantly sandy soils, crop-livestock integration is evolving in the zone as a strategy to maintain soil fertility and a more efficient nutrient cycling (Fernandez-Rivera, 2004).

In Western Niger, soils are sandy and low in soil nutrients. Plant growth is limited not only by water availability but also by soil fertility. Farmers depend on animal manure and crop residues as important sources of nutrients for crop production and the recycling of nutrients (fig. 1). The reliance on animal manure seems favoured by the large livestock population in the zone which in 1994, included valued 21 million cattle, 27 million sheep and 30 million goats (FAO, 1996). Farmers manure 20-50% of their cropland each year as determined not only by

some socio-economic factors but also rainfall which can be unreliable, unpredictable and uncertain. In higher rainfall areas, cultivated plots are smaller and cattle are more important than in the lower rainfall areas, where more sheep and goats are kept (Powell & Williams, 1993). This scenario has a close relationship with the availability of animal manure for nutrient cycling (tab. 2). The main objective of this paper was to examine the decomposition and nutrient release patters of pearl millet residue (stover) and sheep faeces when applied to soil under contrasting environmental conditions.

Fig. 1. The competing uses of crop residues in the WASAT (Bationo *et al.* 1995)



Tab. 2. Cultivated and manured areas, manure dry matter (DM), nitrogen (N) and phosphorus (P) on farmers' fields in Niger, 1990

	Zones		
	West	Moderately wet	Dry
Rainfall (mm/year)	600	425	350
No. of households	15	10	15
Cultivate area (ha/household)	3.2	6.3	9.2
% manure/year	29	52	30
Manure DM (kg/ha)	3800	1700	1300
% cattle	52	55	19
% small ruminant	48	45	81
Manure N (kg/ha)	45	23	22
Manure P (kg/ha)	5.7	3.0	2.7

Source: Powell & Williams 1992.

1. MATERIALS AND METHODS

1.1. Village Locations

All the study villages are located in Western Niger. At Sadore (13° N 2° E), approximately 45 km southwest of Niamey, the trial was established in an experimental plot at the ICRISAT (International Crops Research Institute of the Semi-Arid Tropics) Sahelian Centre (ISC) and in farmers' fields in the villages of Sadeize Koara (2° 15' E 52' N) situated in the dry zone 80 km north of Niamey; Gueladio (2° 02' E 13° 05 N) in the wet zone 70 km of Niamey; and Sambera (3° 27' E 11° 53' N) in a relatively wetter zone southeast of Niamey (tab. 3).

1.2. Experimental treatments

Retrieval dates of litterbags after placement (a) (0,30, 60, 85, and 115 days); (b) location: (i) Sadore, (ii) Gueladio, (iii) Sadeize Koara, and (iv) Sambera; and (c) Organic Amendments: (i) Sheep Faeces and (ii) Millet Stover. Treatments were assigned in a split-split plot arrangement and litterbags were buried in plots in a completely randomized design. Litterbags of 100 micron mesh-size measuring 20 x 20 cm were filled with 25 g of either intact SF or MS (stalks) that were chopped to about 3 cm and buried in soil 10 cm deep. Quadruplicate samples were retrieved 30, 60 85, and 115 days after placement for dry matter DM (ash – free basis), TNC, H, Ce, L, N, P, and K contents determination (tab. 4).

Tab. 3. Rainfall and surface soil characteristics of village sites in Western Niger

Characteristics		Sadeize Koara	Sadore	Gueladio	Sambera
Annual Rainfall mm*		350-400	560-600	650-700	700-750
Rainfall (1992) mm		569	586	600	760
Particles Sizes %:	Sand	93.8	94.3	89.4	86.3
	Clay	3.5	4.2	5.6	5.9
	Silt	2.6	1.4	5.0	7.8
Soil Texture		Sandy	Sandy	Sandy	Sandy
Soil pH:	(H_2O)	6.3	5.6	5.3	5.9
	(KCl)	5.3	4.6	4.2	4.9
Total N ppm		107.0	263.5	252.3	386.37
NO_3-N ppm		1.6	4.0	2.6	3.0
NO_4-N ppm		5.1	2.8	5.2	4.6
Organic C%		0.10	0.28	0.21	0.47
C:N Ratio		9.5	10.7	8.4	12.1
Available P ppm		2.2	5.9	2.1	3.6
Exchangeable K Cmol Kg^{-1}		42.0	210.4	46.3	87.1

* Source: Direction de la météorologie nationale, ministère du Commerce, de l'Industrie et des Transports, République du Niger.

Tab. 4. Organic Matter (OM), Total Non Structural Carbohydrates (TNC), Cellulose (Ce), Hemicelulose (H), Lignin (L), and N, P and K concentrations of in Sheep Faeces and Millet Stover

Soil amendment	OM	TNC	Ce	H	g kg^{-1}	N	P	K
					L			
Sheep faeces	867.8	69.0	241.7	112.2	109.1	13.8	2.6	8.2
Millet stover	955.6	99.4	501.3	213.8	132.6	7.2	1.3	15.0

1.3. Chemical Analysis of SF and MS

Chemical analyses were performed on SF and MS before the beginning of the experiment (tab. 4) and thereafter for each subsequent recovery from the field plot and farmers' field. Samples of SF and MS were ground to pass 1 mm screen prior to DM (oven-drying at 105° C for 24 hours) and organic matter OM (ashing in a muffle furnace overnight at 400° C) determinations. Hemicellulose, Ce, and L contents in SF and MS were determined by the method of Goering and van Soest (1970), while TNC was analyzed using the phenol-sulphuric acid method of Guiragossian *et al.* (1977). For N, P, and K analysis, ground SF and MS samples were digested in suphuric acid using aluminium block digester (Bremner & Mulvaney 1982). The N and P contents of digests were determined using an autoanalyzer while the K content was by the flame emission spectrophotometry.

1.4. Statistical analysis

The single exponential function ($Yt = P\ e^{*1t}$), where Yt = fraction of the original material/nutrient remaining after time t, P = relative pool size, k = daily decay/release constant and t = time in days, was used to determine the decay/release rate constants in the non-linear (NLIN) model of the Statistics Analytical System (SAS) (1985).

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. Decomposition

The decomposition of SF and MS at all the locations varied significantly. Millet stover decomposed faster than SF (tab. 5). This observation was consistent with results obtained from a two year field incubation studies at Sadore (Ikpe *et al.* 1995). The fastest decomposition rate for MS was at Gueladio followed by Sadeize Koara, Sambera and Sadore. The decay rate constants (k) for SF were not significantly different at Sadore, Gueladio and Sambera. The greatest k for SF was observed at Sadeize Koara.

Tab. 5. Decay rate constants k (g day^{-1}) of sheep faeces and millet stover village locations in West Niger, wet season

Location	Soil amendment	K	R^2
Sadore	Sheep Faeces	0.0046	0.76
	Millet Stover	0.0067	0.77
Gueladio	Sheep Stover	0.0046	0.90
	Millet Stover	0.0101	0.92
Sadeize Koara	Sheep Faeces	0.0052	0.89
	Millet Stover	0.0086	0.95
Sambera	Sheep Faeces	0.0049	0.91
	Millet Stover	0.0078	0.91
S.E. ±		0.00052	

All models are significant at $p < 0.01$ probability level.

Annual rainfall had a key influence on decomposition and nutrient release patterns at the village locations. The availability of moisture enhances microbial activity which precedes the mineralization of organic compounds to inorganic (available) forms (Parr & Papendick, 1978). Although the initial N content was twice as high in SF than in MS (tab. 4), MS decomposed faster (tab. 5) and released N faster than

from SF in most of the locations. This was attributed to the better leaching properties of MS than SF and the higher OM content of MS than that of SF (tab. 4). Furthermore, majority of the N in ruminant manure is in the form of undigested dietary N, which is concentrated in feed cell wall components, and non-dietary fractions. The N in the cell wall components, particularly as ligno-proteins, are difficult to catabolise both by rumen and soil micro-organisms (Mason 1969).

2.2. Nutrient release patterns

Except at Sadeize Koara, N release was faster from MS than from SF. The release on N from MS was significantly faster at Sambera than at Sadore Gueladio and Sadeize Koara where it remained the same. The release constants (k) for SF at Sadeize Koara, Sambera and Sadore were not significantly different but were greater than the release constants at Gueladio (tab. 6).

Generally, the release of P was faster from MS than from SF. The release of P from MR at Sambera and Sadore were the same but greater than that observed at Gueladio. The slowest release of P from MS was at Sadeize Koara. The fastest P release rate from SF was also observed at Sambera. However, P release rate from SF did not differ at Sadore and Gueladio but was greater than at Sadeize Koara.

At all the locations, K release was fastest from MR than from SF. This was attributed to the better leaching properties of MS than SF and the higher initial content of K in MS than in SF (tab. 4). The release of K from MS was faster at Gueladio than at Sadore. Potassium release rate from MS at Sadore and Sambera were similar but lowest at Sadeize Koara, while K release constants from SF was greatest at Sambera and followed by Gueladio. The release rate of K from SF were similar at Sadore and Sadeize Koara.

The release of N from SF and MR was the slowest across the village location when compare with those of P and K (tab. 6), suggesting that micro-organisms had more difficulty mineralizing N than P. The initial N content of SF was twice greater than in MR (tab. 4). It was thus expected than N would mineralize faster (Muller *et al*. 1988) from SF than from MR.

Regarding the release of P, 40%-60% of P in some grasses and legumes was found to be inorganic forms (Jones & Bromfield, 1969). This predominantly labile fraction could rapidly be lost through leaching. We presumed that similar or possibly greater proportions of inorganic P to total P may have been present in MS, a grass. However, the passage of plant material though animal digestive tract as feed, the higher solubility of inorganic P than total P and P demand for animal physiological requirements may have led to higher concentration or organic P in SF than from MR, and thus the slower release of P from SF although initial P content of SF was twice that of MR (tab. 4). Unlike N and P, potassium is not bound to cell wall components of organic materials hence easily released.

Tab. 6. Nutrient release constants (k) of sheep faeces and millet stover at village location in Western Niger

	Location	Soil amendment	k	R^2
Nitrogen	Sadore	Sheep Faeces	0.0037	0.57***
		Millet Stover	0.0042	0.45***
	Gueladio	Sheep Faeces	0.0020	0.90***
		Millet Stover	0.0041	0.30*
	Sadeize Koara	Sheep Faeces	0.0048	0.36*
		Millet Stover	0.0032	Ns
	Sambera	Sheep Faeces	0.0042	0.40**
		Millet Stover	0.0051	0.33*
	S.E. ±		0.00130	
Phosphorus	Sadore	Sheep Faeces	0.0073	0.68***
		Millet Stover	0.0124	0.72***
	Gueladio	Sheep Faeces	0.0079	0.75***
		Millet Stover	0.0114	0.60***
	Sadeize Koara	Sheep Faeces	0.0043	0.23*
		Millet Stover	0.0083	0.43**
	Sambera	Sheep Faeces	0.0131	0.76***
		Millet Stover	0.0120	0.50***
	S.E. ±		0.00212	
Potassium	Sadore	Sheep Faeces	0.0090	0.89***
		Millet Stover	0.0211	0.97***
	Gueladio	Sheep Faeces	0.0104	0.89***
		Millet Stover	0.0230	0.91***
	Sadeize Koara	Sheep Faeces	0.0096	0.50***
		Millet Stover	0.0177	0.91***
	Sambera	Sheep Faeces	0.0120	0.91***
		Millet Stover	0.0198	0.96***
	S.E. ±		0.00144	

ns *,**,*** denote models were significant at < 0.10, and < 0.01 probability levels, respectively. S.E. of means are for all possible comparisons.

CONCLUSION

The mineralization of nutrients from sheep faeces and millet stover and the recycling of nutrients were well related to their biochemical composition and physical endowments. Decomposition and nutrient release from amendments is a process that is principally rainfall-driven. However, other factors such as soil C:N ratio, texture, pH, fertility status and soil management practices (tilled or no-till) may invariably contribute to the decomposition and nutrient release patterns of organic amendments applied to soil in WASAT.

References

FAO, 1996. *Fertilité des terres des Savanes*, Paris, ministère de la Coop./CIRAD-IRAT.

FAO, 2003. Statistical databases. FAO, Rome. http://apps.fao.org (accessed February 2003).

FERNANDEZ-RIVERA S., MANYONG V., WILLIAMS T. O., KRUSKA R.L. & TARAWALI S. A., 2004. Classification and description of the major farming systems incorporating ruminant livestock in West Africa. In: Williams T. O., Tarawali S.A., Hiernaux P. & Fernandez-Rivera S. (eds.), *Sustainable crop-livestokc production for improved livelihoods and natural resource management in west Africa. Proceedings of an international conference*. 516 pp.

IKPE F., POWELL M. & ISIRIMAH N. 1995. Decomposition of sheep faces and millet residues: the behaviour of organic carbon fractions and nutrient release. *Delta Agriculturist,* 2: 109-131.

INTERNATIONAL LIVESTOCK CENTRE FOR AFRICA (ILCA), 1987. *ILCA's Strategy and long-term plan. ILCA*, Addis Ababa, Ethiopia. 129 pp.

JAHNKE HANS E., 1982. *Livestock production systems and livestock development in tropical Africa*. Kieler Wissenchaftsverlag vauk, Kid, Germany. 273 pp.

JONES O.L. & BLOMFIELD S.M., 1969. Phosphorus changes during the leaching and decomposition of hayed-off pasture plants. *Aust. J. Agric. Res*. 20: 653-663.

MASON V.C., 1969. Some observations on the distribution and origin of nitrogen on sheep faeces. *J. Agric Sci.*, Cambridge, 73:99-111.

MULLER M. M. SUNDMAN V., SOININVAARA O. & MERILAINEN A., 1988. Effect of nitrogen from agricultural plant materials decomposing in soil under field conditions. *Biol. Fertil. Soils* 6:78 -83.

PARR J. F. & PAPENDICK R. I., 1978. Factors affecting the decomposition of crop residues by micro-organisms. In: Crop Residue Management Systems (Ed.). W, R, Oschwald. *ASA Special Publication* 31:101-129.

PINGALI P & BINSWANGER H. P., 1988. Population density and farming systems: the changing locus of innovations and technical change. In: *Population, food and rural development*. Oxford University Press, Oxford, UK.

POWELL J. M. & WILLIAMS T. O., 1993. Livestock, nutrient cycling, and sustainable Agriculture in the West African Sahel. *Gatekeeper Series SA* 37. IIED (International Institute for Environment and Development), London UK 15 pp.

THORNTON P. R., KRUSKA R. L., HENNINGER N. KRISTJANSON P. M., REID R. S., ATIENO F., ODERO A. N. & NDEGWA T., 2002. *Mapping poverty and livestock in the developing world*. (International Livestock Research Institute (ILRI), Nairobi, Kenya. 124 pp.

WORLD BANK, 2001. *World development report*. Oxford, 335 pp.

Gestion eau + sol : techniques culturales et structures LAE

ANALYSE DE QUELQUES TECHNIQUES TRADITIONNELLES DE CONSERVATION DE L'EAU ET DU SOL DANS LE NORD-OUEST ALGÉRIEN

Mohamed MAZOUR*, Boutkhil MORSLI et Eric ROOSE*****

** Université de Tlemcen, B.P. 119 Tlemcen, Algérie,*
tél. 213 43 21 36 80 / fax: 213 43 27 54 27 ; mohamed_mazour@yahoo.fr
*** INRF, Tlemcen, B.P. 88 Tlemcen, Algérie,*
tél. 213 43 20 17 92 / fax 213 43 27 54 27 ; morbinrf@yahoo.fr
**** ird, ur seqbio, B.P. 64501, F 34394 Montpellier CEDEX 5,*
tél: 33 0 467 41 62 65 / fax: 33 0 46759 83 42 ; Eric.Roose@ird.fr

Abstract

This survey consists in analysing traditional management practices of soil and water conservation in North West Algerian mountains which have got a bad reputation concerning erosion risks. Analysis of field observations showed that the management practices used now with more successfull and efficiency are particularly terraces with wall and stone bunds, constructed to insure the progressive accumulation of sediments and for the protection of irrigation amenities. The farmers have developed numerous techniques to manage water, soil and biomass taking care of the diversity of ecological situations. This is the first analysis of the diversity of traditional SWC systems in the NW Algerian mountains.

Keywords : *NW Algeria* ; *GCES* ; *Mountains*.

INTRODUCTION

Les conditions naturelles de l'Algérie (climat, relief, sol et couverture végétale), associées à une société rurale bien particulière qui a toujours su mettre en œuvre des formes de gestion communautaires, ont contribué au développement et au perfectionnement de techniques de gestion et de conservation de l'eau et 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 évènements 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 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 un phénomène largement répandu dans les montagnes telliennes et même 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. L'objectif de cet article est donc de présenter les techniques traditionnelles les plus intéressantes de la région montagneuse du Nord-Ouest algérien et de préciser leurs liens avec les conditions agroécologiques de la zone.

Après avoir observé, examiné et suivi un échantillon d'une centaine d'aménagements représentatifs des montagnes telliennes de la région de Tlemcen et des monts des Beni Chougrane à Mascara, il est apparu tout d'abord que beaucoup de ces techniques restent localisées dans des sites bien déterminés (Béni Snous, Zoualef, Honaine dans la région de Tlemcen et Beni Chougrane dans la région de Mascara), et là, il faut souligner l'implication de la femme rurale dans l'entretien et la gestion des différentes techniques. Nous avons ensuite mesuré l'intérêt de l'amélioration de ces techniques par des technologies modernes pour les rendre plus attractives économiquement (choix des cultures, fertilisation raisonnée, système d'irrigation performant et adapté, etc.).

Un certain nombre de facteurs sont appréciés directement puis évalués et analysés à la lumière de plus de quinze années d'observation, 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.

1. OUVRAGES ET STRUCTURES TRADITIONNELS DE CONSERVATION DE L'EAU ET DU SOL (TLEMCEN ET MASCARA)

Dans les monts de Tlemcen, à plus de 1 000 m d'altitude, le village de Béni Snous, accroché aux flancs de montagne, est connu par ses olivettes, ses vergers célèbres et ses terrasses cultivées. Les pentes fortes dépassant 30 %, 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 méthodes et des techniques parfois 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 *mulching* en paille mais parfois aussi en pierres. Nous avons analysé 35 aménagements dans cette zone par rapport à six facteurs (v. tableau 1) : 3 terrassettes, 2 cordons en arbustes et fourragers 4 *séguia*, 1 *sed*, 2 *madjen*, 3 *jboub*. 2 *dayat*[1], 2 cultures en billon, 4 travaux

[1] *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 m3, il est généralement réparé ou entièrement refait après chaque crue importante par la Touiza (chantier de volontaires).

à l'araire, 1 *mulching* en pierre, 4 *mulching* en paille, 3 utilisations de fumier, 3 cuvettes d'infiltration circulaires et 2 en demi-lune.

Il en ressort tout d'abord le bon rapport coût/efficacité pour toutes structures sauf les ouvrages de stockages d'eau *madjen* et *jboub*. Mais ce sont les terrasses qui caractérisent la région de Béni Snous depuis très longtemps, comme en témoignent l'indice de reproductibilité et aussi l'indice de productivité des terres aménagées. Ces structures à l'amont des murets ou talus sculptent admirablement ce paysage montagnard et, du fait de leur densité élevée et leur bonne répartition spatiale, ils permettent une excellente conservation des eaux. Fonctionnant en association avec les *séguia*, *seds, 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 sont diminuées en conséquence sur tous les versants aménagés. 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 Zoualef 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 parait 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 et du ruissellement. Ceci peut s'expliquer en partie par le 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 importante et un système agricole contraignant.

Dans les monts de Beni Chougrane à Tliouanet, bordj, de nombreuses techniques traditionnelles ont été pratiquées. Cette zone, caractérisée par de fortes pentes sur des terrains calcaires et marneux, est très affectée par l'érosion. Certains aménagements sont très localisés, d'autres très éparpillés dans l'espace (terrasse, terrassettes, murette, talus, cordons pierreux, haies vives, cuvettes, madjens…). Ces aménagements sont élaborés souvent sur les bas de versant et sur les lits des oueds. L'appréciation et l'évaluation de l'état actuel de ces aménagements (v. tab.) montre que certains sont en voie de disparition, et ceci n'est pas dû à leur faible efficacité mais aux changements dans les rapports socio-économiques. Par contre, d'autres sont encore largement utilisés (cordons, cuvettes d'irrigation, *madjen*, haies vives…).

L'efficacité des techniques culturales est strictement liée aux conditions économiques des sociétés (Roose, 2004). Certaines techniques, bien qu'elles soient destinées à l'origine à délimiter ou à protéger les parcelles (talus, clôtures en haies vives ou en pierres suivant les courbes de niveau), ont aussi un rôle très positif dans la conservation de l'eau et du sol. Ces structures permettent de piéger des quantités importantes d'eau et de sédiments.

Il semble que certains exploitants s'intéressent à certains aménagements plus en tant que pratique d'amélioration de production, de protection contre les animaux sauvages et de diminution des travaux pénibles qu'en tant que pratique de conservation du sol.

Tableau 1. Comportement de quelques aménagements de conservation de l'eau et du sol en fonction de certains facteurs dans le Nord-Ouest algérien

Facteurs analysés / Aménagements antiérosifs traditionnels**	Nombre bs z h bc *	Efficacité pour la conservation de l'eau	Efficacité pour la conservation du sol	Durabilité	Reproductibilité	Productivité des terres aménagées	Coût	Rapport Coût / efficacité
Ouvrages et structures								
Murets avec terrassettes	3 2 2 2	++	++	++	+++	+++	+	++
Cordons :								
en pierres	0 2 3 5	+	+	+	++	+	+++	++
végétal	2 0 2 2	+	++	++	+++	++	+++	++
mixte	0 0 2 1	+	++	++	++	++	+++	++
Dérivation des eaux :								
Séguia	4 0 0 0	+++	++	++	+	+++	+	++
Sed	1 0 2 1	+++	++	+	+	+++	+	++
Stockage des eaux :								
Madjen	2 0 1 2	+++	+	+	++	+	++	+
Jboub	3 0 0 0	+++	+	+	+	+	++	+
Dayat	2 0 0 1	+++	++	++	+	++	+++	++
Techniques culturales								
Cultures en billons	2 2 2 4	++	++	+	+++	+++	+++	+++
Travail à l'araire	4 2 2 2	++	++	+	++	++	++	++
Mulching :								
en pierres	1 1 3 3	++	++	+++	++	++	++	++
en paille	4 1 1 2	++	++	+	+++	++	++	++
Utilisation du fumier	3 1 1 2	++	++	++	+++	+++	++	++
Cuvettes d'infiltration et de ruissellement :								
circulaire	3 0 0 2	++	++	++	++	++	++	++
en demi-lune	1 2 1 1	++	++	++	++	++	++	++

* bs = Beni Snous : 35 aménagements ; z = Zoualef : 13 ; h = Honaine : 22 ; bc = Beni Chougrane : 30

***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 m3, 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 pierre agencées

***Madjen :** ouvrages de stockage d'eau utilisant des dépressions naturelles ou creusées. L'eau sert à certaines activités domestiques tels que le lavage, l'arrosage des jardins et potagers et l'abreuvage des animaux d'élevage.

Jboub : ouvrages de stockage d'eau de petite capacité réalisés au niveau de certaines ravines. Ils servent surtout à l'abreuvage du cheptel.

Daya : dépression naturelle assez importante où s'accumulent les eaux de ruissellement couvrant parfois de vastes étendues de plusieurs hectares.

L'utilisation des *dayas* (tirer le plus de profit du piégeage des eaux de ruissellement et des terres érodées très riches en matières organiques) en zone semi-aride steppique est ingénieuse du fait qu'elle permet de pratiquer une agriculture pluviale (céréaliculture et arboriculture) et durable dans un écosystème très sensible.

2. TECHNIQUES CULTURALES DE GCES

Le système de culture, qui peut être défini comme un ensemble constitué par la succession des cultures sur une parcelle et les techniques culturales qui leur sont appliquées, est le facteur important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité des ressources.
Si nous analysons la répartition spatiale et temporelle des terres cultivées en zone montagneuse, nous observons souvent 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 une matérialisation biologique des exploitations (haies vives).

L'analyse des pratiques culturales dans les différentes zones étudiées a montré généralement un impact positif sur la conservation de l'eau et du sol et sur l'amélioration de la productivité des terres aménagées (v. tableau). Ce sont des techniques simples, peu coûteuses à la portée des exploitants agricoles. Ceci est confirmé par les résultats d'analyse (rapport coût/efficacité et indice de productivité agricole intéressant et bonne reproductibilité). Certaines pratiques culturales largement répandues en Afrique du Nord sont de nature à minimiser le ruissellement et favoriser l'infiltration.

Le travail du sol à l'araire sur les terres en pente présente moins de risques que le travail mécanisé ou que celui des sols laissés en jachère pâturée. La jachère, technique très traditionnelle, si elle est bien gérée, a une influence très marquée sur la production et la réduction de l'érosion (Roose *et al.*, 1996).

La pratique des cultures en billons, très utilisée dans la zone, permet une bonne gestion des eaux de ruissellement et une réduction de l'érosion. Par exemple, dans les monts de Beni Chougrane, sur un système traditionnel de culture en billons, l'érosion et le ruissellement ont été réduits respectivement de 10 et 5 fois par rapport au sol non billonné.

L'utilisation du fumier, même si le coût est relativement élevé, améliore significativement la CES et la productivité. Il faut noter que l'utilisation des

techniques citées ci-dessus n'a l'impact positif observé que parce qu'elles fonctionnent ensemble et d'une manière combinée.

CONCLUSION

La région du Nord-Ouest algérien et, particulièrement, les zones montagneuses sont parsemées d'une multitude d'aménagements traditionnels de CES. Ils n'ont encore été ni inventoriés ni évalués. Ce travail nécessiterait des moyens importants pour faire ressortir ce patrimoine de l'oubli, l'améliorer et l'utiliser dans le cadre de la recherche de meilleures stratégies pour la CES.

Notre travail, à travers l'analyse d'une centaine de ces aménagements, a tout d'abord et dans un premier temps abordé l'analyse d'un échantillon qui n'est pas très exhaustif mais assez intéressant. Il nous a permis d'aborder les aménagements traditionnels les plus utilisés, de faire leur inventaire, leur diagnostic et leur analyse du point de vue de l'efficacité, de la productivité, de la productibilité et du coût.

L'analyse de ces aménagements traditionnels dans les différentes zones étudiées a montré généralement un impact positif sur la CES et sur l'amélioration de la productivité des terres aménagées. Généralement, ce sont des techniques simples, peu coûteuses, à la portée de l'exploitant agricole. Néanmoins ces aménagements restent très éparpillés et quelquefois localisés. Certains sont abandonnés, d'autres, au contraire, par le profit qu'elles procurent, sont largement utilisés et reproduits, comme il s'est avéré que l'association des techniques de CES traditionnelles (mécanique, biologique, techniques culturales) combinée avec des compléments de fertilisation a un impact très positif sur la production et la réduction du risque de dégradation.

Il apparaît clairement qu'il est aujourd'hui nécessaire 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, mais surtout celles que les agriculteurs, en montagne comme en plaine, ont adoptées, adaptées et maîtrisées.

Il y a lieu, enfin, de signaler ici le rôle important de la femme rurale au niveau de ces montagnes, à qui revient le plus souvent l'entretien et la pérennisation de la plupart des aménagements traditionnels.

Références bibliographiques

ROOSE E., 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, IRD Montpellier,* 21 : 33-44.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R, MAZOUR M., MORSLI B, 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie. *Cah. ORSTOM Pédologie.* 28, 2 : 289- 308.

ROOSE E. 2005. Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive- Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Sécheresse*, 15, 1 : 9-18.

ÉROSION ET EFFET DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LES VERSANTS SEMI-ARIDES DE L'ALGÉRIE CAS DES MONTS DE BENI CHOUGRANE

B. MORSLI*, A. HALITIM, M. MAZOUR*****

** INRF, B.P. 88 Mansourah Tlemcen, Algérie, morbinrf@yahoo.fr*
*** Université de Batna, Algérie*
**** Université de Tlemcen, Algérie*

Abstract

This contribution shows that human activities appear as the most significant parameter to reduce soil degradation and to start an increase in the productivity. Traditional cultural practices tested show that the continuous exploitation of the soils with appropriate cultural practices do not present a great erosive risk. Cropping on ridges and protecting fallows may reduce sufficiently erosion risks. Nevertheless, bare soils and overgrazed fallows developed a great risk of erosion and topsoil carbon stock decrease.

Keywords : *Algeria* ; *Beni Chougran* ; *Cultural Practices* ; *Erosion*.

INTRODUCTION

Les zones situées au Nord de l'Algérie, les plus productives, sont soumises à une dégradation sévère des ressources naturelles. Celles des zones de montagne en particulier restent les plus exposées aux diverses formes d'érosion. Ceci est dû non seulement à l'aridité de la région, mais aussi et d'une manière de plus en plus importante, aux facteurs liés à l'activité humaine.

Les monts de Beni Chougrane, très affectés par l'érosion, sont l'un des meilleurs exemples du Tell occidental, tant pour l'analyse des problèmes de l'érosion du sol que pour la préservation et la valorisation des terres de montagnes, au vu de la diversité de leurs caractéristiques et les différentes réalisations dont ils ont fait l'objet. La diversité des processus et l'évolution des formes d'érosion, qui prennent des dimensions de plus en plus alarmantes, reflètent bien une dégradation accélérée (Benchetrit, 1972). On assiste, par conséquent, à l'abandon des zones dans lesquelles les espaces cultivés disparaissent pour laisser place au pâturage extensif et, parfois, aux *badlands*. Les conséquences peuvent aller jusqu'au décès de personnes emportées par les crues et les coulées boueuses. Si l'aridité et les facteurs naturels jouent un rôle important dans les processus érosifs et leurs conséquences sur la fertilité des sols, il n'en demeure pas moins que l'accélération de ces phénomènes dépend largement des modes de gestion et de l'utilisation de l'espace. En effet, la croissance importante de la population et les modes de gestion souvent inadaptés accentuent la dégradation du couvert végétal et du sol.

De ce fait, les problèmes de ruissellement et d'érosion se sont aggravés et étendus à des zones jusqu'ici épargnées. Ainsi les équilibres entre la végétation, le sol et l'eau se trouvent perturbés. Le défrichement, le surpâturage, la mise en culture des terres en forte pente et les séquelles de la colonisation sont autant de facteurs liés à l'homme qui ont accentué la dégradation.

De grands moyens ont été déployés. Mais ces efforts en matière d'aménagement et de protection n'ont pas toujours atteint leurs objectifs. Ainsi, les échecs obtenus au niveau de nombreux aménagements entrepris sont essentiellement dus aux erreurs d'appréciation des types d'érosion, de la complexité du phénomène, du manque de suivi et des coûts élevés. Pour mieux contrôler les divers types de dégradation, il est nécessaire de mieux comprendre les processus en cause et d'évaluer l'efficacité des facteurs.

La maîtrise du ruissellement et de l'érosion est donc un enjeu prioritaire. Beaucoup d'aménagements, comme nous l'avons signalé, sont réalisés pour limiter les dommages surtout à l'aval, mais ceux-ci s'avèrent coûteux et leur pérennité est remise en cause. Une maîtrise complémentaire par les pratiques agricoles apparaît dès lors nécessaire et c'est dans cette optique que s'inscrit notre travail.

Dans ce cadre, des recherches sur le ruissellement, l'érosion en nappe, l'érodibilité et la production de biomasse ont été menées dans ces monts de Beni Chougrane (grand bassin versants présentant un grand intérêt régional et constitue un réservoir d'eau : 5 barrages hydrauliques) sur un réseau de 10 parcelles d'érosion pendant une dizaine d'années. Les principaux sols et les systèmes les plus pratiqués dans ces régions sont analysés. Y sont testées également différentes améliorations et innovations en vue d'une exploitation optimale et durable des ressources naturelles. Dans cette communication, nous nous contentons de présenter l'impact de trois techniques culturales couramment employées, à savoir le travail du sol, le billonnage et la jachère (pâturée et mise en défens).

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

La zone étudiée de Beni Chougrane est caractérisée par :

- un climat de type méditerranéen semi-aride, les pluies (280 > P < 450) sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle et un régime de courte durée et à forte intensité ;
- un relief ayant souvent de fortes pentes et un réseau de drainage très dense ;
- une lithologie caractérisée par des roches en majorité tendres : marne, grés tendre… ;
- des formations végétales très dégradées, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération.

Les mesures ont été essentiellement centrées sur le ruissellement et les pertes en terre ainsi que sur la production et la dynamique du carbone. Les expérimentations ont été conduites sous pluies simulées et sous pluies naturelles : un dispositif de 20 parcelles (parcelle de 100 m², de type Wischmeier), installé en 1993, dans le

cadre d'un projet INRF-ORSTOM, a permis de comparer pendant une dizaine d'années l'effet de certains systèmes de gestion du sol sur les risques de ruissellement et d'érosion.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Impact des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion

Le système de cultures, qui peut être défini comme l'ensemble constitué par la succession des cultures sur une parcelle et les techniques culturales qui leur sont appliquées, est le facteur important où l'homme peut intervenir pour modifier la sensibilité des sols et améliorer la productivité des ressources. Toute opération culturale induit une modification de l'état structural du sol et de l'infiltration et, par conséquent, une diminution ou une augmentation du ruissellement et de l'érosion.

La céréaliculture extensive est la culture traditionnelle la plus pratiquée comme dans tout le Nord-Ouest algérien, en rotation avec quelques légumineuses (pois chiche, petit pois et fève) et jachère pâturée. Les sols cultivés restent nus depuis la récolte et sont livrés sans protection à l'agressivité des pluies, surtout ceux des pentes qui sont continuellement érodés et, quelquefois, les horizons de surface sont complètement décapés. Ce n'est qu'à partir de novembre que les sols commencent à être labourés, les semis des céréales, généralement réalisés entre octobre et novembre. C'est en janvier seulement que certaines cultures commencent à couvrir le sol.

2.2. Le travail du sol

Le travail du sol sur les zones cultivées, de pente inférieure à 20 %, a une influence très marquée sur le risque du ruissellement : il retarde le début du ruissellement et augmente la capacité d'infiltration. Cette pratique est ressentie dans la région étudiée comme un moyen efficace contre la dégradation des sols. Reste à savoir l'époque, le type de travail du sol et la durée de résistance.

Les résultats obtenus sous pluies simulées dans les monts de Beni Chougrane avec une intensité de 30 mm/h ont montré l'effet positif du travail grossier par le chisel (TM), du travail à l'araire (TA) et l'effet négatif du défoncement des sols (TD) en pente et des sols abandonnés non travaillés (SNTP). Les pluies d'imbibitions (Pi) sont élevées pour les sols labourés : les Pi sont environ deux fois plus que ceux non labourés. Au cours de cette phase, l'impact des gouttes de pluie (effet *splash*) attaque les agrégats terreux et les mottes provoquant une diminution de la rugosité et un départ des particules fines qui colmatent les pores, réduisant ainsi l'infiltration. Le retard d'apparition du ruissellement et son importance sont d'autant plus considérables que la rugosité et la porosité sont importantes.

Les résultats ont montré l'effet positif sur l'infiltration du travail grossier par le chisel. Ce travail effectué avant la saison des pluies, sur sol sec, laisse beaucoup de mottes très grossières et des résidus en surface : cette rugosité importante s'oppose à l'écoulement de l'eau et les pluies prennent beaucoup de temps pour les détruire. Vu l'effet du travail grossier, un passage d'un outil à dents réalisé après les récoltes est bénéfique : il permet de régénérer la rugosité et l'enfouissement d'une quantité de résidus. Ce premier travail après les récoltes,

limite les risques du ruissellement jusqu'au premier labour, qui ne s'effectue généralement qu'au mois de novembre.

Pour le défoncement, l'inconvénient, c'est qu'il met en surface des horizons de profondeur, très fragiles, ce qui rend le sol encore plus sensible, surtout en forte pente, où les dégâts sont considérables. La durée de l'apparition du ruissellement est courte et la charge solide élevée par rapport au TM. Le défoncement en pente, qui se fait surtout pour les plantations d'arbres et de vigne, est dangereux et sans objet ; il est préférable pour les plantations d'ouvrir tout simplement des potets sans travail du sol. Le travail traditionnel à l'araire, très fréquent en zone de montagne, s'effectue généralement juste après le ressuyage des eaux de pluies — le travail à l'araire est plus facile sur sol plus ou moins humide. La rugosité est toujours élevée mais avec un état motteux faible. Les résultats ne sont pas très différents de ceux du Chizel.

2.3. Le billonnage

Le billonnage, technique couramment employée et qui s'effectue sur plusieurs cultures, semble bénéfique. Les résultats obtenus sur des parcelles en billons surtout sur sol limoneux montrent une réduction significative de l'érosion et du ruissellement. Le relief formé diminue significativement le ruissellement : il permet de piéger l'eau et d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol. Les cultures en billons sont fréquemment entretenues par des binages. Des essais de simulation de pluies ont montré qu'il est possible de réduire le ruissellement d'un facteur compris entre 3 et 5 par un binage. En jouant de la complémentarité de plusieurs types de solutions, il est par conséquent possible de limiter les risques de manière très significative (jusqu'à 1/7).

Par ailleurs, les billons ont tendance à concentrer le ruissellement. Lors des fortes pluies et sur fortes pentes, les billons peuvent être rompus et donnent naissance à des rigoles qui peuvent évoluer en ravineaux — lors d'une pluie saturante de 75 mm, les billons ont été rompus et le phénomène érosif s'est accentué —. Cette technique, si elle est bien menée (billons isohypses, cloisonnés, microrelief accentué…), peut diminuer considérablement le ruissellement et l'érosion et permettre ainsi un bon stockage de l'eau et du carbone dans les inter-billons. Le billonnage isohypse est une technique très efficace dans la lutte anti-érosive (Azontonde, 1996). Une recherche est nécessaire pour étudier l'effet des pluies sur les dimensions, l'orientation et les types des billons.

2.4. La jachère

Sur jachère, le ruissellement est fréquent lors des averses importantes. Par contre, l'érosion est relativement faible. Cependant, la matière organique (litière) est la plus transportée par le ruissellement. Sur une jachère mise en défens, le ruissellement et l'érosion ont été réduits de deux à trois fois par rapport à une jachère tassée et surpâturée où le Krmax a dépassé les 30 %. Les résultats obtenus sous pluies naturelles dans les monts de Beni Chougrane ont montré l'effet positif des jachères mises en défens (JNP) et l'effet négatif des jachères surpâturées (JP).

La jachère mise en défens a réduit de deux à cinq fois l'érosion par rapport aux autres traitements (céréales, jachère pâturée et sol nu). Selon Tribak (1988), la jachère réduit efficacement l'érosion, même en zone semi-aride ; cependant, elle ne reste pas sans effet négatif sur le ruissellement car le troupeau qui les broute tasse aussi la surface du sol. La réduction de l'érosion est surtout due au couvert végétal. L'amélioration de la biomasse a contribué d'une manière significative à entretenir la fertilité du sol et à renforcer la résistance à l'érosion. Elle a augmenté le stock du carbone organique de plus de 20 %. Parfois, il est possible de restaurer les sols au moindre coût en laissant faire la nature, tout en la contrôlant. La mise en défens est très pratiquée ces dernières années, à grande échelle dans les parcours semi-arides algériens. Une jachère bien gérée présente moins de risque et permet d'enrichir le sol. Ce mode de gestion peut être efficace si la jachère est améliorée par des légumineuses lorsque le pâturage est réglementé. La jachère pâturée et les sols abandonnés présentent un grand risque surtout pour le ruissellement : les états de surface sont caractérisés par une rugosité faible, une dominance des états fermés et par une couverture végétale très faible. Le risque devient plus grand sur les zones de surpâturage.

CONCLUSION

Sur les zones cultivées de montagnes, les sols sont continuellement érodés par les eaux de ruissellement, qui peuvent décaper l'horizon humifère du sol. Beaucoup d'aménagements très coûteux ont été appliqués sans pour autant limiter les dommages ; une maîtrise complémentaire par des pratiques culturales simples apparaît nécessaire.

Les résultats ont montré les grandes possibilités de maîtrise de l'érosion par ces pratiques culturales simples : certains sont efficaces (réduction du ruissellement et de l'érosion, maintien ou augmentation de la fertilité et de la production) et d'autres nécessitent des améliorations. Une organisation spatiale judicieuse (« assolement » de systèmes de culture au sein des versants ou d'une même exploitation) combinée avec d'autres aménagements aura encore plus d'impact.

Dans le contexte socio-économique actuel, il est difficile de changer tout un mode de gestion. C'est pour cela que nous avons insisté sur les techniques culturales couramment employées et les améliorations qui sont possibles et réalisables.

Références bibliographiques

AZONTONDE A., 1992. Dégradation et restauration des terres de barre au Bénin. *Cah. ORSTOM Pédologie*, 28, 2 : 17-226.

BENCHETRIT M., 1972. *L'érosion et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie*, PFU.

MORSLI B., MAZOUR M., MEDJEL N., HALITIM A., ROOSE E., 2004. *Effets des systèmes de gestion des terres sur l'érosion et le stock du C. dans les monts du Tell, Algérie*. *Bull.Réseau Érosion,* 22 : 144-165.

MORSLI B., MEDDI M., BOUKHARI A., 2002. Étude de ruissellement et du transport solide Utilisation de la simulation des pluies. *Actes du Séminaire.* Univ. Mascara Algérie, 2002.

TRIBAK A., 1988. *L'érosion du Pré rif oriental (Maroc)*. Thèse doc. Université Joseph Fourier Grenoble. 258 pp.

CARACTÉRISATION ET ANALYSE DES AMÉNAGEMENTS DE DRS EN ZONE EST DE L'ALGÉRIE

Abdelkrim HAMOUDI*, Boutkhil MORSLI et Eric ROOSE*****

** INRF, ALGER, B.P. 37, Cheraga, Alger, Algérie,*
tél. 062 231561 ; hamoudinrf@yahoo.fr
*** INRF Tlemcen, B.P. 88, Tlemcen, Algérie,*
tél. /fax : 213 43 20 17 92 ; morbinrf@yahoo.fr
**** IRD,UR SeqBio, B.P. 64 501, F 34394 Montpellier CEDEX 5,*
tél. 33 0 467 416 265 ; eric.roose@ird.fr

Abstract

In Algeria, more than 400.000 ha have been treated against water erosion in forty years. The strategies and methods used against erosion were numerous. To better understand the efficiency and the future of these techniques, an investigation has been realised across ten wilaya (departments) of eastern part of Algeria. In this paper, the data are analysed to obtain an evaluation of the impact of these managements against erosion on the environment and to understand reasons of failures and successes.

Keywords : *DRS System Against Erosion* ; *Eastern Algeria* ; *Regional Analysis* ; *Efficiency*.

INTRODUCTION

En Algérie, bien que plus de 400 000 ha de terres ont été traités contre l'érosion hydrique en une quarantaine d'années, celle-ci continue de poser de sérieux problèmes aux collectivités locales et aux populations rurales : les terres continuent de se dégrader et les barrages à s'envaser. Les stratégies et les méthodes antiérosives utilisées furent nombreuses, et parmi elles, figurent surtout les méthodes dites de Défense et restauration des sols (DRS). Ces techniques largement utilisées n'ont donné que des résultats partiels, ce qui a soulevé des interrogations de plus en plus pressantes sur leur efficacité et leur devenir. Les objectifs de la DRS se résument comme suit : la protection des ouvrages en aval (barrage, infrastructure routière et ville) et de l'environnement, la réduction de l'érosion et l'amélioration de l'infiltration des eaux de pluie, l'augmentation de la production végétale et la création d'emplois pour les riverains (raison socio-économique).

À cet effet, pour cerner au mieux l'essentiel des questions soulevées au sujet de ces techniques et pour tirer les leçons de cet immense champ expérimental dont dispose l'Algérie, une enquête a été réalisée au niveau de dix wilayas de l'Est du

pays. Un questionnaire fut renseigné et les données sont analysées en vue d'aboutir à une évaluation de l'impact de ces ouvrages antiérosifs sur le milieu et de comprendre la raison des échecs et des réussites. Une enquête similaire a déjà été effectuée dans le centre et l'ouest algérien selon un contexte différent de celui de l'est du pays, particulièrement du point de vue bioclimatique.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

La première étape a concerné l'élaboration d'un document sous forme de questionnaire de 11 points (paramètres). Ce questionnaire porte sur le type d'aménagement, les objectifs de l'aménagement, l'état actuel des aménagements, le type de roche, le type de pentes, l'étage bioclimatique, le type d'érosion, la pression animale, la pression humaine, le système agraire et le couvert végétal.

Après une phase d'investigation sur les sites, les documents relatifs à l'enquête ont été dûment remplis. Ce travail a permis, d'abord, d'examiner la qualité des réponses en fonction des questions, et de consigner les observations récapitulatives sur un tableau par dossier unitaire dit de dépouillement ; ensuite, d'opérer une synthèse de quatre paramètres pour apprécier et évaluer l'état actuel des aménagements ; et, enfin, de trier les dossiers obtenus en six catégories de type d'aménagement : grands aménagements mixtes, banquettes algériennes, barrages collinaires, correction torrentielle, terrasses progressives et gradins forestiers.

À partir des informations obtenues sur les aménagements enquêtés, nous avons élaboré une matrice binaire, où chaque paramètre est subdivisé en variables selon la diversité et les limites des données, afin d'aboutir à une matrice de « présence-absence ». Des 11 paramètres enregistrés, nous avons obtenu une nouvelle matrice de 59 variables avec laquelle on a effectué une analyse factorielle de correspondance (AFC) et une classification hiérarchique (méthode de Ward).

2. RÉSULTATS

D'après les résultats de l'AFC, on constate que les principaux paramètres qui contribuent à la formation des premiers axes (1, 2 et 3) sont les types d'aménagements, la pression animale, le bioclimat, la lithologie et le système agraire

Ces axes expliquent plus de 80 % de la variabilité globale. À partir de l'AFC et la classification hiérarchique, on observe la présence de huit groupes des situations enquêtées. Les groupes identifiés sont composés par un certain nombre de sites qui sont caractérisés comme suit.

2.1. Groupe 1

Localisé essentiellement en zone semi aride inférieure (350 mm), au sud de Batna et en zone steppique (Khenchela et Djelfa), il représente 12,2 % des aménagements enquêtés et est dominé par le type levée de terre. L'état de ces aménagements varie de la classe 3 (fonctionnel) à la classe 4 (fonctionnel et valorisé), mis à part celui de Chechar, situé en forte pente et qui est partiellement

détruit à cause probablement d'une forte pression animale et humaine. Le système agraire de type agro-sylvo-pastoral est orienté vers l'autoconsommation et la commercialisation.

2.2. Groupe 2

Localisé en zone sylvo-pastorale au sud de Khenchela et Tébessa (semi-aride inférieur), caractérisé par des aménagements de type gradins forestiers, il représente 4,1 % des aménagements enquêtés. Dans ce groupe, on remarque que deux des aménagements sont fonctionnels et valorisés, alors que le reste, partiellement détruit, est soumis à une forte pression animale.

2.3. Groupe 3

Cet important groupe (28,6 %) représente les aménagements de type banquettes, murettes en pierres et revégétalisation. Il comprend une partie de la zone de montagne de Khenchela et les zones montagneuses de Batna, zones très pierreuses (construction de murettes). L'état général de l'ensemble des aménagements de ce groupe est fonctionnel ou fonctionnel et valorisé. Néanmoins, il demeure que certains ouvrages des sites de N'Gaous, Batna et Arris sont partiellement détruits. Situés dans un ensemble de terrains pentus (12 % à 25 % et 25 % à 40 % de pente), la céréaliculture traditionnelle est dominante sur des enclaves forestières. La pression animale varie selon les saisons. Elle est de la classe moyenne à forte. Le système agraire de type agro-sylvo-pastoral est orienté vers l'autoconsommation et la commercialisation.

2.4. Groupe 4

Localisé en zone semi-aride de Batna ($200 < P < 300$ mm de pluie), il est représenté par 7,1 % des aménagements enquêtés. Il se caractérise par deux types d'aménagement : la banquette et la retenue collinaire, dont l'état reste tributaire de leur gestion et leur entretien. Ces aménagements sont partiellement détruits, hormis ceux des sites d'Aïn Beida et Aïn Touta qui sont encore fonctionnels. Il est à noter une forte pression animale dans ces milieux semi-arides où la seule activité des populations reste l'élevage ovin et la céréaliculture traditionnelle.

2.5. Groupe 5

Ce groupe représente 15,3 % des aménagements enquêtés et comprend les aménagements situés en zone assez arrosée du constantinois (étage bioclimatique subhumide : 550 mm-800 mm de pluie). Il comprend deux types d'aménagement : la banquette et les gradins forestiers. Sur les 15 types d'aménagement que comporte ce groupe, 11 sont partiellement détruits et seulement 4 sont fonctionnels. Il est à signaler que ces derniers sont localisés sur de petites superficies où les pressions humaines et animales sont sans incidence majeure.
Le relief est assez accidenté avec des pentes assez fortes dépassant souvent les 24 %. La lithologie est surtout de type argile et marne.

Dans ces zones montagneuses, la pratique de l'arboriculture, la céréaliculture et l'élevage est dominante. On note par ailleurs que les réseaux de banquettes

construits en 1976 pour la protection du barrage des Zardezas sont complètement effacés par les labours, ce qui a généré une dynamique érosive importante.

Le système agraire de type agro-sylvo-pastoral est orienté vers l'autoconsommation et la commercialisation.

2.6. Groupe 6

Localisé en zone semi-aride inférieure des Aurès, ce groupe est représenté par trois types d'aménagement : la banquette, la murette et la levée de terre. Il représente 4,1 % des aménagements enquêtés. L'état de ces aménagements est de type 3 (fonctionnel), hormis celui du site d'Arris qui est partiellement détruit. Il présente une grande superficie et est soumis à une forte pression animale. L'objectif, en plus de la protection, vise l'introduction de nouvelles cultures (arboriculture) et la création d'emplois pour les riverains. Le système agraire est de type agroforestier orienté essentiellement vers l'autoconsommation.

2.7. Groupe 7

Groupe assez important (18,4 % des aménagements enquêtés), il représente les aménagements effectués en zone humide du massif de Kabylie (1 000 < P < 1 200 mm de pluie). Ce groupe est essentiellement constitué de banquettes, avec un cas de reboisement industriel à base d'eucalyptus. Il est à signaler que plus de la moitié de ces aménagements sont détruits malgré une faible pression humaine et animale. La lithologie est de type schiste tendre, assez sensible à la dégradation en zone humide. Les autres types d'aménagement qui présentent les mêmes caractéristiques sont partiellement détruits, hormis le type d'aménagement intégrant le reboisement industriel qui est fonctionnel.

Dans ces zones de montagnes, à relief accidenté (12 %-25 %), en plus du pâturage, les principales cultures sont l'arboriculture et accessoirement la céréaliculture traditionnelle et la vigne. Le système agraire de type agro-sylvo-pastoral est orienté vers l'auto consommation et la commercialisation.

2.8. Groupe 8

Composé de trois types d'aménagement, gradins forestiers, murettes en pierres et revégétalisation, ce groupe représente 10,2 % des aménagements enquêtés. Il se localise dans la région de petite Kabylie, dans l'étage bioclimatique subhumide (600 < P < 750 mm de pluie). L'état des aménagements varie du type 2 (partiellement détruits) au type 3 (fonctionnels). Le relief est assez accidenté avec de fortes pentes.
L'occupation du sol est caractérisée par la céréaliculture, l'arboriculture fruitière et la culture des légumes secs. Le système agraire, orienté vers l'autoconsommation et la commercialisation, est de type agroforestier.

3. DISCUSSION

Dans les zones humides et subhumides (Nord-Constantinois et Kabylie), caractérisées par de fortes pentes et des lithologies tendres (marne, schiste, argile), les aménagements sont constitués généralement par des banquettes.

Implantées sur des sites inappropriées, ces banquettes sont souvent détruites et non fonctionnelles. Certains versants non traités mais couverts par la végétation se sont relativement mieux comportés que ceux équipés par des banquettes. On se demande pourquoi elles ont été implantées dans ces types de milieu. Ceci pose le problème de la généralisation de ce type d'aménagement. Les causes des échecs sont multiples : la généralisation de la technique sur des sites inappropriés, son manque d'efficacité, l'insuffisance des études de base relatives aux processus érosifs et leur spatialisation ont induit des interventions inadéquates (coût très élevé, manque d'entretien et surtout délaissement et désintéressement des paysans). Ces résultats sur les banquettes confirment ceux trouvés par certains auteurs (Heusch, 1986 ; Hamoudi et *al.*, 1989 ; Roose et *al.*, 1993 ; Arabi et Asla, 1998).

Cependant, il faut noter que certains aménagements en banquettes sont fonctionnels, bien valorisés et entretenus par les paysans du fait du revenu qu'elles génèrent, mais ces cas restent rares. Heusch (1986) estime que la banquette convient seulement dans le cas des sols limoneux et d'orages d'été violents et brefs. Si la banquette est mal entretenue, elle devient un facteur d'accélération de l'érosion (Belatreche). Cela suppose que si la banquette a été implantée là où il faut et bien gérée, elle aura peut-être un impact plus positif que ce que l'on constate, mais le coût très élevé et son inacceptation par les paysans constituent des limites de son application. N'y a t-il pas d'autres alternatives plus souples et moins coûteuses ?

En zone semi-aride et steppique ($p < 500$ mm, pentes relativement faibles et lithologie plus ou moins résistante), les aménagements de type levées de terre, gradins et murettes sont les plus fréquents. Ces aménagements sont généralement maintenus, fonctionnels et, quelquefois, valorisés par des plantations d'arbres. Il reste cependant à savoir si ces aménagements ont bien atteint l'objectif pour lequel ils ont été réalisés. Nous notons toutefois que la destruction de certains ouvrages dans ce type d'aménagements est due à l'abandon et surtout à la forte pression animale (zone à vocation agro-sylvo-pastorale).

Les levées de terres réalisées sur des pentes faibles ont donné des résultats appréciables, mais elles sont onéreuses. Actuellement, en s'inspirant de cette méthode, des levées de terre de 50 cm ou des fossés isohypses sont largement utilisées et même appréciées par les paysans. Ces dernières techniques sont utilisées pour l'amélioration de l'infiltration des eaux et pour l'évacuation des eaux excédentaires.

Les gradins, souvent réalisés manuellement, et surtout les murettes traitées en courbes de niveau sont assez intéressants pour atténuer l'effet de l'érosion et surtout pour l'amélioration de l'infiltration et l'emmagasinement d'une partie de l'eau pluviale dans le sol. Certaines murettes ont évolué en terrasses progressives par l'accumulation de terre à l'amont et sont utilisées souvent pour les plantations. Ces pratiques, très proches des stratégies traditionnelles, semblent convenir et connaissent actuellement une expansion dans l'Est algérien (Tébessa, Khenchela...). Ces techniques sont combinées avec d'autres actions (techniques culturales antiérosives) et sont intégrées dans un aménagement global et ont tendance à être de plus en plus menées par des individus.

CONCLUSION

À l'issue de cette étude, nous avons remarqué que sur l'ensemble des aménagements étudiés, près de 49 % sont fonctionnels, alors que le reste (51 %) est soit partiellement ou complètement détruit. Les aménagements complètement détruits sont surtout de type banquettes installées sur schiste tendre en zone subhumide et humide de Kabylie et des sites marneux du Constantinois. (Zardezas, Zighoud…). Les aménagements fonctionnels sont assez diversifiés et localisés soit au niveau des zones steppiques semi-arides (Tébessa, Djelfa), soit en zone de montagne des Aurès et le Nord-Constantinois.
L'une des raisons fondamentales des mauvais résultats observés sur certains types d'aménagements tient au fait que les ouvrages ne sont pas entretenus, et à cela s'ajoute souvent une forte pression animale ou humaine qui met en danger leur efficacité. Toutefois, certains de ces ouvrages peuvent être réhabilités.

Enfin, nous pouvons dire que cette évaluation sur les techniques de DRS a montré que les programmes n'ont pas bénéficié de la rigueur nécessaire quant à leur mise en œuvre. La décision administrative trop hâtive de réalisation a souvent pris le pas sur les études de faisabilité et il n'est donc pas étonnant de relever un taux d'échec assez élevé.

Avec des objectifs plus clairs, un diagnostic de terrain plus détaillé sur les facteurs biophysiques et socioéconomiques et l'implication des riverains dans les programmes, ces aménagements auraient pu avoir un impact positif. Cependant, concernant les nombreux programmes actuels de lutte contre l'érosion qui se font dans le pays, cette analyse permet de tirer les leçons de l'existant pour améliorer la conception des aménagements futurs.

Références bibliographiques

ARABI M., ASLAA T., 1998. États de dégradation des banquettes dans le massif central de Kabylie (Algérie), *Bul. Réseau Érosion IRD* 18 : 364 - 379.

BELLATRECH A., 1988. *Érosion et perspectives des sols dans les bassins sédimentaires de Médéa, Beni Slimane, Algérie*. Thèse, Paris VII, 276 pp.

HAMMOUDI A., MONJENGUE S., ROOSE E., 1989. Enquête sur l'efficacité des aménagements de défense et restauration des sols (DRS) en Algérie. *Bull. Réseau Érosion IRD* 19 : 14-18.

HEUSCH B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.–C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22, 2 : 153-162.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 289-308.

INFLUENCES DES AMÉNAGEMENTS ANTIÉROSIFS SUR DEUX COUPLES DE MICRO-BASSINS EXPÉRIMENTAUX EN MILIEU SEMI-ARIDE ALGÉRIEN (BASSIN VERSANT DU HAUT-CHELIF)

Mourad ARABI
INRF, B.P. 193, Ain Dheb 26001, Algérie
almouraddz@yahoo.fr

Abstract

Algeria is a mountainous and semi-arid Mediterranean country. Since the beginning of the 20th century, it has known very hard problems of erosion. On the high plains in the Chelif River basin, where marls from the Miocene are extremely vulnerable to water erosion, two pairs of experimental research catchments have been selected. All catchments were observed from 2000 to 2003 for testing the efficiency of antierosive structures. In the protected basins, studies carried on the comparison of various types of check-dams (gabions, metallic weirs, tires dams). After three years of erosion control, check-dams resisted to the autumn and winter floods and have been filled quickly during the first year. Volumes of deposits trapped behind micro dams reach 2 917 m^3 to 3 005 m^3 in three years. But after the gully management, the specific erosion passed respectively from 42 t/ha/year to 9 t/ha/year on marls and 23 t/ha/year to 1,4 t/ha/year on sandy clays. Many biologic techniques permitted to stabilise earths, to consolidate slopes and to cover sediments deposited behind weirs quickly. For a similar efficiency, the experienced check-dams cost can be brought back below the half of the price of "gabions" reference. The evolution of vegetation is so remarkable that gully became a kind of a "linear oasis" in three years.

INTRODUCTION

Pour réduire l'envasement des barrages en Algérie, il faut éteindre les principales sources de sédiments. Or les premières études ont montré que les versants surpâturés ou cultivés libèrent peu de terre mais beaucoup d'eau de ruissellement, jusqu'à 80 % lors des fortes averses tombant sur des sols engorgés à la fin de l'automne et du printemps (Roose *et al.*, 1993). C'est ce ruissellement qui, en dévalant des versants, s'accumule dans les ravines et déplace une masse considérable de sédiments par érosion linéaire et glissement de terrain lors des débits de pointe des crues principales (effet de chasse). Il est apparu donc nécessaire de compléter ces travaux par une étude sur le fonctionnement hydrodynamique des bassins versants soumis à différents traitements antiérosifs en correction torrentielle. Deux couples de bassins versants représentatifs

expérimentaux, de superficie variant entre 50 ha à 105 ha, ont été sélectionnés près du barrage de Bouguezoul, et suivis de 2000 à 2003. Pour tester l'efficacité de la lutte contre l'érosion, l'un des bassins de chaque paire a été aménagé, l'autre, non traité, servant de témoin. Dans le cadre du programme PNR2/CRSTRA, les recherches effectuées dans les bassins aménagés ont porté sur la comparaison de divers types de seuils, faits de matériaux locaux (pierres sèches, sacs plastiques, grillage métallique et pneus usés) aux gabions conventionnels. Les recherches s'intéressent aussi à la sélection d'espèces végétales à forte valeur ajoutée : oliviers, figuiers, pommiers, amandiers, grenadiers, caroubiers, pistachiers (*Atlantica* et *Vera*) et à croissance rapide : *Populus,* surtout la variété *Euphratica, Acacias cyanophyla* et mimosa*, Morus alba, Fraxinus dimorpha, Ulmus campestris, Medicago arborea…* qui s'adaptent à la rigueur du milieu.

1. LE MILIEU

Les bassins sont situés en amont du barrage de Boughezoul, sur les hautes terres de l'Oued Chélif (35° 42'N – 2°50'E, alt. = 890 m, à 190 km d'Alger), domaines des steppes à alfa et armoise, formés sur marnes et argiles tertiaires ($20 < A + LF < 40$ %), vastes étendues de terres sensiblement planes qui établissent la jonction des chaînes du Tell à l'Atlas saharien et qui connaissent de graves problèmes de dégradation. Ce sont deux couples de bassins : Sedara et Hririza, choisis à cause de leurs diversités physique et humaine. Les reconnaissances détaillées du terrain montrent que le remplacement de la steppe à alfa par d'autres formations à *chamaephytes* témoigne d'un processus de dégradation continu que Le Houerou (1969) a appelé « steppisation ». Le climat de la région est méditerranéen semi-aride à hiver froid. Les précipitations moyennes annuelles atteignent 220 mm. La période des pluies s'étale de septembre à avril. En général, les intensités sont faibles et l'agressivité des pluies réduite. Mais les orages d'automne sont si violents qu'ils peuvent précipiter une grande quantité d'eau en peu de temps.

2. CADRE EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental comprend deux couples de bassins comparatifs de 50 ha à 105 ha. L'un des bassins de chaque couple est traité en aménagements antiérosifs, le bassin non traité sert de témoin. Le traitement comporte quatre types de seuils (pierres sèches, grillage métallique, sacs plastiques, pneus) à comparer avec un seuil conventionnel en gabions. Les végétaux utilisés sont testés dans au moins quatre techniques de végétalisation (appui d'ouvrages, recouvrement total, plantation en courbes de niveau, plantation en contrebas des seuils). Pendant trois ans, de septembre 2000 à septembre 2003, on a quantifié :

- les pluies depuis la station climatique ANRH du barrage de Boughezoul ;
- le charriage de fond, dans les plages de dépôts, situées à la sortie de l'exutoire, en aval des seuils jaugeurs ;
- les matières en suspension (MES), dans les flacons à siphon en plastique à 1,50 m du sol, sur des échelles de crue ;

- les variations topographiques périodiques ;
- le déplacement de cailloux colorés de différents diamètres ;
- la vitesse d'altération de la roche sur les parois des berges à l'aide de peignes à dents coulissantes ;
- enfin, la réaction des paysans sur l'aménagement.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION : INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS

3.1. Influence sur les écoulements

Le premier effet des aménagements antiérosifs est la réduction du volume des écoulements des ravines. Berguaoui *et al*. (2000) ont observé un effet analogue dans le bassin versant de l'oued Zioud en Tunisie. Les crues ne sont pas dues à des pluies exceptionnelles. Les crues d'automne sont générées par des averses d'orage à forte intensité et de courte durée, localisées et brutales, alors que les pluies d'hiver et de printemps ont des intensités faibles ou moyennes, et le ruissellement se développe sur des sols tassés, encroûtés par la battance, engorgés ou peu profonds. On évalue entre 9 % et 26 % d'écoulement en moins dans les ravines aménagées que dans les témoins. Certaines pluies n'ont produit d'écoulements que dans les bassins non aménagés. Les crues varient à la fois en fonction des saisons climatiques, des aménagements, de l'état du sol, de la lithologie et des caractéristiques morphométriques; (Kouri *et al.*, 1997 ; Roose, 2002).

Le second effet des aménagements est la limitation de la fréquence des écoulements. Les crues des bassins aménagés sont moins fréquentes et de nombreuses averses n'ont pas produit d'écoulement significatif. Le déficit en écoulement peut s'expliquer, d'une part, par la recharge des nappes, surtout en début de saison, et d'autre part, par l'évapotranspiration des végétaux à croissance rapide.

3.2. Influence sur les transports solides

Dans les bassins non aménagés, les concentrations en MES varient de 137 g/l sur marnes à 103 g/l sur argiles sableuses et augmentent de l'amont vers l'aval du fait de l'érosion. En automne, l'écoulement est réduit en début de saison et les concentrations sont plus élevées que pendant le restant de la campagne. Dans les ravines aménagées, la charge solide est nettement inférieure à celle des ravines non aménagées. Bien que les seuils soient perméables, les écoulements sont 3 à 17 fois moins concentrés en terre et le charriage de fond est quasi nul. En effet, derrière les seuils s'est formée une zone de sédimentation. Sur l'ensemble des bassins versants non aménagés, le bilan de ces trois années fait ressortir un volume moyen des terres érodées de 1 389 m^3 ha^{-1}an à Sedara, sur marnes, à 1 252 m^3 ha^{-1}an à Hririza, sur argiles sableuses. Mais après trois années d'aménagement, la dégradation spécifique est passée respectivement de 42 à 9 t/ha/an et de 23 t/ha/an à 1,4 t/ha/an. Quant aux volumes des dépôts piégés derrière les seuils, ils atteignent 2 917 m^3 à 3 005 m^3 en trois années, soit 70 % à 80 % de la terre érodée. Comme on sait qu'en région méditerranéenne, l'érosion

en nappe participe peu aux transports solides et que l'érosion en masse est peu active dans ces paysages semi-désertiques, l'érosion linaire par sapement et entaille linaire semble être le processus dominant (Heusch, 1970 ; Debazac *et al.*, 1973 ; Laouina, 1998). Les observations des ravines avant aménagement confirment que les sources de sédiments sont localisées au niveau des têtes des ravines et surtout sur les berges des ravines.

3.3. État des aménagements

3.3.1. Les seuils

Les seuils présentent une efficacité remarquable pour sédimenter les terres arrachées. Les atterrissements derrière les seuils furent très vite colonisés d'abord par la végétation autochtone, puis, à mesure que ces dépôts atteignent le niveau du seuil, par la végétalisation artificielle. La réussite des seuils en pierres sèches dépend avant tout de la qualité des pierres et des artisans spécialistes. La pierre de mauvaise qualité (galets ronds) favorise l'apparition des trous de renards sur les points sensibles. De même, les animaux errants déstabilisent les ouvrages. L'installation d'un contre-barrage réduit l'affouillement. Les seuils en grillage métallique (de 10 mm d'ouverture), appuyés sur des piquets enfoncés dans le sol et renforcés par des haubans amarrés à des piquets d'ancrage, sont très efficaces et résistent bien aux poussées de l'atterrissement. Bien qu'ils soient souples, leur maniement sur le terrain est cependant difficile, surtout dans les endroits d'accès difficile. Les seuils en sacs plastiques sont peu solides — usure de la rangée supérieure car le plastique résiste mal aux rayons ultraviolets et aux cailloux tranchants qui circulent, mais efficaces, souples et faciles à mettre en place. Le plastique noir est plus résistant au soleil et le déversoir doit être renforcé par une barre de fer. Les seuils en pneus usés sont peu solides à cause de leur faible densité, mais résistants si les ligatures sont bien faites. Il est difficile d'adapter l'ouvrage au profil de la ravine comme il n'est pas facile de trouver des pneus de même dimensions dans les petites villes. Même si l'aspect esthétique reste discutable, leur utilisation est un bon moyen pour recycler les matières usagées comme les pneumatiques.

3.3.2. La végétation

Dès la formation des atterrissements derrière les seuils, la végétation s'installe. Les légumineuses (lotier de Crète et sainfoin), grâce à leur système racinaire développé, jouent un rôle prépondérant dans la fixation des particules : leur implantation est recommandée pour fixer les atterrissements. Les graminées (*Saccharum* d'Égypte, sorgho, barbon hérissé) installées en appui aux ouvrages de génie civil jouent le rôle d'un peigne en filtrant l'eau des sédiments à leur passage grâce à leurs longues tiges (Rey *et al.*, 2002). En contrebas de l'ouvrage, la revégétalisation est essentielle si on veut éviter les problèmes d'affouillement. Les plantes comme le laurier rose, le jonc, le tamaris ou la canne de Provence s'accommodent d'une forte humidité. La souplesse de leurs tiges amortit l'énergie cinétique du courant, même durant les pointes de crues. L'introduction d'espèces ligneuses (lauriers, tamaris, lentisques…) qui se multiplient par drageonnement ou éclats de souche à la base des seuils peut remplacer un contre-barrage et réduire le coût des aménagements. Enfin, l'alignement en courbes de niveau des

plantations à croissance très rapide comme les peupliers, surtout la variété de l'Euphrate, des acacias, mûriers, frênes, ormes, en plantation serrée, freinent le recul des berges et favorisent l'expansion de la strate herbacée.

Le développement remarquable de ces espèces en si peu de temps est visible depuis la route nationale et confère aux ravines aménagées une allure d'« oasis linéaire », comme cela a pu être observé par divers autres auteurs dans des régions comparables (GTZ dans la Mina en 1988-1992, Roose *et al.*, 2000). La colonisation des interfluves par la végétation spontanée constitue un indice de stabilité en prélude à la cicatrisation des ravines. La valorisation des atterrissements par des plantations fruitières rustiques à forte valeur ajoutée (oliviers, figuiers, pommiers, amandiers, grenadiers, caroubiers, pistachiers) intéresse les paysans et récompense leurs efforts dans la lutte contre l'érosion.

3.4. Évolution des ravines après aménagement

Les atterrissements formés en amont des ouvrages ont sensiblement modifié la topographie générale de l'exutoire. Le niveau du lit est relevé d'au moins un mètre, et les terres accumulées jusqu'aux berges bloquent le glissement des berges. Ce stockage d'alluvions derrière les seuils a deux effets immédiats : la protection des retenues contre l'envasement et l'amélioration des ressources en eau par un étalement des crues et par le développement de nappes souterraines. Vu de loin, le profil du fond de ravine évolue en marches d'escalier et la forme initiale des ravines en U s'est transformée progressivement en un glacis d'accumulation. Sur le plan écologique, on observe l'installation des premiers îlots de végétation qui se propage dans tous les sens en colonisant même les secteurs encore actifs (Randrianjafy, 2000 ; Rey *et al.*, 2002). Sur le plan hydrologique, les écoulements semblent moins turbulents, le ruissellement plus étalé et l'intensité des crues abaissées.

4. RECOMMANDATIONS

Il ressort de ces différents résultats que les aménagements testés ont eu un effet significatif sur le comportement hydrologique des bassins versant : ils ont réduit l'écoulement et les transports solides. Ils apparaissent donc comme un élément essentiel de la régulation hydrologique et de la stabilisation des berges.

Cependant, il ne faut pas oublier que le ruissellement naît à la surface du sol du bassin (Roose *et al.*, 1993). Dans les conditions de sols encroûtés par la pluie ou gorgés d'eau, de pentes fortes et de couvert végétal insuffisant, le ruissellement peut se concentrer et acquérir assez d'énergie pour creuser de nouvelles ravines. Il est donc fondamental d'orienter la lutte contre l'érosion d'abord sur les versants, pour retarder le ruissellement et étaler les filets d'eau. Les techniques antiérosives testées en Algérie dans le cadre de la convention entre l'INRF et l'IRD sur la stratégie « gestion conservatoire de l'eau de la biomasse et de la fertilité des sols » (GCES) ont permis d'atteindre ces objectifs (Roose *et al.*, 1993). Ensuite, il est nécessaire d'aménager les ravines, pour écrêter le débit de crues et réduire les transports solides.

En Algérie, depuis l'arrêt de la DRS l'Administration des forêts a opté pour l'amélioration foncière, la plantation fruitière sur les hauts versants et la correction

des ravines (RTM). La correction torrentielle des ravines par des seuils en gabions s'est beaucoup développée ces dernières années.

CONCLUSION

Les aménagements antiérosifs testés dans les ravines ont permis de réduire l'érosion et de réguler les écoulements en assurant un étalement et un écrêtement des débits de pointe. La correction torrentielle apparaît donc comme un élément essentiel de la régulation hydrologique et de la stabilisation des berges mais non suffisante pour réduire les risques érosifs sur le versant. Parmi les ouvrages, on peut suggérer les seuils bon marché en pneus et en sacs plastiques (à exutoire renforcé). Ces méthodes simples et légères ont prouvé leur efficacité lors de certaines crues, pour un coût de revient inférieur à celui des autres seuils, à condition que les matériaux utilisés soient disponibles localement. On recommande les seuils en pierres sèches dans les régions isolées, éloignées des centres d'approvisionnement, mais où la pierre de bonne qualité est disponible. Les seuils en grillage peuvent être utilisés dans les régions où la main-d'œuvre spécialisée et les pierres font défaut. Enfin, les seuils en gabions sont excessivement chers : seul l'Etat ou les collectivités locales peuvent les prendre en charge pour protéger certains ouvrages d'art d'utilité publique, tels que les pistes, les talus et les ponts. Mais pour assurer la pérennité des ouvrages, il est nécessaire de compléter le dispositif par la végétalisation des atterrissements et des talus correspondants.

La valorisation des atterrissements par des productions fourragères (légumineuses et graminées) et des plantations fruitières rustiques à forte valeur ajoutée (oliviers, figuiers, pommiers, amandiers, grenadiers, caroubiers, frênes, pistachiers), si elle se confirme dans les années à venir, peut générer des revenus complémentaires en incitant les paysans à l'aménagement des ravines. Il existe d'ailleurs des exemples d'aménagements traditionnels de ravines par les paysans (oliviers en cuvettes ou derrière des cordons de pierres).

Références bibliographiques

BERGAOUI M., ALGERGEL J., 2000. Effets d'un aménagement antiérosif en pierres sèches sur la violence et la forme des crues (bassin versant de l'oued Zioud, Tunisie). *Bull. Réseau Érosion IRD* 20 : 23-38.

DEBAZAC E., ROBERT P., 1973. *Recherches relatives à la quantification de l'érosion*. Document n°4, Publications du projet érosion, FAO, Rabat, Maroc.

HEUSCH B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative. *Annales de la Recherche Forestière du Maroc*, 12 : 9-176 .

KOURI L., VOGT H., GOMER D., 1997. Analyse des processus d'érosion linéaire en terrain marneux, bassin de l'oued Mina, Tell oranais, Algérie. *Bull. Réseau Érosion IRD* 17 : 64-73 .

LAOUINA A., 1998. Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull. Réseau Érosion IRD* 18 : 33-53.

LE HOUEROU H.N. 1969. La végétation de la Tunisie steppique (avec référence aux végétations analogues d'Algérie, de Libye et du Maroc). *Ann. INRAT*, 42, 5, 624 pp. et 1 carte couleur 1/500 000.

RANDRIANJAFY Z. 2000. Une technique biologique pour la protection des berges de cours d'eau de la région de Mahajanga, Madagascar. *Bull. Réseau Érosion IRD* 20 : 157-164.

REY F., CHAUVIN C., RICHARD D., MATHYS N., ROVERA G., MOREL A., 2002. Le piégeage des sédiments marneux par des barrières végétales (Alpes du Sud, France). *Bull. Réseau Érosion IRD* 21 : 331-345.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K, CHEBBANI R, MAZOUR M et MORSLI B., 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne algérienne. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28 : 289-308 .

ROOSE E., CHEBBANI R., BOUROUGAA L., 2000. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 11, 4 : 317-326.

INFLUENCE DE LA MISE EN DEFENS OU EN CULTURE SUR LA DYNAMIQUE DES FLUX ÉROSIFS EN MILIEU DÉGRADÉ DE TUNISIE CENTRALE

Hattab BEN CHAABANE et Hédi HAMROUNI
Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques, Tunisie ;
hat_tn04@yahoo.fr

Abstract

The present survey took place in two sites, which represent the land use system (LUS) in Central Tunisia. Site A is a high eroded forest area as a result of overgrazing and sheet erosion, and the site B is representative of the land use types (LUT) and their impacts on the semi arid and arid landscapes in piedmont zone. Objectives consist to evaluate the impact of the "deferred exploitation" and stone bunds as a type of land degradation control (LDC) in the first site and to evaluate the impact of the land use type in the second site. Measured parameters are rainfall, runoff and erosion fluxes. They showed a significant decrease of the erosion rates in the site A (from 620 kg.ha^{-1}yr^{-1} to 145 kg.ha^{-1}yr^{-1} between 1981 and 2001). It indicates a considerable weakening of rain erosivity as the environment balances restore. In the site B, data came from two plots (non cultivated plot as a pilot and cultivated plot). They revealed higher erosion rates (2,0 t.ha^{-1}yr^{-1}) and important losses of fine particles, organic matter and nutrients in the cultivated plot, as a consequence of non-adequate cultural practices, which reduced the vegÉtative cover and exaggerated the impacts of the energetic fluxes. In the non-cultivated plot, erosion rates were moderate (0,4 t.ha^{-1}yr^{-1}). The alfa cover (Stipa tenacissima) permitted a decrease of 80% of erosion.

Keywords : *Tunisia* ; *deferred exploitation* ; *cultivated* ; *non-cultivated* ; *plot* ; *runoff* ; *erosion*.

1. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES

La présente étude concerne l'analyse des résultats de deux recherches expérimentales réalisées dans la zone montagneuse (site A) et de piémont (site B) du djebel Semmama, en Tunisie centrale. L'investigation menée dans le site A s'inscrit dans le cadre de la recherche d'alternatives d'aménagement dans les franges forestières très dégradées situées entre la moyenne montagne et le piémont. Elle a pour objectif d'étudier l'effet de la mise en défens et des cordons en pierres sèches, comme pratique conservatrice, sur la dynamique des flux, dont les impacts se sont traduits en termes de perte de fonctionnalité des espaces forestiers, et en termes de nuisance majeure pour les zones de cultures en aval,

dans la zone de piémont. Le dispositif expérimental est formé par une parcelle de 4 500 m², située sur une surface structurale exposée au sud-est, qui culmine à 864 m d'altitude et développe une pente régulière de 12,5 %. Le site B, situé dans la zone de piémont, abrite une expérimentation dont l'objectif est d'évaluer l'impact des types actuels d'utilisation des sols sur la dégradation des milieux dans les zones arides de la Tunisie centrale. Ces types d'utilisation sont matérialisés par l'extension des superficies céréalières et arboricoles aux dépens des superficies jadis réservées à l'alfa et aux parcours naturels. Ils s'installent sur les versants d'érosion qui supportent des paléosols de faibles profondeurs et à potentialités productives médiocres. Le dispositif expérimental est composé de deux petites parcelles limitrophes d'une superficie de 345 m² chacune, ayant le même type de sol et une pente régulière de 5 %. La petite parcelle dite « couverte » (PC) est mise en défens et présente un taux de recouvrement végétal d'environ 60 %. La seconde parcelle dite « non couverte » (PNC) est défrichée et mise en culture, conformément au type d'utilisation du sol qui prévaut dans cette zone. Les paramètres mesurés sont les pluies, le ruissellement et le transport solide. La période des mesures s'est étalée sur plus de vingt ans dans les deux sites.

2. LES RÉSULTATS OBTENUS AU NIVEAU DU SITE A

Ils montrent un changement net de l'évolution des paramètres de ruissellement et de l'érosion. Le tableau 1 ci-après révèle une diminution très significative des taux d'érosion spécifique, qui passent ainsi de 620 kg.ha^{-1}an^{-1} au cours de la première décennie à 145 kg.ha^{-1}an^{-1} au terme de la deuxième, soit une diminution d'environ 80 %. Quant à la lame érodée (Le), elle a accusé une diminution similaire, passant de 0,41 mm à 0,09 mm, soit une contribution dans la lame érodée totale qui se limite à 18 % pour toute la période de mesure.

Tab. 1. Évolution du ruissellement et de l'érosion dans le site A

Année	Pluie (mm)	LRT (mm)	Er kg ha^{-1}an^{-1}	Le (mm)
1981-1991	919,0	102,6	620,0	0,41
1991-2001	853,0	60,4	144,8	0,088

Cette tendance à la baisse des taux d'érosion s'est faite sentir de manière progressive, au fur et à mesure de l'évolution du couvert végétal, mais elle a été plus nette à partir de la deuxième décennie, malgré la pression constante des flux pluvieux et ruisselés. Ceci témoigne d'un changement radical du comportement érosif de la parcelle, lequel changement a été perceptible aussi bien à l'échelle inter-annuelle qu'à l'échelle de la pluie ruisselée. Le tableau 2 ci-après montre l'évolution décennale du ruissellement et de l'érosion selon les classes de hauteurs de pluies ruisselées.

Tab. 2. Ruissellement et érosion par classe de hauteur de pluie (1981-2001)

	Pluie ruisselée (mm)		Érosivité ($kg.mm^{-1}$)		Lame érodée (mm)	
Décennie	1981-1991	1991-2001	1981-1991	1991-2001	1981-1991	1991-2001
$P \leq 10$	96,7	66,4	19,2	14,7	0,0320	0,0069
$10<P\leq20$	362,1	293,5	26,2	9,7	0,1877	0,0198
$20<P\leq30$	198,5	172,3	22,1	12,1	0,0733	0,0300
$P\geq30$	261,8	321,2	40,0	7,6	0,1223	0,0303

On constate que les valeurs de la deuxième décennie sont largement inférieures à celles de la première décennie, et ce, dans toutes les classes de hauteurs. La réponse de la parcelle aux fortes et très fortes pluies ruisselées (dernière ligne du tableau 2) est particulièrement significative. L'affaiblissement des taux de ruissellement et de l'érosion est encore plus explicite à l'échelle de l'averse ruisselée individuelle.

Averse	Pluie (mm)	I5'	LR (mm)	Érosivité ($kg.mm^{-1}$)
15/09/1985	41,9	60	7,4	95,4
15/05/1997	41,7	60	5,4	6,7
22/10/1984	25,6	64	7,0	37,6
13/09/2000	25,5	65	1,8	20,4

Le tableau ci dessus montre un net contraste dans l'évolution de ces taux, d'une décennie à l'autre, malgré les potentiels énergétiques similaires des pluies ruisselées.

Les résultats obtenus montrent que, malgré le caractère stable du potentiel de ruissellement, puisque les quantités de pluies ruisselées sont sensiblement identiques d'une décennie à l'autre, l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal a constitué un facteur décisif de régulation et de contrôle des flux. Ils montrent également que le retour à un état d'équilibre des milieux forestiers dégradés en domaine méditerranéen semi-aride peut être envisagé, à plus ou moins long terme, par le recours à une mise en défens stricte associée, selon les situations à de légers aménagements CES (cordons, seuils, etc.). Cet aménagement gagnerait en efficacité avec l'adoption d'une approche participative et intégrée. Toutefois, l'intérêt de ces résultats ne réside pas uniquement dans la faisabilité de cet aménagement mais également dans le fait qu'ils ont permis d'identifier et de mettre en évidence un seuil temporel d'efficacité de cette alternative, lequel seuil pourrait constituer une référence pour les zones ayant les mêmes problèmes et une variable importante pour optimiser la planification et les coûts des aménagements forestiers ou de CES.

3. LES RÉSULTATS DU SITE B

Ils ont permis de révéler que le système érosif qui s'active dans la zone de piémont s'organise en deux situations érosives : la situation érosive d'automne et la situation érosive de printemps.
La situation érosive d'automne est la plus dangereuse pour les sols. Elle intervient dans un contexte fortement marqué par la sécheresse estivale et la violence des pluies automnales qui arrivent sous forme d'averses orageuses à corps multiples et à fortes intensités. Elles sont à l'origine de plus de 50 % du ruissellement annuel. Elles entraînent la dégradation de la structure des sols, qui deviennent imperméables sous l'effet de la battance, et les préparent au décapage superficiel sous l'action d'un intense ruissellement.

La situation érosive de printemps est une situation complexe puisqu'elle englobe les mois du printemps et le mois de juin que nous pouvons considérer, pour les besoins de cette étude, comme un prolongement de cette saison. Cette situation associe donc les propriétés des pluies de printemps et ceux des pluies de début de l'été et développe, par conséquent, deux dynamiques de ruissellement. Au printemps, les pluies sont abondantes, de longue durée mais sans fortes intensités. Les sols préalablement imbibés par les pluies de l'hiver sont vite saturés en surface et permettent un important ruissellement de saturation. Au début de l'été, les pluies arrivent sous forme d'orages de courtes durées et de fortes intensités (80 $mm.h^{-1}$). L'horizon superficiel du sol s'imperméabilise rapidement sous l'effet de la battance et provoque un ruissellement de volume important avec possibilité d'entraînement latéral des particules.

La mise en évidence de ces deux situations érosives révèle l'intensité des flux énergétiques qui commandent l'activation des processus et qui maintiennent la zone de piémont sous l'emprise d'une dynamique érosive très active. Celle-ci se traduit par les faits suivants :

a. une érosion sélective très active qui entame le potentiel productif des sols. La composition des matériaux érodés révèle que les éléments fins (A + L + M.O.) sont les plus représentés.

Tab. 3. Comparaison des constituants du sol initial et de la terre érodée

Granulométrie (< 2mm)	Sol initial (%)		Sédiments, fosse (%)		Bilan	
	PNC	PC	PNC	PC	PNC	PC
Argile + limon	17,8	11,1	29,5	60,2	+	+
Sables fins	31	23,9	31,3	12,2	+	-
Sables grossiers	40	56,5	44,1	21,2	+	-
M.O. totale	3,5	2,4	4,0	4,7	+	+

Le tableau 3 ci-dessus compare la composition des matériaux érodés à celle du sol initial [0 – 10 cm] dans la petite parcelle non couverte (PNC) et dans la petite parcelle couverte (PC). Il montre une perte considérable en éléments fins et en matière organique. Ce processus agit par une dégradation systématique de la couche superficielle qui diminue d'épaisseur et disparaît insensiblement, pour aboutir à des profils aux aspects tronqués et nappés d'éléments grossiers et caillouteux en surface (partie amont et médiane) et à une accumulation des éléments fins en bas de pente ;

b. une érosion accélérée, qui s'exerce même sur des pentes faibles (5 %), surtout en présence de formations superficielles friables. Elle est favorisée par des types d'utilisation des sols inadaptés, ayant entraîné une modification des couverts végétaux et, par conséquent, une rupture des équilibres, laquelle rupture a conduit à une exagération des effets des flux énergétiques dont les résultats se sont traduits, sur le terrain, par une amplification du ruissellement et de l'érosion (tab. 4).

Tab. 4. Ruissellement et érosion dans les parcelles (couverte et non couverte)

	LRT (mm)	LRAM (mm)	KRAM (%)	Érosion (kg $ha^{-1}an^{-1}$)	Érosivité (Kg $mm^{-1}an^{-1}$)
PC (1)	494,2	26,0	20,7	384,0	2,4
PNC (2)	1 153,8	52,4	37,4	1 889,0	6,4
(2) – (1)	1 459,6	26,4	13,1	1 505,0	4,0

La dégradation du couvert végétal consécutive à la mise en culture des versants renforce la relation directe, de cause à effet, entre énergie pluviale et érosion, si bien que la même unité de l'indice d'agressivité [R] a pu occasionner une érosion moyenne de 0,4 t ha^{-1} an^{-1} dans la parcelle couverte et 2,0 t ha^{-1} an^{-1} dans la parcelle non couverte, soit une accélération de l'érosion qui correspondrait à un écart de 1 à 5.

CONCLUSION

La réaffectation non concertée et non rationnelle des terres dans la zone de piémont a entraîné une rupture des équilibres et a eu des impacts négatifs sur les sols, en permettant notamment à l'érosion diffuse en nappe de causer la perte de la fertilité des sols, laquelle perte a eu lieu en un temps relativement court, malgré la valeur modérée de la pente du versant. Ces résultats mettent à l'évidence le fait que l'utilisation de ces espaces doit être faite en tenant compte de la rareté des ressources et de la sensibilité des milieux à la dégradation. Ils mettent en évidence également la nécessité d'une recherche sérieuse de solutions adaptées aux problèmes de gestion durable de ces espaces caractéristiques des paysages de piémont, au sud de la dorsale tunisienne.

Références bibliographiques

HENTATI A, 1977. *Conditions d'équilibre et de déséquilibre des divers types de milieux dans le djebel Semmama et sur ses piémonts*. Thèse de 3° cycle, ULP-Strasbourg, France.

BEN CHAABANE H., HAMROUNI H., KHOUALDIA J., 2005. *Étude du ruissellement et de l'érosion hydrique en zone de versant et de piémont du jbal Semmama, Kasserine – Analyse des résultats, recommandations et perspectives expérimentales*. Direction des Ressources en Sols. ES 327, 70-74.

DELHOUME J.-P., 1981. *Études en milieu Méditerranéen semi-aride. Ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (djebel Semmama), Résultats de 1976 à 1981*, Direction des Sols, ES 224, 72 – 82.

LES TECHNIQUES DE GCES DANS UN SYSTÈME AGRO-SYLVO-PASTORAL DU PLATEAU CENTRAL DU MAROC

M. ADERGHAL*, A. WATFFEH, J. AL KARKOURI***, M. TAILASSAN**** et R. NAFAA*****

** Faculté des lettres et sciences humaines, université Mohammedia, Maroc ; m.aderghal@gmail.com*
*** Faculté des lettres et sciences humaines, université Rabat ; wattfeh@yahoo.fr*
**** Faculté des lettres et sciences humaines, université Kenitra, Maroc ; alkarkourij@hotmail.fr*
***** Faculté des lettres et sciences humaines, université Rabat ; Maroctaila.moh@caramail.com*
****** Faculté des lettres et sciences humaines, Mohammedia, Maroc ; nrachida2005@yahoo.fr*

Abstract

In Oulmes mountains, changes in land use from pastoralist systems based on common management into self-managed agro-pastoralist systems increased the pressure on lands characterised by narrowness, concentrated ownership and soil vulnerability. Antecolonial practices, like alternated grazing or fallow, that allowed to keep a grass cover able to protect the soils, as well as techniques introduced in the colonial period (1912-1956) and by the independent government departments (since 1956) have not been managed in a sustainable way. This situation is caused by nowadays society incapability to substitute to the last common organisations new organisational structures allowing nor individual integration neitheir system reproduction fitting in with both the new environmental context and new market requirements.

Keywords : *Morocco* ; *GCES* ; *Oulmes mountains* ; *Socio-Economic Factors*.

INTRODUCTION

Le massif d'Oulmes et ses bordures constituent une région où le passage d'un système pastoral fondé sur une gestion communautaire des espaces à un système agropastoral individualiste s'est accompagné d'une pression sur les terres favorables à l'agriculture, une pression qu'on ne peut pas expliquer par le seul facteur de l'exiguïté des terroirs due aux conditions topographiques et édaphiques optimales. Deux autres facteurs sont à prendre en compte : l'ouverture du marché foncier qui permet la concentration de la propriété et la dégradation des sols, qui soustrait, chaque année, des pans entiers de terres à la réserve foncière mobilisable pour la mise en valeur à des fins agricoles et/ou pastorales. Jusqu'à une date récente, on parlait rarement du plateau central quand il s'agissait d'érosion, encore moins quand on traitait des pratiques et des techniques traditionnelles de conservation des eaux et des sols. Or le problème de l'érosion est devenu manifeste et prend des formes alarmantes.

Au-delà des mesures qui seraient prises par les pouvoir publics pour corriger l'impact de l'érosion par des actions dirigées, l'on peut se demander si dans la société locale, qui hérite d'une culture plus pastorale qu'agricole, on peut aussi déceler des réponses à cette même situation par une tendance à l'adoption volontaire des techniques GCES et, dans le cas où ces techniques existent, chercher à savoir dans quelle mesure elles relèvent d'une ingéniosité relative aux paysans locaux ou d'un savoir-faire implanté par des groupes sociaux allogènes. Autrement dit, voir si l'adoption de ces techniques a été faite de manière consciente, pour répondre à un problème d'érosion des sols ou, si elle n'a été qu'une simple contingence due à des circonstances particulières à chaque exploitant.

1. LA DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

1.1. La méthode

Cette étude se veut exploratoire et s'inscrit dans une démarche géographique descriptive et explicative. Elle est basée sur une classification qualitative des techniques et des pratiques CES rencontrées. Tout en faisant la distinction entre les pratiques qui constituent des modes d'utilisation du sol à des fins pastorales ou agricoles et sont dans la culture même de l'agriculteur éleveur et les techniques qui se matérialisent souvent par des aménagements entrepris pour protéger le sol et/ou sauvegarder l'eau, souvent introduits par les forestiers. Aussi les techniques, plus que les pratiques, exigent-elles des savoir-faire que, peut être, les populations pastorales ne possèdent pas, mais qui ont été introduits, à des phases différentes de l'histoire locale, par des populations allogènes.

1.2. Les phases de l'étude

L'étude s'est déroulée en deux phases :

- une première phase au bureau a porté sur la préparation du travail de terrain par l'établissement des cartes de localisation des sites à visiter. À cette fin ont été utilisées les cartes topographiques (1/50 000) et les photographies aériennes (1/20 000, mission 1983) qui couvrent les communes d'Oulmes, Bouqachmir, Tiddas et Souk Sebt Ait Ikkou ;
- au cours de la deuxième phase, des sorties ont été organisées dans le massif d'Oulmes et ses bordures septentrionales, pour faire un relevé des pratiques et des techniques existantes dans des terroirs choisis pour leurs caractéristiques agropastorales. L'objectif est de faire la description de ces techniques et pratiques, de voir dans quelle mesure elles sont encore fonctionnelles et de procéder, par le moyen des entretiens, à une reconstitution de la biographie de l'éleveur agriculteur concerné et des modalités socio-environnementales et historiques qui ont favorisé l'adoption de ces techniques, leur développement ou leur dépérissement.

2. LES TECHNIQUES INVENTORIÉES

Les indices qu'offre le paysage agro-sylvo-pastoral ne permettent pas de parler d'une tradition agraire marquée par une gestion conservatoire des eaux et du sol. On peut admettre à la limite que, traditionnellement, l'alternance des parcours et la pratique de la jachère favorisaient le maintien d'une couverture herbeuse qui protégeait le sol, une pratique qui s'inscrivait dans une forme d'organisation communautaire de l'espace qui n'est plus appliquée.

Les pratiques GCES, comme elles se présentent actuellement, s'intègrent dans une gestion de l'espace marquée par l'intervention de l'Etat, l'action des collectivités locales et par les stratégies individuelles relatives à chaque chef d'exploitation.

Selon qu'il s'agit des pouvoirs publics ou des exploitants, la dégradation des terres et les réponses qu'il faut y apporter sont perçues différemment.

2.1. Les techniques introduites par l'État

Pour les pouvoirs publics l'érosion est perçue comme un phénomène qui compromet la productivité des terres agricoles et des parcours en montagne, et qui engendre un risque d'envasement des barrages à l'aval[1]. La réponse classique à cette situation a été matérialisée par une double intervention : celle des Eaux et Forêts qui ont une approche de l'érosion à l'échelle du bassin versant, et celle des services agricoles qui interviennent au niveau des exploitations.

À propos des actions menées dans la région d'Oulmes, deux périodes sont à distinguer.

2.1.1. Du protectorat à la fin des années soixante-dix

Au cours de cette première période, les Eaux et Forêts, dans le cadre de la DRS, procédèrent à des reboisements de protection et de production qui sont à l'origine des plantations de pins et d'eucalyptus, qui constituent autant de boisements artificiels sur le domaine public, sur les terres collectives et sur les terres *melk* (propriétés privées). En même temps, les efforts du CT (centre de travaux agricoles) s'orientèrent vers l'encouragement des plantations d'arbres fruitiers sur les terres privées les plus menacées ou vers l'intensification des systèmes de culture, par l'encouragement des labours mécaniques et l'introduction de nouvelles cultures et la réduction de la jachère.

Le bilan de ces premières expériences est difficile à faire, mais on peut se permettre de dire que cette expérience, même limitée sur le plan spatial et inadéquate sur le plan technique, a eu des résultats sur le plan paysager et au niveau de la protection de certains versants.

Dans le cas des plantations fruitières, le choix de l'amandier, comme arbre pouvant contribuer à la valorisation des terres en pente, s'inscrit dans une politique de développement de l'arboriculture menée par le CT, conformément aux directives retenues par le Code des investissements agricoles de 1969. Mais la réussite de

[1] Dans le cas du massif d'Oulmes, les barrages exposés à ce risque sont le barrage de Sidi Med ben Abdellah sur le Bouregreg et celui d'El Ganzra sur le Beht.

cette expérience fut compromise par la non-adhésion de la majorité des agriculteurs et le détournement par les plus nantis des subventions octroyées. Les plantations n'ont pas duré, car les arbres furent arrachés et souvent non remplacés.

2.1.2. Durant les trois dernières décennies

Une deuxième période, postérieure à 1980, est caractérisée par des actions programmées dans le cadre des projets de développement. Elles sont menées par les services techniques de l'Agriculture et/ou des Eaux et Forêts, et eurent pour objectif la lutte contre l'érosion. La restauration des terres et leur protection contre la dégradation étaient considérées comme un facteur essentiel qui permet l'amélioration des conditions de production et l'élévation du niveau de vie des populations.

Dans le cadre du PDI Oulmes Rommani, les 4 000 ha de reboisement de protection qui devaient être plantés dans l'ensemble de la zone du projet, pour limiter l'érosion des sols et reconstituer les forêts dégradées, n'ont pas concerné les communes d'Oulmes et Bouqachmir situées dans la région étudiée. C'est dans le cadre de la DRS fruitières que 200 ha d'oliviers, sur 2 000 ha prévus, ont été plantés dans la commune de Bouqachmir. La technique retenue est celle de la banquette, dont le suivi devait être assuré par une participation des populations, organisées en coopérative.

Le bilan de cette deuxième expérience n'a pas été totalement négatif, car, même si les populations voyaient dans l'arbre une entrave supplémentaire à la mobilité des troupeaux et ne se sont pas organisées dans des coopératives, les superficies plantées en oliviers dépassèrent les prévisions : 3 090 ha au lieu de 2 590 ha prévus par le projet dans les communes de Bouqachmir, Tiddas, Souk Sebt Ait Ikkou et Maaziz. Mais de l'avis même des experts du projet, le système des banquettes d'oliviers n'est pas la technique idéale dans une région agropastorale :

> « Ce système est actuellement la seule mesure de protection appliquée par le service des Eaux et Forêts sur les terres privées, même sur certains sites où des techniques bien moins onéreuses, pourraient être tout à fait efficaces. Au contraire, ce système implique un coût élevé et s'avère inefficace en l'absence d'une gestion adéquate et d'un entretien suffisant des banquettes et des plantations. […] De plus, ce système requiert la totale coopération du propriétaire et cela est difficile quand l'agriculteur ne peut pas se passer, même temporairement, de ses terres, qu'il utilise comme parcours ou qu'il cultive »[2].

D'autres techniques moins contraignantes pour le système troupeau-céréales ont été proposées et appliquées par endroit. Il s'agit de la construction de petites terrasses et de l'établissement de bandes non cultivées le long des courbes de niveau, souvent construites avec de la terre.

Le projet de mise en valeur bour (PMVB) a été lancé, entre 2000 et 2004, sur 18 023 ha, soit 65 % du territoire de la commune d'Oulmes. Les objectifs prioritaires retenus sont la conservation des sols sur les versants, le

[2] *Rapport d'évaluation*, annexe III. P. 11.

développement des productions végétales et animales et l'encadrement technique des agriculteurs.

Les trois sites, d'une superficie de 1 600 ha, identifiés pour être plantés en oliviers, s'inscrivent dans la lutte antiérosive par la fixation biologique à base d'arboriculture. Les travaux consistent en la confection d'*impluviums* sous forme de demi-lune de 2 m de diamètre, disposés en quinconce, avec un bourrelet stabilisé de 40 cm de hauteur.

On remarque que la technique retenue emboîte le pas à celles déjà pratiquée auparavant, car le constat fait par le projet DRI Forêt en 2003 souligne l'inefficacité des techniques adoptées jusqu'à présent, et indique que l'érosion hydrique doit justifier des travaux CES diversifiés du type biologique et mécanique, qui prennent en considération plusieurs paramètres édaphiques des lieux retenus pour être traités.

À travers cette rétrospective des expériences et des techniques CES réalisées ou projetées dans la région, on remarque qu'à chaque fois, il y a révision des démarches adoptées auparavant et qu'aucune coordination n'est établie entre les services des Eaux et Forêts et de l'Agriculture, quand les uns ou les autres sont chargés de la réalisation d'un projet. L'impact paysager de ces actions est certes réel, comme on peut le remarquer à travers les plantations fruitières ou les reboisements qui peuplent les versants des vallées et des vallons, mais c'est un impact qui continue à être ponctuel, compte tenu de l'importance des terres qui demandent à être traitées.

Mais il est certain que les actions entreprises dans le cadre des différents projets ont eu un effet d'entraînement sur d'autres espaces. Le PMVB, réservé à la seule commune d'Oulmes, a suscité des demandes pour sa généralisation, surtout dans le volet plantation des oliviers, de la part de plusieurs exploitants et élus locaux des communes limitrophes, Bouqachmir et Ait Ichou. Même si l'engouement pour les plantations d'oliviers est surtout déterminé par la recherche d'un gain de productivité, il n'en demeure pas moins que ces plantations constituent un vecteur de vulgarisation des techniques CES dans la région.

2.2. Les initiatives individuelles

Parmi les techniques de GCES biologiques et mécaniques relevées sur les terres de certaines exploitations, on peut citer les haies, les cordons et les murettes, les banquettes et les *impluviums*, en plus de l'adaptation de la morphologie parcellaire aux contraintes de l'érosion hydrique.

2.2.1. Les haies

Les haies vives permettent de délimiter des parcelles pour des raisons qui, peut-être, ne sont pas de CES, mais qui peuvent s'avérer efficaces, surtout quand les haies vives sont composées d'arbres fruitiers ou de cactus, car ce sont souvent des parcelles localisées près des lieux d'habitation situés à l'amont des versants concaves qui bordent des vallons évasés. Elles permettent de retenir le sol dont la capacité de rétention de l'eau augmente. Ces parcelles sont parfois irriguées de façon gravitaire, en utilisant de plus en plus des tuyaux rattachés à une source ou à un puits. Les lieux marqués par ces haies constituent des îlots de verdure assez

caractéristiques dans un environnement sylvopastoral. Mais l'efficacité, sur le plan de la CES, de la haie vive est ponctuelle, et se limite à la partie amont du versant. Plus en aval, les risques d'érosion par ruissellement se multiplient, car ces mêmes haies contribuent à l'accumulation des eaux et au renforcement de leur énergie destructrice.

Les haies mortes sont composées par des branches de jujubier épineux. Elles sont conçues pour délimiter les parcelles céréalières et empêcher la vaine pâture. Mais l'installation de ces haies sur des parcelles en pente peut permettre de limiter les quantités des terres qui quittent le champ, emportées par les eaux. Dans certaines situations, on assiste à la formation de petits talus en terre au niveau des haies situées à l'aval de la parcelle.

Les haies en épineux sont utilisées aussi pour confectionner des enclos pour parquer les animaux et collecter le fumier. Les enclos sont soit situés sur un versant pâturé, soit placés à l'intérieur même des parcelles cultivées.

De plus en plus, les haies vives sont remplacées par des clôtures. Elles sont composées de fil de fer et, parfois, doublé d'un rideau d'arbre (haies mixtes) ou sous forme de murs construits en pierres sèches.

2.2.2. Les cordons et les murettes

Ce sont là les formes d'une technique élaborée qui demandent un investissement humain important et qui répondent à des besoins en terres cultivables dans des situations particulières de pénurie d'eau ou du sol. La région d'Oulmes est relativement bien arrosée, mais elle n'est pas bien dotée en terres favorables à l'extension des cultures. Pourtant, ces techniques ne sont pas très connues, compte tenu du rôle secondaire que l'agriculture jouait dans l'économie de l'exploitation.

Les cordons

Le long d'un petit versant, des parcelles disposées en gradins sont séparées par de petits talus. Ces derniers sont, en fait, des cordons de pierres construits au fur et à mesure que l'exploitant avance dans l'épierrage de son champ. Ils sont l'œuvre du propriétaire qui, en plus d'être un agriculteur éleveur, est un artisan spécialisé dans le travail du bois et la réparation des fusils de chasse. Après des études universitaires non achevées et un bref séjour dans le Rif, il est retourné au pays pour s'occuper de l'exploitation familiale. C'est au cours de son expérience rifaine qu'il a été sensibilisé à la nécessité de sauvegarder le sol par ce type d'aménagement. Ces cordons mis en place ont été efficaces puisqu'ils ont permis, dit-il, « de retenir les sols et d'engraisser la parcelle ».

Les murettes

Nous avons relevé une situation qui correspond à un petit périmètre irrigué à partir de la source de Ain Lhammam, au sud de Tiddas. Les eaux sont captées au niveau de trois bassins aménagés dans les années trente et conduites vers les parcelles, situées sur les deux versants du vallon, par deux seguias prolongées par des tuyaux en plastique. Sur le versant de rive droite, les parcelles sont appuyées sur des murettes construites en pierres sèches de plus d'un demi-mètre de hauteur et dominées par une ligne d'arbres fruitiers : figuier, grenadiers. Sur le versant de

rive gauche, les parcelles étagées sont bordées par un talus sans mur de soutènement. Dans un premier temps, le terroir était tenu par les Ait Rbaa, groupe de familles originaires du sud du Maroc qui travaillaient comme tenanciers au quart, au profit des propriétaires Hakmaoui[3], originaires du douar Ait Mhmmed ou Haddou. C'est un terroir reconnu pour avoir été occupé avant les Ait Alla par des communautés Sehoul[4]. Actuellement, il est en partie abandonné et seules les parcelles du versant rive gauche continuent à être travaillées.

2.2.3. Les banquettes et les impluviums

Ils sont utilisés par les exploitants qui adhérent à une intervention de l'État dans le cadre de la DRS ou du PMVB. Ce sont des techniques qu'on retrouve aussi sur les terres de certains exploitants qui, de manière volontaire, ont choisi de transformer des terres de parcours ou à céréales en terres plantées. Il s'agit d'exploitants qui possèdent suffisamment de terres au niveau d'un même versant et qui disposent de moyens d'investissement.

Dans le cas du domaine moderne de la société Arbor à Oulmes, l'amont du versant de Tizin Lkenz, qui domine la ferme, était traité pour parer aux risques d'érosion hydrique par la plantation d'arbres et le captage des eaux de ruissellement au niveau de petits bassins situés plus en aval. Les premiers amandiers plantés du temps de la colonisation ont été remplacés par des jujubiers et noisetiers. Actuellement, cette partie amont du versant paraît nue, ce qui laisse supposer que la société a procédé à de nouveaux arrachages pour le rajeunissement des plantations[5].

Dans le terroir Al Ghaicha, situé sur les bordures du Bouregreg, au sud de Tiddas, des plantations d'oliviers et d'amandiers sont créées sur des banquettes confectionnées le long d'un versant. Elles sont l'œuvre d'un restaurateur citadin, héritier du chef d'exploitation décédé, et qui a pour projet de revenir, à l'âge de la retraite, s'installer sur les lieux. Les lignes des arbres plantés depuis trois ans sont séparées par des bandes de terres cultivées en céréales. L'état non raviné du versant concerné, comparé à d'autres versants situés dans le même secteur, laisse supposer que les plantations, même si elles ne sont pas bien réussies, limitent les risques de dégradation des terres.

2.2.4. Les parcelles curvilignes

Les divisions foncières reflètent non seulement les formes d'appropriation du sol mais également les contraintes techniques et de gestion des terres vouées à l'agriculture et/ou au parcours. La prédominance des parcelles en lanière est le résultat d'une dynamique conditionnée par les partages successoraux des biens familiaux. Ces partages tiennent compte de la répartition des sols le long d'un même versant et des pratiques de labour dans le sens de la pente qu'imposait la simplicité des moyens techniques utilisés, un procédé qui favorise l'érosion

---

[3] En référence à la tribu Béni Hkem appartenant aux Zemmour du sud, et dont Tiddas est le chef lieu de commune (province de Khémisset).

[4] La tribu des Shoul est actuellement localisée dans les environ de Rabat, entre la vallée du Bouregreg et la forêt de la Maamora.

[5] Il ne nous a pas été possible d'aborder le domaine de très près.

hydrique contre laquelle certains paysans luttent. Ces derniers remplacent les formes en lanière par un dispositif de parcelles qui épousent le sens des courbes de niveau et rendent facile le labour dans le sens contraire de la pente. Sur les versants, ces parcelles sont bordées par un ados en terre, parfois renforcé par un alignement de pierres, alors que sur les terrasses alluviales, une rangée d'arbustes marque la limite entre ces parcelles et la berge de l'oued.

3. DISCUSSION

3.1. À propos des pratiques

Il ressort de l'étude que les pratiques agropastorales les plus en rapport avec la GCES, celles qui favorisent la pousse de l'herbe et son maintien, comme l'utilisation alternée des parcours ou les jachères longues, sont encore appliquées par les exploitations qui continuent à pratiquer l'élevage extensif associé à la céréaliculture. Mais toutes les pratiques liées au système agropastoral constituent plus une routine héritée d'une structure d'organisation communautaire de l'espace qu'une stratégie mise en place de manière réfléchie dans le but de conserver l'eau et le sol, car on remarque que chez les mêmes paysans, les terres affectées par l'érosion sont abandonnées au lieu d'être travaillées selon les procédés de GCES connus et dont certaines sont déjà appliquées dans la région. Et même si les pratiques s'inscrivent dans la continuité de la tradition pastorale, leur dimension paysagère n'est pas évidente.

3.2. À propos des techniques CES

3.2.1. Le contexte de la genèse d'une dynamique érosive sélective

Le massif d'Oulmes est une région où on est passé, en l'espace de quelques décennies, d'un système agro-sylvo-pastoral fondé sur une utilisation complémentaire, dans le temps et dans l'espace, des ressources du milieu à un système composite caractérisé par l'existence de formes d'utilisation exclusivement agricoles des meilleures terres par des exploitants étrangers à cette région. De nouvelles cultures sont introduites et les itinéraires techniques sont devenus partiellement mécanisés. L'effet de la modernisation agricole sur l'état des sols peut être appréhendé à deux niveaux spatiaux :

- au niveau des domaines des grandes et moyennes exploitations modernes où l'effet n'est pas seulement de dégradation, car si les labours mécaniques catalysent certains phénomènes d'érosion, d'autres pratiques contribuent à sa sauvegarde ; c'est le cas notamment de l'arboriculture et la réduction de la jachère sur les terres céréalières ;
- au niveau des espaces situés à la périphérie de ces domaines où l'effet se fait sentir par une érosion plus spectaculaire. En effet, la pression sur les ressources naturelles dans les espaces marginaux s'est manifestée par une tendance à la mise en culture des terres en pente qui servait, autrefois, au parcours, et par un recours plus grand à la forêt pour l'alimentation du cheptel et pour l'approvisionnement des foyers en produit ligneux. Ainsi la mise à nu des versants s'est-elle conjuguée avec une

mauvaise adaptation des nouvelles techniques culturales sur les terres les plus vulnérables, pour aboutir à la formation d'un paysage agraire marqué par différentes formes d'érosion hydrique (érosion en nappe, ravinement…), entraînant la régression de la rentabilité de l'activité agricole et d'élevage exercées dans le cadre des exploitations familiales de différentes tailles.

3.2.2. L'adoption par les exploitants des techniques CES est une action qui reste individuelle

Les techniques CES biologiques et mécaniques sont adoptées par des exploitants qui n'ont pas tous le même profil. Elles demeurent encore à l'état embryonnaire et connaissent une distribution spatiale ponctuelle.

La réponse au phénomène de dégradation par l'adoption d'une technique CES existe, mais elle n'est pas généralisée. Elle est le résultat d'une décision que le chef d'exploitation prend selon une stratégie qui lui est propre. Aussi le laissez-aller qui caractérise certaines terres dégradées ne doit-il signifier, en aucun cas, une ignorance de la part des exploitants de ce qu'est la dégradation des terres, car si elle n'est pas perçue comme un risque environnemental, celle-ci est ressentie comme une menace sur la stabilité sociale de la famille et sur la durabilité des activités de production et, par-là, de la reproduction du système agropastoral de façon générale.

Dans les comportements des exploitants vis-à-vis des techniques de conservation, il existe, cependant, une opposition entre deux types extrêmes d'exploitants :

- les exploitants nantis, généralement des notables locaux, qui pratiquent encore le système de production traditionnel extensif (céréale, élevage) et qui ne cherchent pas à améliorer l'état des terres de leur exploitation, par ignorance et/ou par négligence, du moment qu'ils disposent de suffisamment de superficies pour se permettre le luxe de perdre quelques pans de terres affectés par l'érosion ;
- les exploitants les plus démunis, qui souffrent souvent du manque de moyens d'investissement pour pouvoir agir et sauver les quelques lopins de terre dont ils disposent.

Les tendances novatrices relevées dans le domaine de l'application des techniques de la CES sont donc spatialement limitées et se réduisent aux terres de quelques exploitants dont certains ont vécu hors de la région. Trois catégories d'exploitations sont identifiées :

- des exploitations familiales, de différentes tailles, qui se sont maintenues principalement par les revenus de l'activité agropastorale du chef et des autres membres ;
- des exploitations qui, après une phase de crise, connaissent un redressement grâce aux revenus migratoires ou à la pluriactivité d'un ou plusieurs membres de la famille. Dans certains cas, après le décès du chef, l'exploitation est reprise par un membre de la famille, généralement un fils, qui peut être un migrant ;

- les grands domaines qui appartiennent soit à des notables locaux, soit à des propriétaires d'origine citadine ayant acquis par achat des terres dans la région.

CONCLUSION

Les pratiques ou les techniques mises en place et qui ont une finalité CES constituent une dimension intrinsèque aux rapports que l'homme entretient avec son milieu de vie. Celles que nous venons de décrire à Oulmes ne sont pas toutes récentes. Certaines datent de la période pastorale précoloniale, d'autres sont apparues sous le Protectorat et dans le sillage des interventions de l'Etat indépendant, à travers les travaux de correction des effets de l'érosion ou les initiatives individuelles d'une nouvelle catégorie d'exploitants. Mais le perfectionnement des techniques ou leur tendance à la dégradation, en d'autres termes, les chances qu'elles ont pour être durables sont conditionnées par la façon dont elles sont prises en charge par la collectivité. Il ressort de l'approche rétrospective, dans laquelle nous avons cherché à inscrire la présente étude, que la pratique de la CES dans sa forme traditionnelle ou moderne n'a pas été caractérisée par une continuité dans le temps. Cette situation s'explique par l'incapacité de la société actuelle à substituer aux anciennes structures communautaires de nouveaux cadres d'organisation qui permettent soit l'intégration des individus aux nouveaux systèmes dominants, soit la reproduction des systèmes de production traditionnels dans une harmonie avec le nouveau contexte environnemental, d'une part, et avec les nouveaux impératifs du marché, d'autre part.

Références bibliographiques

ADERGHAL M., 1993. *Le massif d'Oulmes et ses bordures, évolution agraire et organisation de l'espace dans le pays Zaian-Zemmour (Maroc du Nord-Ouest)*. Thèse de doctorat, Géographie, Montpellier, 799 pp.

AL KARKOURI J., WATFEH A., ADERGHAL M., 2002. Techniques de conservation de l'eau et des sols dans une zone semi-aride méditerranéenne du Rif central (vallée des Béni Boufrah), *Bull. Réseau Erosion* IRD 21 : 56 – 80.

BANQUE MONDIALE, 1982. *Rapport d'évaluation. Projet de développement agricole d'Oulmes Rommani*. Département des projets, Rapport n° 4065 MOR. 12 annexes.

ROOSE E., 2000. Évolution des stratégies de lutte antiérosive ; vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, in : Sabir M., Merzouk A., Roose E., Laouina A. (édit.), *Les stratégies et méthodes traditionnelles et modernes de lutte antiérosive*, ENFI, Rabat, 72-93.

LAOUINA A., COELHO C., RITSEMA C., CHAKER M, NAFAA R., FENJIRO I., ANTARI M., FERREIRA A., VAN DIJCK S., 2004. Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global dans le bassin du Bouregreg (Maroc), *Sécheresse*, 15, 1 : 65-77.

GESTION CONSERVATOIRE DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DE BENI BOUFRAH (RIF CENTRAL, MAROC)

J. AL KARKOURI*, A. LAOUINA, A. WATFEH***et M. ADERGHAL******

** Faculté des lettres et sciences humaines, Kénitra ; alkarkourij@yahoo.fr*
*** Faculté des lettres et sciences humaines, Rabat ; laouina@menara.ma*
**** Faculté des lettres et sciences humaines, Rabat ; watfeh@yahoo.fr*
***** Faculté des lettres et sciences humaines, Mohammedia ; mohamed.aderghal@caramail.com*

Abstract

The rural life in the area of the Beni Boufrah catchment is confronted with a difficult environment. In response to this situation the population developed a general-purpose system based on the use of the forest, cereals cropping, arboriculture and breeding. In parallel, a great number of practices and techniques of conservation of the natural resources were adopted. Nowadays, the maintenance of these structures is threatened by the tendency of the population to emigrate.

Keywords : *Morocco* ; *GCES* ; *Cultural Techniques* ; *Stone Walls* ; *Stone Bunds* ; *Cistern*.

INTRODUCTION

La vie rurale dans le bassin versant de Beni Boufrah a toujours été affectée par de lourdes contraintes, des terres cultivables limitées[1], des réserves hydriques très maigres et un climat semi-aride, caractérisé par des sécheresses récurrentes et, parfois, par des excès d'humidité. En réponse à cette situation, les populations de Beni Boufrah, à l'image d'autres parties de la chaîne rifaine, ont développé depuis longtemps un système de production polyvalent basé, d'une part, sur la diversification des ressources et des produits, cultures céréalières, arboriculture, élevage et utilisation de la forêt et, d'autre part, sur la complémentarité des terroirs variés, *demna* (champs situés autour des maisons), zone irriguée et zone de culture sèche.

En relation avec l'appropriation des terres, les paysans ont conçu une grande variété de pratiques et techniques de conservation et de gestion des sols et des eaux : le partage de la terre dans le sens des courbes de niveau, le marquage des

[1] 10 % seulement des terres se prêtent à la mise en valeur sans mesures de protection ou de conservation.

parcelles, la jachère labourée, l'épierrage, la fertilisation et l'assolement en rotation. Quant aux ouvrages de conservation, les plus utilisés d'entre eux sont les cordons de pierres, les terrasses et les rideaux de roseaux ou d'arbres.

Parallèlement à ces pratiques et techniques traditionnelles de conservation des sols, le paysan a développé des techniques de stockage et de gestion de l'eau, ressource assez rare dans la région. Ces techniques sont soit de simples mares (*madjen*) collectant les eaux de ruissellement de versant, soit des citernes d'eau potable utilisant le toit des maisons comme *impluvium*, soit enfin des citernes (*matfia*) collectives, vers lesquelles on achemine l'eau collectée à partir des pistes ou de surfaces aménagées pour cette fin. En outre, les paysans ont aussi développé des pratiques remarquables de gestion de l'eau d'irrigation.

Devant la tournure de plus en plus grave de la dynamique érosive, l'Etat a entrepris plusieurs interventions de conservation suite aux recommandations du projet DERRO (Développement économique et rural du rif occidental), initié en 1960 et qui visait la lutte contre l'érosion, l'élévation du niveau de vie et la réduction de la migration intérieure. C'est ainsi que de nouvelles techniques, en particulier, la banquette, ont été introduites dans la région. Dans le même cadre, d'autres techniques existantes ont été améliorées, comme les cordons de pierres et les seuils sur les ravines.

1. PRATIQUES DE CONSERVATION ET DE GESTION DES SOLS

Issus de plusieurs vagues d'immigration, les habitants de Beni Boufrah, une fois installés, se sont organisés en douars et ont pratiqué un système de production qui subdivise le terroir villageois en trois espaces : le parcours, les terres irrigués et les terres bour. Au début, seuls les terrains autour des villages *demna* étaient pleinement appropriés, mais la pression démographique et le besoin de terres de culture ont poussé les habitants à défricher davantage de forêts et ont ainsi conquis des terrains de plus en plus accidentés et de plus en plus éloignés des villages. Ces évolutions ont été accompagnées par le développement d'une panoplie de pratiques sociales et culturales dont le but est de mieux gérer et conserver les sols, support indispensable pour la survie des habitants.

1.1. Pratiques sociales

Parmi les pratiques sociales qui ont une forte implication en matière de conservation des sols, on distingue la délimitation des parcelles dans le sens des courbes de niveau et le marquage des parcelles.

1.1.1. Délimitation des parcelles

Quand le terrain est plat, la délimitation des parcelles à Beni Boufrah se fait à l'aide de haies de végétation spontanée ou de petites levées de terre. Sur les versants, la limite est souvent matérialisée par une petite rupture de pente provoquée par les paysans entre deux parcelles (*agdim*). Ce talus est taillé dans les formations superficielles, le sol ou dans la roche en place schisteuse ou marneuse. Plusieurs types de talus sont rencontrés dans la région : des talus simples, enherbés ou renforcés avec des pierres.

1.1.2. Marquage des parcelles

Il est une habitude courante chez les habitants de Beni Boufrah de marquer leurs parcelles en signe d'interdiction de piétinement ou de pacage des troupeaux, notamment après les récoltes. Le marquage utilise de grosses pierres blanchies au lait de chaux et posées à des distances variables autour et à l'intérieur de la parcelle. Un autre type de marquage aussi courant dans la région consiste à planter la totalité de la parcelle par les figuiers de barbarie lorsque le propriétaire est absent ou ne peut plus travailler sa terre, devenue trop dégradée.

1.2. Pratiques culturales

Á coté des pratiques sociales, le paysan rifain a développé des pratiques culturales comme l'épierrage, la jachère, la fertilisation et la rotation.

1.2.1. L'épierrage

À Beni Boufrah, la majorité des terrains est couverte sur plus de 10 % de leur superficie de fragments de roches. Cette situation oblige le paysan à procéder, à l'occasion de chaque labour, à l'épierrage de sa parcelle. C'est un travail d'entretien essentiellement, car seules les grosses pierres sont ramassées, les plus petites ne gênent pas le travail de la terre.

1.2.2. La jachère

Depuis la disparition du système de culture itinérante, les paysans ont été confrontés au problème du « vieillissement » de la terre, selon l'expression utilisée par les *fellahs*. Pour pallier cette situation, ceux-ci étaient obligés d'adapter des formes d'utilisation permettant à la terre de se reposer, même pour une année ou deux, tout en la labourant, pour permettre l'évolution de la matière organique. Ce système qui était pratique courante dans le bassin versant n'a pas tardé à connaître des transformations sous l'emprise du croît démographique. Ainsi dans l'impossibilité d'étendre les superficies cultivées, le *fellah* a été amené à réduire continuellement la durée de la jachère. Cette tendance s'est affirmée progressivement pour aboutir actuellement au stade de la suppression de cette forme de repos de la terre dans une bonne partie des terroirs du bassin versant.

1.2.3. Rotation et assolement

Dans un souci d'augmenter le rendement par une meilleure gestion du sol, le paysan a appris au fil du temps la pratique des assolements qu'il utilise selon des combinaisons variées dépendant de facteurs multiples, tels les types de cultures, l'intensité des fumures, la distance de la parcelle à la maison, la valeur agronomique des sols et bien d'autres facteurs à caractère aléatoire. Le système le plus répandu dans la région fait tourner l'orge et le blé soit à l'intérieur de la même parcelle, soit de parcelle en parcelle, interrompu de légumineuses généralement sans jachère ; c'est le cas surtout des zones *demna* proches de l'habitat.

1.2.4. Fertilisation

La plus grande partie des terres cultivées manque de matière organique. Pour dépasser cette contrainte, le paysan a dû pratiquer depuis longtemps la fertilisation pour améliorer le rendement de ses parcelles. La bonification des terres se fait

sous forme de fumier ou, plus récemment, d'engrais minéral. Sa fréquence est variable : elle se fait une fois par an ou une fois tous les trois ans ou encore une fois tous les cinq ans (Pascon 1983).

2. TECHNIQUES DE CONSERVATION DES SOLS

2.1. Techniques locales

Parallèlement aux pratiques sociales et culturales, le paysan a confectionné des techniques utilisant des matériaux puisés localement afin de lutter contre l'érosion des sols.

2.1.1. Les cordons de pierres

En relation avec leur abondance dans le paysage, le paysan a depuis longtemps fait usage des pierres à des fins multiples, notamment dans le domaine de conservation des eaux et des sols. Plusieurs structures ont ainsi fait leur apparition sur les versants de la vallée. Parmi elles, les cordons sont de loin les plus utilisés. Selon la taille de cette structure, le paysan fait la distinction entre le petit cordon qu'il appelle *aghbar*[2] et le grand cordon qu'il appelle *srima*, celui-ci étant une forme plus évoluée du petit cordon.

2.1.2. Les terrasses

Cette technique très ancienne est omniprésente dans la région. Elle marque visiblement le paysage par les discontinuités qu'elle créé dans la topographie. Selon le mode de construction, la forme et la taille de l'ouvrage, son utilisation et surtout sa position dans l'espace, trois types de terrasses peuvent être distingués : les terrasses encadrant le cours d'eau principal, les terrasses situées à l'amont du bassin versant et qui profitent des multiples sources dispersées un peu partout dans la zone méridionale de la région et les terrasses des *demna* qui profitent d'un traitement particulier en relation avec leur proximité des habitations.

2.1.3. Rideaux de roseaux et d'arbres

C'est la plus ancienne technique de lutte contre les inondations dans la région. Elle consiste à planter la limite extérieure des parcelles se trouvant dans le fond des vallées ou la limite des basses terrasses menacées d'être inondées par un rideau très dense de roseaux. Ces derniers développent un système radiculaire très robuste, qui permet aux sols des précieuses parcelles irriguées de résister à l'inondation.

2.1.4. Traitements des ravins

Dans la vallée de Beni Boufrah, l'érosion linéaire est limitée dans l'espace. Le ravinement ne concerne que 5 % de la superficie totale de la vallée et se rencontre un peu partout dans la région bien qu'il soit plus fréquent dans la partie centrale. Soucieux du danger que présente cette forme d'érosion pour sa parcelle, qui est souvent exiguë, le paysan a depuis toujours lutté contre ce phénomène par des

[2] C'est la plus courante technique de conservation qu'on peut rencontrer à Beni Boufrah.

opérations de comblements et/ou par des traitements spécifiques. Les techniques utilisées sont en fait très variées, elles peuvent être regroupées en quatre types essentiels : le comblement progressif par des végétaux, de la terre et des pierres, la stabilisation par de la végétation naturelle renforcée par des plantations, la stabilisation par comblement et plantation de l'amandier, l'aménagement de seuils composés de pierres et fascines.

2.2. Techniques introduites

La tournure spectaculaire de l'érosion dans la vallée de Beni Boufrah n'a pas échappé aux autorités tant espagnoles que marocaines. Mais il a fallu attendre les années soixante pour voir se développer enfin des interventions qui visent la lutte contre l'érosion. Certaines de ces actions faisaient partie du projet DERRO, qui porta beaucoup d'intérêt aux problèmes de la dégradation. C'est dans ce cadre qu'une nouvelle technique, en l'occurrence la banquette, a été introduite dans le bassin versant, alors que des améliorations ont été apportées à des techniques déjà existantes, à savoir les cordons de pierres et les barrages fractionnés.

2.2.1. La banquette

L'entreprise la plus spectaculaire de l'administration marocaine dans le domaine de la lutte contre l'érosion est la banquette, une petite terrasse qui déchire le versant horizontalement à des distances régulières de 15 m ou de 20 m. Elle a pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et de les empêcher d'éroder. À Beni Boufrah, des centaines d'hectares ont été traités par cette technique, accompagnée principalement de reboisements fruitiers et parfois forestiers.

2.2.2. Cordons, type DERRO

Parmi les actions entreprises par le DERRO, l'on note l'amélioration de certaines techniques existantes. C'est le cas des cordons de pierres qui ont été construits sur de nouvelles bases utilisant la géométrie. En effet, ce type de cordons diffère du traditionnel par le fait qu'il nécessite un travail préalable de nivellement de la bande sur laquelle l'ouvrage sera construit. La forme transversale des deux côtés du cordon est verticale et le toit est plat. Quant à la forme longitudinale, elle est rectiligne et perpendiculaire à la pente. Leur hauteur est la même que celles des cordons traditionnels alors que leur longueur peut atteindre jusqu'à 50 m.

2.2.3. Barrages fractionnés

Pour lutter contre le ravinement, l'administration marocaine, par le biais des organes du DERRO, a procédé à la construction de barrages fractionnés, qui semblent, en fait, être une amélioration des barrages en pierres et fascines utilisés traditionnellement par les habitants. Mais les efforts de l'Etat, dans bien des cas, n'ont pas été payants et ont aggravé la situation dans certains secteurs. En plus, les actions entreprises n'ont pas été favorablement accueillies par les habitants, surtout qu'elles les privent d'une partie de leur terrain (5 % à 15 % dans le cas de la banquette).

3. TECHNIQUES DE STOCKAGE ET DE GESTION DE L'EAU

En relation avec la faible pluviosité et les faibles réserves hydriques naturelles du sol, le paysan a développé plusieurs techniques de stockage et de gestion de l'eau.

3.1. Les citernes d'eau potable

C'est une des plus anciennes techniques utilisées dans la région. Elle consiste à collecter l'eau qui ruisselle sur le toit et à l'acheminer vers une citerne. Celle ci prend la forme d'un réservoir souterrain (*matfia*) creusé dans la cour de la maison, imperméabilisé avec de l'argile battue ou avec du ciment. L'eau collectée dans les citernes (50 m^3 à 100 m^3) ne suffit généralement pas aux divers besoins de la famille mais réduit considérablement la corvée d'eau.

3.2. Mares collectant les eaux de ruissellement

Il s'agit d'une technique très ancienne qui était très utilisée dans les aires collectives de pâturage et qu'on trouve actuellement encore soit à côté des maisons, soit au voisinage des sentiers. Les mares servent principalement à abreuver le troupeau. Elles sont alimentées localement par des canaux creusés à la base des versants peu filtrants. Sans entretien, ces canaux évoluent en ravins.

3.3. Citernes collectives (*matfias*)

C'est une technique plus évoluée qui demande un investissement important et qui ne peut être réalisée que dans le cadre d'une entraide sociale ou avec l'aide de l'Etat. Elle est fondée sur la collecte des eaux de pluies et de ruissellement. Le dispositif est composé d'une citerne (réservoir souterrain), d'un *impluvium* (bassin construit, de forme carré ou rectangulaire (100 m^2 à 150 m^2 de superficie), délimité par une murette de 50 cm de hauteur (faite de pierres et de ciment) et de seguias. La citerne reçoit l'eau à partir d'une ouverture située à l'intérieur de l'*impluvium*, dont le fond est cimenté.

3.4. Gestion collective des eaux des sources

En relation avec les sources plus fréquentes dans la zone méridionale, plusieurs petits périmètres d'irrigation ont été aménagés en terrasses (*hammalat*) au bas des versants lorsque le débit d'eau est suffisamment fourni. Il s'agit d'une forme collective d'irrigation gérée par des formes de distribution très complexes et souvent anciennes (Pascon, 1983). La distribution la plus courante de la terre et de l'eau est faite selon les lignages. Les fils héritent leur droit de l'ancêtre disparu. L'irrigation se fait généralement suivant le tour de rôle (*nouba*). À partir de la source, les eaux sont conduites dans une seguia très étroite construite en terre battue ou dans des tuyaux en plastique quand le débit n'est pas important. L'eau est rassemblée dans des bassins construits en terre mais refaits actuellement en ciment. Ces ouvrages ont une capacité de stockage modeste (10 m^3 à 30 m^3 en moyenne).

CONCLUSION

Les pratiques et techniques de gestion des eaux et des sols dans le bassin versant de Beni Boufrah sont le fruit d'une longue évolution du système de production d'une population paysanne qui a été confrontée, dès son installation, aux contraintes d'un milieu difficile. Pour survivre et nourrir une population de plus en plus nombreuse, les habitants ont été amenés à produire des formes d'adaptation au milieu. C'est ainsi que, petit à petit, un grand nombre de pratiques et techniques de gestion et de conservation des ressources naturelles a vu le jour. Avec le temps, des améliorations ont été apportées à ces structures, en fonction des conditions socio-économiques. Ceci n'a malheureusement pas empêché l'érosion hydrique de se développer, même si elle est beaucoup moins active dans les zones aménagées et bien entretenues. Actuellement, la pérennité de ces structures est menacée par la tendance des habitants à émigrer vers d'autres contrées plus clémentes. Le dernier recensement national de 2004 fait ressortir une forte émigration de la population vers les villes du Nord-Ouest ou vers l'Europe. Cette situation pose le problème de la durabilité de ces pratiques et techniques.

Références bibliographiques

AL KARKOURI J., 2003. *Dégradation du milieu naturel dans le bassin versant de Béni Boufrah (Rif central -Maroc): analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et de modélisation spatiale*. Thèse de doctorat d'État. Université Mohamed V. Rabat, 392 pp.

EL ABBASSI H., 1999. *Les campagnes du Rif oriental marocain. Géomorphologie, érosion du sol et occupation humaine.* Thèse doctorat d'état. El Jadida. 393 pp.

HEUSCH B., 1986. Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol*. 22 : 153 – 162.

LAOUINA A., NAFAÂ R., COELHO C., CHAKER M., CAVALHO C., BOULET A.-K., FERREIRA A., 2000. Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kébir, Maroc. *Bull. Réseau Erosion* 20 : 256-274.

PASCON P., VAN DER WUSTEN H., 1983. *Les Béni Boufrah, essai d'écologie sociale d'une vallée rifaine (Maroc).* Rabat. IURS, 297 pp.

ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO.* n° 70, 420 pp.

ROOSE E., SABIR M., DE NONI G., 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull. Réseau Erosion* IRD 21 : 524 pp.

SABIR M., MERZOUK A., ROOSE E., LAOUINA A. (édit.). 2000. *Les stratégies et méthodes traditionnelles et modernes de lutte antiérosive***.** École nationale forestière d'ingénieurs, Salé, 502 pp.

TECHNIQUES DE GCES DANS LE MASSIF DE BOUKHOUALI ET SON PIÉMONT STEPPIQUE, MAROC ORIENTAL

Miloud CHAKER* et Abdellah LAOUINA**
Département de géographie, FLSH, Rabat
** mchaker2@caramail.com-*
*** laouina@menara.ma*

Abstract

The Boukhouali mountain and its piedmont in Eastern Morocco constitute a nice example which illustrates the total opposition between the mountain, an old area of occupation and adaptation to the environment dynamics, and the plain where human occupation occurred during the XXth century only. In the later, SWC did not have the possibility to evolve as it did in the context of the old agrarian civilisations of the mountains. Today, it's difficult to predict the future of the SWC traditional techniques, because the social conditions for their reproduction are no more present.

Keywords : *Oriental Morocco* ; *GCES* ; *Cultural Practices* ; *Mountains* ; *Foothills*.

INTRODUCTION

La région étudiée fait partie de la chaîne des Horsts, située dans le Nord-Est du Maroc oriental. Portée à une altitude de 1700 m, la montagne de Boukhouali se caractérise par la disposition du relief en gradins, dominant des plaines et plateaux steppiques. Ainsi, la pluviosité passe rapidement d'une moyenne de 465 mm sur les sommets, à 250 mm dans la plaine à tendance aride d'El Aïoun (Chaker, 1998 ; Laouina et Chaker, 1977).

La montagne a connu une ancienne occupation humaine, accompagnée d'une mise en valeur agricole soignée (Chaker *et al.*, 1996). Le piémont steppique a connu une sédentarisation précoce, accompagnée d'un timide transfert du savoir-faire traditionnel montagnard. Par contre, les plaines et plateaux steppiques, longtemps restés des terroirs de parcours extensifs, n'ont été que tardivement colonisés au XXe siècle.

Il serait donc important de savoir comment les populations locales se sont adaptées à la spécificité des milieux et à leur fragilité, en développant des pratiques et des techniques de conservation des eaux et des sols, et quel est l'impact du paquet technologique introduit plus ou moins récemment dans ces milieux (El Amami 1983, Roose 1994).

1. AGRESSIVITE CLIMATIQUE ET RÉPONSES HYDROLOGIQUES

Le massif montagnard est soumis à un climat typiquement méditerranéen, tout en subissant périodiquement des influences présahariennes. La pluviosité moyenne annuelle est de 465 mm, mais les écarts annuels extrêmes ont varié entre 829 mm et 183 mm durant la période comprise entre 1952 et 1978 (Laouina et Chaker, 1998a et 1998b).

Les mesures effectuées au pluviographe montrent que 28 % des événements pluviométriques sont inférieurs à 5 mm et 40 % des pluies n'arrivent pas à initier de ruissellement. 10 % des pluies ont une intensité supérieure à 8 mm/30 mn, et 20 % des chutes pluviométriques sont responsables de 80 % des sédiments érodés au niveau des parcelles expérimentales. Les événements érosifs se localisent particulièrement en été et au début de l'automne, coïncidant avec un sol dénudé. Ainsi, à l'échelle de la parcelle expérimentale, le couvert végétal permanent, dépassant le seuil de 30 % de recouvrement du sol, réduit sensiblement la dégradation des sols en comparaison avec des parcelles défrichées et mises en cultures.

2. LES TECHNIQUES DE GCES DANS LA MONTAGNE DE BOUKHOUALI

Les techniques de GCES sont à la fois biologiques et mécaniques : les ouvrages les plus consistants et les plus répandus sont construits en pierres sèches mais renforcés, dans la plupart des cas, par des plantations en rideaux le long des murettes. Parfois, les paysans utilisent des haies vives multifonctionnelles et d'autres en branches mortes, juste pour empêcher la pénétration des animaux dans la parcelle encerclée.

La hauteur des murettes est déterminée par les conditions locales du milieu à aménager, à savoir le degré de pente, la disponibilité des matériaux de construction et le type d'utilisation agricole envisagée. Dans le secteur irrigué, les ouvrages peuvent dépasser 2 m de hauteur pour permettre l'horizontalité de la parcelle (photo 1).

La longueur des murettes est déterminée par la structure foncière puisque le morcellement permet que rarement la continuité des ouvrages. La base des murettes est souvent épaisse, construite par des blocs métriques pour mieux résister et permettre l'évacuation de l'eau en excès derrière l'ouvrage (photo 2).

Photo 1. Murette permettant l'irrigation par gravité de la parcelle aménagée

Photo 2. Blocs métriques à la base de la murette, permettant sa stabilité et l'évacuation des eaux en excès

Ces ouvrages peuvent rapidement lâcher dans le cas où les eaux en excès ne seraient pas évacuées ; ainsi les sols peuvent être engorgés.

Dans les champs aux pentes de l'ordre de 10 %, les espacements des murettes sont de 20 m à 30 m et sur les pentes fortes, les ouvrages se présentent sous forme d'escaliers, dont la hauteur peut parfois dépasser la largeur de la parcelle aménagée (cas de la parcelle en photo 2).

La nature et la disponibilité des matériaux de construction influencent la hauteur, l'étendue et l'entretien des ouvrages. Là où les affleurements rocheux font défaut, les aménagements effectués sont souvent sous forme de simples bourrelets en terre ou de terrasses taillées, difficiles à rehausser, à stabiliser et à entretenir. Ainsi, la parcelle aménagée n'arrive jamais au stade de nivellement et les eaux et les sols débordent alors sur les ouvrages suite à l'érosion, partiellement aratoire.

La plupart des ouvrages ont été construits progressivement, puisque, chaque année, il est nécessaire de rehausser l'ouvrage pour éviter le débordement du sol qui ne cesse d'être mobilisé par divers processus dans le sens de la pente. Ainsi, il est difficile d'évaluer le travail fourni pour mettre en place un tel ouvrage. Actuellement, dans un site où des affleurements rocheux sont disponibles, un seul ouvrier peut construire autour de 1 m^2 de murette par jour. Ainsi, pour aménager un hectare sur un terrain d'une pente de l'ordre de 10 %, il faut un minimum de 750 hommes/jour. Bien que les techniques traditionnelles de CES pratiquées dans la région soient, en principe, coûteuses, en terme de temps de travail, elles sont constamment entretenues et élargies. Jamais ces ouvrages n'auraient été réalisés si les paysans avaient essayé de comptabiliser les efforts investis.

Cependant, aucun changement ou tendance d'évolution particulière ne peut être dégagée d'une façon claire et définitive. Certains aménagements continuent à être entretenus, même si, juste à côté, on peut en trouver d'autres qui ne le sont pas, pour des raisons particulières et qui ne sont pas un indicateur d'une tendance générale vers la dégradation (photo 3).

Photo 3. Juxtaposition de l'entretien et l'abandon des ouvrages de GCES

S'il y a irrigation, les parcelles aménagées permettent au moins deux cultures par an, souvent intercalées et intensives, alors que les parcelles mises en culture pluviale sont peu productives et, par conséquent, moins entretenues. La généralisation des aménagements n'était pas possible, car elle suppose que le bétail et principalement les caprins soient écartés des zones à murettes ; or, l'élevage reste l'activité principale des populations.

Le concept de conservation de l'eau et du sol est encore mal assimilé par les paysans même si les techniques de GCES sont largement pratiquées. En effet, chez un même paysan et sur un même versant, nous pouvons assister à des pratiques contradictoires : conservation à l'aval et dégradation à l'amont. Les paysans sont conscients de l'intérêt du sol épais accumulé derrière l'ouvrage et qui est utilisé par des cultures annuelles sur toute la parcelle et par la plantation des arbres sur les rebords où les accumulations sont encore plus épaisses. Ces techniques permettent donc la pratique des cultures intenses et intercalées. Cependant, il semble que d'autres effets positifs ne sont pas perçus par ces mêmes paysans — cas de la recharge de la nappe phréatique et de l'augmentation des débits des sources — et, par conséquent, leur impact sur l'irrigation.

En somme, il faut reconnaître l'effort créatif et le savoir-faire des paysans qui ont pu s'adapter à des conditions locales très difficiles et diversifiées. L'explosion démographique a certes obligé les paysans à aménager les terres marginales accidentées et pratiquement abandonnées dans le passé ; le besoin est à la base de l'apparition de ces ouvrages impressionnants.

En appui aux techniques de GCES, le revêtement partiel en ciment des canaux d'irrigation a contribué à réduire les pertes des eaux et donc offert la possibilité d'étendre l'espace irrigable et conduit à l'aménagement de nouvelles parcelles, où les techniques de GCES n'existaient pas auparavant.

Dans les parcelles irriguées, l'entretien est la règle. Par contre, dans les champs de cultures pluviales, les murettes et cordons de pierres sont localement très dégradés et abandonnés au parcours.

3. LES TECHNIQUES DE GCES DANS LA STEPPE

Mis à part les points d'eau, les milieux steppiques n'ont été que tardivement colonisés et mis en culture. La gestion des terres se caractérise par la mise en culture des dépressions et bas-fonds constituants des réceptacles pour les sédiments et les eaux de ruissellement provenant des versants environnants. Ainsi, les cultivateurs assurent un bon rendement, même si le volume pluviométrique annuel est irrégulier. Les terres marginales, portant un couvert végétal permanent, sont réservées à l'élevage extensif.

Jadis, le labour par des moyens traditionnels s'étalait sur une longue période, ce qui permettait aux paysans de surmonter le risque de la coïncidence des semences avec une mauvaise répartition pluviale. Par contre, actuellement, le labour mécanisé s'effectue rapidement à l'occasion du premier événement pluviométrique ; la pratique du *mazouzi*, qui est une culture hivernale, tardive, à l'inverse du *bekri*, disparaît ; ainsi, le risque d'une mauvaise récolte n'est plus contourné.

Le labour traditionnel se faisait dans le sens des courbes de niveau, ce qui réduit le ruissellement et les pertes en sol. Actuellement, étant donné la morphologie allongée des parcelles, le labour mécanisé se fait dans le sens de la plus forte pente. Parmi les conséquences de la mécanisation du labour, on peut noter la disparition de la jachère et l'extension de la mise en culture sur des terres marginales vouées en principe aux parcours.

Ainsi, l'extension des cultures pluviales sur les terrains de parcours provoque des ruissellements excessifs et agressifs, même sur les fonds des dépressions constituant des réceptacles recevant les eaux et matériaux livrés par les versants environnants. Actuellement, suite aux défrichements et la mise en culture sèche sur ces versants, les réponses hydrologiques deviennent plus agressives, d'où le ravinement et l'évacuation des sols et du stock sédimentaire accumulés dans les dépressions par des crues fortes (photo 4).

Photo 4. Érosion actuelle dans les matériaux stockés dans les bas fonds

Pour réduire l'évolution des griffes et ravines qui apparaissent dans les champs, les paysans construisent, timidement, des cordons en pierres sèches, comparables à ceux développés jadis en montagne (photo 5).

Parmi les techniques récentes pratiquées en plaine, l'épierrage mécanisé consiste dans un labour profond par chisel, provoquant le soulèvement des blocs de croûte calcaire parfois métriques. Cette pratique est souvent effectuée avec l'aide de l'État.

Deux aspects négatifs sont soulevés par les paysans :

- le labour profond perturbe la fertilité du sol par l'enfouissement des éléments organiques et minéraux de surface ;
- le soulèvement des blocs métriques pose le problème du stockage des pierres soulevées ; ainsi presque 20 % de la superficie des champs aménagés servent pour le stockage des pierres (photo 6).

L'État intervient par le biais des projets de développement intégré ; parmi les actions importantes : l'aménagement des parcours par la pratique de la mise en défens subventionnée et l'amélioration du potentiel fourrager par l'introduction des arbustes fourragers en bandes dans les champs céréaliers.

Ainsi, le milieu steppique a connu trois pratiques modernes de GCES, à savoir l'épierrage mécanisé, l'introduction des arbustes fourragers en bandes, associés à la céréaliculture, et les banquettes d'infiltration renforcées par des arbustes fourragers, particulièrement le *Cactus opuntia, Acacia cyanophilla* et *l'Atriplex halimus*.

Photo 5. Cordons de pierres, évoluant progressivement dans les cultures pluviales

Photo 6. 20 % des terres aménagées servent au stockage des matériaux d'épierrage.

CONCLUSIONS

La construction des ouvrages de GCES ne vise pas le bénéfice immédiat pour la personne qui a investi de son temps ; le but est beaucoup plus noble puisque c'est une œuvre dont plusieurs générations vont profiter. En effet, chaque génération marque son passage par des rajouts, comme les rehaussements ou des plantations en rideaux accompagnant les nouveaux ouvrages. L'expérience a montré que ceux qui sont abandonnés ou mal entretenus pour une raison quelconque ne le seront pas définitivement. Actuellement, nous assistons à des réaménagements des ouvrages abandonnés ou mal entretenus dès que la terre change de main.

Cependant, les perspectives d'évolution dans le futur proche sont difficiles à imaginer du fait que le monde rural connaît actuellement des mutations rapides et profondes. Nous assistons à une dégradation du couvert végétal par des prélèvements devenant de plus en plus excessifs autour des dépressions aménagées et irriguées. Il est évident que le recul de la végétation accentue le

ruissellement sur les versants, d'où la destruction des ouvrages d'une part, et le tarissement des sources d'autre part. Or, sans l'irrigation, ces ouvrages impressionnants n'auraient pas de raison d'être. L'avenir des techniques traditionnelles de CES est en relation étroite avec l'équilibre de toutes les composantes du système en question.

Parmi les risques de crise, l'arrivée d'une nouvelle génération constituée en partie de jeunes qui ont raté leurs études et qui rêvent d'une vie facile. C'est une génération qui a d'autres valeurs et d'autres aspirations, comme le rêve de l'émigration, et qui est en train de perdre le savoir-faire accumulé par un long héritage. Les pratiques et techniques traditionnelles sont de plus en plus vues comme archaïques, dépassées et inutiles. Peu de jeunes seront capables de construire les murettes d'une façon acceptable et selon les normes héritées, comme ils seront incapables de fabriquer les matériaux de travail agricole traditionnel (exemple de la charrue en bois). La question se pose donc de savoir si les générations futures peuvent assurer la continuité du savoir-faire et l'améliorer par l'ouverture sur de nouveaux moyens technologiques et systèmes de production ou bien, les techniques traditionnelles vont être de plus en plus abandonnées et les terres vouées à la dégradation.

En réalité, les techniques traditionnelles en question ont déjà traversé des crises importantes, comme les abandons pendant des moments difficiles, les périodes d'instabilité politique ou de sécheresse sévère. De même, actuellement, nous pouvons nous attendre à une crise durant au moins une génération. Cependant, nous constatons que la terre est de plus en plus revalorisée, particulièrement suite aux difficultés de la vie en milieu urbain, d'où le retour à la terre et la recherche d'un rééquilibrage du monde rural.

Les techniques traditionnelles peuvent être donc conservées et améliorées si les conditions suivantes sont réunies :

- la nécessité de maintenir l'équilibre de tous les écosystèmes régissant le milieu naturel ;
- le désenclavement des régions montagneuses permettant des déplacements et des échanges rapides des produits avec les centres urbains ;
- l'amélioration des productions et des rendements par l'utilisation des semences sélectionnées et par l'apport de fertilisants, d'où la nécessité d'informer et de former les paysans ;
- le choix des techniques de conservation des eaux et du sol les plus appropriées, en relation avec les données naturelles et les conditions socio-économiques des populations et leur perfectionnement, notamment par la réduction du temps de travail et de la peine nécessaires à leur mise en place.

Références bibliographiques

CHAKER M., EL ABASSI H., LAOUINA A., 1996. Montagne, piedmont, plaine: investir dans les techniques traditionnelles de CES au Maroc oriental. *In* Reij C., Scoones I., Toulmin P.

(édit.), *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*, CTA-CDCE-Karthala, 75-86.

CHAKER M., 1998. *Le massif de Boukhouali et la plaine d'El Aioun, Maroc oriental. Dynamique de la surface, fragilité naturelle et pression anthropique : quelles tendances et quelles stratégies ?* Thèse d'État, université Mohamed V Rabat, 287 pp. [en arabe].

EL AMAMI S., 1983. *Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie, Tunis*, Centre de recherche du génie rural, 69 pp.

LAOUINA A., CHAKER M., 1977. La montagne du Bou Khouali, le milieu et l'homme. *Rev. de Géogr. du Maroc ,* n° 1 , nouv. sér., 53-74.

LAOUINA A., CHAKER M., 1998a. Processus de dégradation des terres et désertification des pays Ayat-El Aïoun, Maroc oriental. *Bull. Egyptian Geogr. Society*, 71 : 165-191.

LAOUINA A., CHAKER M., 1998b. Les travertins de la chaîne du Boukhouali et du piémont septentrional, étude géomorphologique et aménagement hydro-agricole, Études de géographie physique, URA 903 du CNRS, univ. de Provence, 27-34.

ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO.* n° 70, 420 pp.

ANALYSE DE QUELQUES AMÉNAGEMENTS ANTIÉROSIFS JUSTE À L'AMONT DU BARRAGE DE HAMMAM BOUGHRARA (MOYENNE-TAFNA) TLEMCEN (ALGÉRIE)

Mohamed MAZOUR*, Ahmed TOUIL, Baghdad MAACHOU***, Malika BENMANSOUR****, Mostafia BOUGHALEM*******

** Université de Tlemcen, B.P. 119, Tlemcen, Algerie, tél. 213 43 21 36 80, fax 213 43 27 54 27 ; mohamed_mazour@yahoo.fr*
*** Université de Tlemcen, B.P. 119, Tlemcen, Algerie,tél/fax 213 43 27 54 27*
**** INRF Tlemcen, B.P. 88 Tlemcen, Algerie, tél. 213 43 20 17 92, fax 213 43 27 54 27 ; b_maachou@yahoo.fr*
***** Université de Tlemcen, B.P. 119 Tlemcen, Algerie, tél. 213 43 21 36 80, fax 213 43 27 54 27*
****** Université de Tlemcen, B.P. 119 Tlemcen, Algerie, tél. 213 43 21 36 80, fax 213 43 27 54 27*

Abstract

Gully is an important process in Algeria. This work shows the efficiency of gully management in small watershed of Gaadi (224 ha) situated just above Hammam Boughrara dam with a storage capacity of 177 m^3. During the period of 1994-1995, 250 000 m^3 of gully management structure are constructed, and in 2000-2001, we choose 110 constructions: gabions, stone walls, earth structures and used tires gully management. Analysis of field observations shows that management practices used now with more success and efficiency are particularly gabions and earth management structures associated to biological treatment, to assure the progressive accumulation of sediments and for the protection against runoff. The farmers have to develop best techniques to manage water, soil and biomass taking care of the diversity of ecological situations. This may help to understand the ecological environment and to maintain a good dialogue with farmers helping them to maintain a good rural environment.

Keywords : *Gully Erosion* ; *Soil And Water Conservation* ; *Management Practices* ; *Rural Environment* ; *Algeria*.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est devenue l'un des principaux problèmes qui affecte durement le patrimoine foncier de l'État algérien. Ce phénomène conduit non seulement à une forte dégradation des sols et la diminution des surfaces agricoles, mais aussi à l'envasement accéléré des infrastructures hydrauliques implantées en aval des bassins versants. Les surfaces perdues pour l'activité agricole sont estimées à 250 000 ha depuis l'indépendance, et la dégradation spécifique dans les bassins

versants atteint 2 000 t km^2 an^{-1}. Dans la zone marneuse du bassin versant de l'Isser, affluent est de la Tafna, les pertes en terre par ravinement ont atteint 400 t ha^{-1} an^{-1} en 2001, alors que l'érosion en nappe sur des sols nus en pente a atteint 7 t ha^{-1} an^{-1} (Mazour, 2001).

En Algérie, pays à climat semi-aride et à forte croissance démographique, l'eau est devenue une ressource très limitée et très sollicitée, encore menacée par l'érosion qui contribue fortement à la diminution des capacités de stockage dans les retenues de barrages par les dépôts de sédiments qu'elle transporte le long de son trajet. L'Algérie perd annuellement une capacité totale de stockage des eaux, estimée à 20 millions de m^3 (Remini, 2000).

Le sous-bassin versant de Gaadi, très touché par le ravinement, est situé tout juste à l'amont d'un barrage de la plus haute importance : le barrage de Hammam Boughrara sur la Tafna, principal cours d'eau de l'ouest algérien, à caractère régional, récemment mis en eau, d'une capacité de 177 M m^3, destiné à l'alimentation en eau potable de la ville d'Oran et à l'irrigation de la région de Maghnia.

Pour protéger ce barrage contre l'envasement, les pouvoirs publics ont classé cette région dans la catégorie des zones d'interventions prioritaires. Des travaux d'aménagements antiérosifs et, en particulier, la réalisation des seuils de correction torrentielle ont été réalisés pour faire face aux phénomènes de ravinement et de transports solides.

Une partie des travaux a eu lieu entre 1994 et 1995 et plus de 300 ouvrages ont été réalisés dans le sous-bassin.

Six ans après, nous avons voulu étudier le comportement de ces ouvrages et leur efficacité en fonction des coûts consentis et des techniques utilisées.

1. PRÉSENTATION DU MILIEU

Le sous-bassin versant de Gaadi se trouve juste à l'amont du barrage de Hammam Boughrara, à environ 10 km de la ville de Maghnia (Extrême-Nord-Ouest algérien). Il s'étend sur une superficie de 224 ha. Il présente un relief assez fort, la pente moyenne des versants varie entre 15 % et 50 %. Les altitudes sont comprises entre 370 m et 495 m. La nature des terrains en place présente une dominance de sols à texture argileuse lourde, peu structurés, pauvres en matière organique et fortement dégradés. Ces sols dépourvus de cailloux en surface sont très sensibles à l'érosion. Le reste, ce sont des sols alluvionnaires, couverts à leur surface par un nombre important de pierres et de débris végétaux, ce qui les rend relativement plus résistants à l'érosion.

La densité des ravines est assez importante et leur activité est en général assez intense. Certaines ont été reprises par des glissements de terrain localisés et ont atteint des stades de dégradation avancés, ce qui rend toute intervention impossible et inutile. Dans la plupart des ravines, l'évolution est surtout régressive et se fait particulièrement à la faveur des évènements pluviométriques importants, de fréquence 1/5 ans. Nous avons enregistré pour l'année 2001 sur les versants où les pentes dépassent 25 %, pour des pluies dont la hauteur dépasse 20 mm et

où l'intensité maximale en 30 minutes se situe aux environs de 20 mm/heure que le nombre d'apparition de nouvelles rigoles ou ravines (largeur maximale : Lmax = 1,0 m ; profondeur maximale : Pmax = 0,50 m) peut être important (v. tab. 1). Concernant ces résultats, il faut noter que les autres facteurs qui influencent les écoulements, tels que le couvert végétal, les états de surface, l'antécédent pluviométrique, etc., ne sont pas pris en considération.

Tab. 1. Nouvelles griffes ou ravines en fonction de la hauteur et de l'intensité maximale des pluies sur un versant pentu à Gaadi (Hammam boughrara), 2001.

Intensité max. en 30 mn. (mm/heure)	Hauteur de la pluie < 20 (mm) Nombre de griffes/ravines nouvelles/hectare			Hauteur de la pluie > 20 (mm) Nombre de griffes/ravines nouvelles/hectare		
	Lmax = 0,2 Pmax = 0,2	Lmax = 0,5 Pmax = 0,5	Lmax = 1 Pmax = 1	Lmax = 0,2 Pmax = 0,2	Lmax = 0,5 Pmax = 0,5	Lmax = 1 Pmax = 1
<10	5	2	/	11	5	2
10 à 20	8	4	/	16	6	2
>20	12	7	1	22	12	3

Avec des précipitations moyennes annuelles de 328 mm et une température moyenne de 17° C, le sous-bassin de Gaadi a un climat de type semi-aride à hiver tempéré. Les pluies ont un caractère assez violent et irrégulier. Elles tombent surtout sous forme d'orages, particulièrement en automne où leur agressivité marque souvent le paysage. Les pluies maximales journalières dépassent souvent la moitié du total mensuel. Ces pluies agressives ont des intensités moyennes dépassant 30 mm/heure, contribuant ainsi au déclenchement des forts ruissellements et des crues.

Les crues maximales annuelles de fréquence biennale, décennale, bidécennale, cinquantenaires, centennale et millénaire estimées dans la région sont estimées dans le tableau 2. Elles concernent le cours d'eau principal de la Tafna à Hammam Boughrara.

Ces crues sont à l'origine des fortes dégradations du milieu. Le taux d'érosion spécifique varie entre 20 et 500 t km^{-2} an^{-1}, avec une valeur moyenne au site du barrage de Hammam Boughrara de 150 t km^{-2} an^{-1}.

À l'exception de la partie amont qui a été reboisée en 1964 en Pin d'Alep, le reste du sous-bassin versant présente un couvert végétal très dégradé et même, parfois, totalement inexistant. L'agriculture et l'arboriculture n'occupent que des petites surfaces autour des fermes. Certains paysans locaux ont dû abandonner le travail de la terre, devenu peu rentable, pour se convertir à d'autres activités dans les villes limitrophes frontalières.

Tab. 2. Crues maximales de fréquence 0,5 ; 0,1 ; 0,05 ; 0,01 ; 0,001 (Hammam Boughrara), 1992

Période	2 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1 000 ans
Q (m3/s)	234,0	840,46	1 072,71	1 372,71	1 582,4	2 340,45

Les travaux antiérosifs réalisés dans le S.B.V. de Gaadi font partie des « *grands travaux de mise en valeur intégrée et protection du bassin versant du barrage de Hammam Boughrara* ». Ils ont été lancés le 25 octobre 1994 et réalisés sous la direction de l'administration des forêts de Tlemcen.

2. RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES AMÉNAGEMENTS ANTIÉROSIFS DANS LE S.B.V. DE GAADI

Sur 2 500 m^3 de travaux de correction torrentielle réalisés sur la tranche 1994-1995 dans le S.B.V. de Gaadi, nous avons examiné d'une manière assez précise le comportement de plus de 100 ouvrages antiérosifs — ce qui représente un volume total d'environ 1 000 m^3 (± 30 m^3) —, ainsi que l'état des traitements antiérosifs associés à chaque ouvrage, et ce, en fonction des principaux facteurs considérés.

L'analyse des travaux antiérosifs et des structures de correction torrentielle dans le sous-bassin versant permet tout d'abord d'apporter les observations suivantes :

- un choix très limité dans les types d'ouvrages souvent inadaptés aux terrains en place ;
- un dimensionnement des seuils très approximatif où seule la géométrie du profil en travers du site est prise en considération avec, certainement, un souci de rentabilité maximum dans la réalisation ;
- une densité élevée des seuils ;
- une remontée biologique très insuffisante ;
- une efficacité incertaine vis-à-vis de la dynamique de l'érosion qui continue à s'accélérer.

Au niveau du sous-bassin étudié, les ravines drainent le plus souvent les ruissellements qui proviennent des parties situées à l'amont, lesquelles sont pratiquement dénudées et où les sols peu profonds sont piétinés, tassés et déstructurés par le parcours et les passages répétés des machines agricoles. Le ruissellement qui est libéré dans ces zones est très important et son énergie va augmenter à la faveur des pentes.

Le traitement du ravinement va dépendre de l'origine du ruissellement, mais aussi du stade de développement de la ravine. D'après certains auteurs, il y a trois stades de développement des ravines auxquels correspondent trois modes de traitements. Mais vu la grande variabilité des ravines et leurs fonctionnements divers, le traitement des ravines doit être adapté aux conditions physiques du milieu et à la dynamique des écoulements sur les versants.

3. COMPORTEMENT ET STABILITÉ DES SEUILS

En comparant le réseau hydrographique de 1994 au démarrage du projet et celui que nous avons observé sur terrain en 2001, nous remarquons une dynamique importante du ravinement malgré tous les aménagements réalisés, et plusieurs ravines nouvelles sont apparues (tab. 1). Cette constatation témoigne de l'activité encore importante de l'érosion mais aussi de l'inefficacité des travaux antiérosifs. Quatre types de seuils ont été utilisés dans les proportions suivantes : 65 % en pierres sèches, 10 % en gabions, 15 % en pneus usagés et 10 % en terre. Seuls les seuils en gabion semblent montrer une certaine efficacité.

Tout d'abord, les sédiments arrêtés sont globalement stables, ce qui permet à la végétation de s'installer durablement (*Tamarix* et roseaux). Les bassins de dissipation ont été efficaces et les phénomènes de « renard » n'ont pas été observés malgré des débits maxima de crues importants. La plupart des seuils en pierres sèches ont été endommagés pour des raisons multiples. Les plus importantes sont leur inadaptation aux terrains marneux, les fondations et l'ancrage insuffisants et les malfaçons dans la réalisation.

Malgré leur densité élevée, ils se sont avérés le plus souvent inefficaces et, parfois même, à l'origine de nouveaux départs de ravines évoluant d'une manière régressive. Les seuils en pneus usagés testés pour la première fois dans la région n'ont pas supporté la poussée des ruissellements, surtout sur des sols argileux. Même si le choix de ce type de seuil reste intéressant, la technique de mise en place du seuil a été insuffisante (absence de fixation des pneus et terrain inapproprié). Pour ce qui est des seuils en terre, ils pourraient permettre une bonne stabilisation des ravines en terrain marneux si seulement leur dimensionnement et leur réalisation se font correctement. Les exemples qui ont été analysés ont permis une bonne reprise de la végétation et leur comportement est satisfaisant.

Tab. 3. Efficacité et coûts des quatre types de seuil sur le ravinement

Type de seuil	En gabion	En pierres sèches	En pneus usagés	En terre
Efficacité	bonne	insuffisante	insuffisante	assez bonne
Durabilité	assez fragile	fragile	peu durable	plus durable
Végétalisation en amont	assez bonne	insuffisante	insuffisante	insuffisante
Coût	2 000 DA/m^3	1 500 DA/m^3	1 000 DA/m^3	800 DA/m^3

Un ouvrage stable et efficace est celui qui présente un bon comportement pendant au moins une durée de cinq ans (durée habituellement visée par les ingénieurs), le temps que prendra en général la végétation pour s'installer durablement.

Les coûts des différents seuils ont été évalués et comparés. Les seuils en gabion sont les plus chers et ceux qui exigent le plus de technicité (tab. 3). Malgré leur inefficacité, les seuils en pierres sèches sont en surnombre, ce qui engendre des

surcoûts importants. Ils sont très vulnérables sur les terrains argileux et présentent une faible résistance aux eaux de ruissellement, étant donné la faible cohésion des pierres. Le coût de ces seuils est relativement élevé : il représente 75 % du coût des seuils en gabion pour une efficacité beaucoup moindre. Les seuils qui peuvent présenter un intérêt du point de vue coût et efficacité sont ceux en terre compactée. En effet, ils coûtent deux fois moins cher que les seuils en pierres sèches et sont beaucoup plus efficaces.

CONCLUSIONS

L'approche technique moderne de la correction torrentielle des ravines consiste à dissiper l'énergie de chute en tête de ravine par une végétalisation ou des obstacles mécaniques, à stabiliser le fond de ravine par des seuils perméables, à protéger les sédiments par une végétalisation herbacée et arborée et productive, et, enfin, à réhabiliter le réseau de drainage en créant un milieu approprié (Roose, 2000). La stratégie de lutte antiérosive récemment développée pour valoriser au mieux la terre et le travail (GCES, Roose, 1994) est donc également applicable pour lutter contre l'érosion ravinante et restaurer la productivité de la surface abandonnée aux ravines.

Les insuffisances des études de base relatives aux processus érosifs et leur spatialisation ont induit des interventions empiriques et mal ciblées. Bien souvent, les travaux eux-mêmes, réalisés trop hâtivement, déclenchent la reprise de l'érosion en toute absence de suivi et d'entretien.

Il semble bien que les difficultés économiques et la dégradation du milieu soient liés. Il est en effet difficile d'envisager une protection efficace des ressources en l'absence d'une politique novatrice, basée sur la volonté de redynamisation de l'économie et de mise en valeur de ressources nouvelles et durables.

Références bibliographiques

GTZ, 1996. *L'aménagement des zones montagneuses dans les bassins versants des montagnes de l'Atlas tellien semi-aride*. Rossdorf, Allemagne, 142 pp.

HEDDADJ D., 1997. La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull. Réseau Erosion*, n° 17, IRD, Montpellier : 168-175.

HEUSCH B., 1982. *Étude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord.* Projet RAB/80/04. PNUD, 83 pp.

LILIN C, KOOHAFKAN P, 1987. *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti, Rome*, FAO, 36 pp.

LEBLOND B., GHERIN L., 1984. *Travaux de conservation des sols : étude des projets et leur réalisation par des techniques à haute intensité de main d'œuvre*. PNUD-OIT/81/044, Genève, 223 pp.

MAZOUR M., 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Isser, Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 300-313.

REMINI B., 2000. L'envasement des barrages, quelques exemples algériens. *Bull. Réseau Erosion* IRD, Montpellier, 20 : 165-171.

ROOSE E., 1987. Evolution des stratégies de luttes anti-érosives. Nouvelle démarche proposée en Algérie : la GCES. *Bull. Réseau Erosion*, 7 : 91-96.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993. Erosion en naappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 289-308.

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

ROOSE E., CHEBBANI R., BOUROUGAA L., 2000. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 4, 11 : 317-326.

L'ÉROSION EN *LAVAKA* : PROCESSUS ET UTILISATION PAR LES PAYSANS D'AMPASIMBE, MADAGASCAR

Nicolas ANDRIAMAMPIANINA
DRFP-FOFIFA, B.P. 904, Antananarivo, Madagascar
Tél. (261) 33 11 865 41 ; nico_wlm@yahoo.fr

Abstract

Lavaka *is a typical form of regressive gullies scouring the hillsides from the Highlands of Madagascar. They can be a few tens meters deep according to the weathered rock depth, causing enormous soil losses in the fields and depositing sands in the cultivated low lands.* Lavaka *seem to begin with runoff energy digging deep gully down to the watertable and progressing by hydraulic pressure and landslide. The* lavaka *restoration by physical or biological dams is possible but expensive for the farmers (time consuming). In the region of Ampasimbe, the* lavaka *stabilized naturally by man or are used by the farmers for market gardening. They benefit from particular conditions (low wind, permanent soil moisture, no bush-fire nor cattle straying, high soil nutrients content) which reign in the enclosures. The* lavaka *became crucial means of production, increasing the cultivable surface in this region.*

Keywords : *Madagascar* ; Lavaka ; *Processus* ; *Utilisation*.

INTRODUCTION

L'érosion en *lavaka* est une forme d'érosion typique des Hautes Terres de Madagascar. Les *lavaka* sont parfois classés parmi les formes d'érosion de mouvement de masse bien que leurs processus de formation, d'évolution et de stabilisation s'effectuent très lentement. Ils s'apparentent au *gully erosion* des pays anglophones. On peut retrouver également le même type d'érosion au Brésil : les *voçorocas*.

Dans le terroir d'Ampasimbe, les paysans ont l'habitude d'installer leur jardin potager dans les anciens *lavaka*. Cette pratique est justifiée par les bonnes conditions physico-chimiques qui règnent à l'intérieur des *lavaka*, où les cultures sont protégées contre les vents, la divagation des bœufs et les feux de brousses. Les avantages de cette pratique sont l'extension des terrains de cultures grâce à la récupération des terres érodées.

1. L'ÉROSION EN *LAVAKA*

Le *lavaka* est une forme d'érosion régressive, évoluant du bas vers le haut du versant. Il a une forme caractéristique d'une poire renversée, la partie amont, étant élargie, formant un grand bassin de réception et se rétrécissant vers l'exutoire. Au-delà de ce dernier, un cône de déjection se forme par le dépôt des sédiments à la sortie du *lavaka* dans les zones basses cultivées. Les dimensions sont très variables selon l'état d'avancement de l'érosion et le matériel entaillé. Un *lavaka* peut être profond de quelques dizaines de mètres selon l'épaisseur des altérites concernées.

1.1. Les causes

Les causes des *lavaka* sont multiples, mais on peut les classer en deux catégories :

- les conditions préalables : les *lavaka* ne se forment que sous un climat tropical contrasté et n'entaillent que les sols ferrallitiques ou ferrugineux profonds, présentant un horizon B très épais à la partie supérieure et un horizon C friable à la base. Enfin, les *lavaka* ne se forment que sous les savanes herbeuses discontinues. En dehors de ces conditions physiques on observe d'autres formes d'érosion ;
- le ruissellement superficiel et le fluage interne des eaux de la nappe phréatique constituent les conditions dynamiques des *lavaka* dans le processus de formation et d'évolution de cette érosion. En effet, le ruissellement superficiel concentré débute l'action en entaillant jusqu'à la zone d'altérite friable à la base des sols ferrallitiques. Le processus est repris par les eaux de la nappe qui évacuent progressivement les matériaux mobilisés. L'horizon B ainsi déstabilisé s'écroule par paquets successifs vers le haut du versant et latéralement (d'où l'évolution en feuille de chêne).

Les actions de l'homme sur le milieu, qui tendent à renforcer le ruissellement superficiel, favorisent la formation des *lavaka* (ouverture d'une route, talutage en bas de pente...). Cependant, l'existence de *lavaka* anciens, datés avant l'arrivée de l'homme, donne une autre dimension à cette forme d'érosion. En effet, les *lavaka* anciens sont les témoins d'une crise climatique caractérisée par le passage d'un climat plus humide à un climat plus sec.

1.2. Stabilisation des *lavaka*

Une fois amorcé en bas de pente, le *lavaka* évolue régressivement vers le haut de pente et ne s'arrête que sur la ligne de crête. Cependant, la rencontre avec une barre rocheuse peut arrêter l'évolution d'un *lavaka* à mi-pente. De même, la recolonisation de l'intérieur du *lavaka* par la végétation peut également le stabiliser. En effet, les espèces végétales souvent rudérales profitent des bonnes conditions physiques et chimiques des *lavaka* pour se développer. Ainsi, les éboulis et les sédiments sont-ils fixés et les eaux de la nappe ou de ruissellement n'arrivent plus à les évacuer. Les talus se recouvrent de lichens et de mousses et sont ainsi protégés contre les gouttes de pluies.

La stabilisation mécanique d'un *lavaka* est souvent difficile à mettre en œuvre et coûte cher. On peut corriger les *lavaka* par des seuils en dur ou par une stabilisation biologique, mais ces techniques ne sont pas à la portée des paysans.

On peut stabiliser un *lavaka* :

- en déviant les eaux de ruissellement vers un chemin d'eau aménagé ;
- en installant un barrage à l'exutoire, l'objectif étant de combler le *lavaka* progressivement par les sédiments ;
- en aménageant les parois de façon à avoir une pente atténuée et coupée par des terrasses. Les talus et les terrasses sont alors fixés par enherbement dense.

2. UTILISATION DES *LAVAKA*

Dans le terroir d'Ampasimbe, les *lavaka* stabilisés naturellement ou par l'intervention humaine sont utilisés par les paysans pour des cultures maraîchères. En effet, les paysans profitent des conditions physiques particulières qui règnent dans leurs enceintes pour mettre en place leurs cultures. Ces interventions transforment l'aspect négatif de l'érosion en un aspect productif et positif. Les *lavaka* sont devenus des moyens de production cruciaux, augmentant la superficie cultivable dans le terroir.

2.1. Le choix des *lavaka*

Les *lavaka* choisis sont des *lavaka* déjà stabilisés dont les parois et les fonds sont entièrement fixés où on ne risque plus de réactivation par l'érosion. Puis le *lavaka* est protégé contre les ruissellements superficiels. On choisit également les *lavaka* où une source fonctionnelle est présente dans l'enceinte. Cette condition facilitera l'arrosage des cultures maraîchères.

2.2. Les conditions d'utilisations

L'intérieur des *lavaka* présente des conditions favorables aux cultures. D'abord, les cultures sont protégées des fréquents feux de brousses et des vents.

Le substrat au fond du *lavaka* est adapté à l'installation des cultures par le mélange des matériaux des différents horizons des sols. La comparaison des analyses granulométriques des sols des fonds du *lavaka* et des sols de versants a montré une texture plus meuble et plus grumeleuse dans les *lavaka*, avec une proportion équilibrée de sable, d'argile et de limon. Contrairement, les sols de versant sont plus argileux (30 % à 40 %), d'où les sols sont plus gonflants et desséchants.

Le taux de matière organique des sols dans les fonds des *lavaka* est plus fourni avec plus de 6 % contre 3 % sur les versants.

Les sols des *lavaka* sont riches en bases, ces dernières ont été mises à jour par le décapage de l'horizon improductif superficiel. On peut retenir particulièrement la différence, à l'avantage des sols de *lavaka*, de la teneur en phosphore assimilable. Cet

élément fait cruellement défaut dans les sols des versants. De même, les bases échangeables sont plus présentes dans les sols de *lavaka* que sur les versants.

2.3. Les cultures

Le terroir d'Ampasimbe est situé dans la zone suburbaine de la capitale d'Antananarivo. L'économie villageoise est basée sur la production agricole en vue de satisfaire les demandes des marchés urbains. Le terroir est caractérisé par une utilisation extensive des ressources naturelles. Les bois sont exploités pour la fabrication de charbon, les gisements de granit sont exploités pour la production de caillasses.

Les cultures maraîchères tiennent une place prépondérante dans le terroir d'Ampasimbe. Ces cultures destinées aux marchés urbains, source importante de revenu, entrent en concurrence avec la riziculture, qui constitue également une principale activité de bas-fond dans le terroir. Ainsi les bas-fonds sont-ils entièrement aménagés :

- les rizières occupent les bas-fonds irrigables et difficilement drainables ;
- les cultures maraîchères sont installées sur les zones à la fois irrigables vers les bas de pente et drainables dans les bas-fonds. Ainsi toutes les zones situées en bas des sources sont exploitées pour des cultures maraîchères.

2.4. Saturation du terroir et infertilité des sols

Les versants ne sont destinés qu'aux cultures pluviales et aux reboisements. En dehors des cultures et des bois, on a du pâturage naturel constitué par des *Aristida spp*. Ces versants sont la proie d'une érosion intense en saison des pluies : ruissellement diffus et ruissellement concentrés y sont généralisés. Les ruissellements concentrés évoluent parfois en *lavaka*.

Sous de telles conditions, le terroir d'Ampasimbe est relativement saturé :

- en amont, on a des versants aux sols ferrallitiques, à fertilité très marginale et non utilisables qu'en saison de pluie ;
- en aval, on a des bas de pente et des bas-fonds fortement aménagés où toute extension n'est plus possible.

La présence de ces anciens *lavaka* constitue ainsi une extension des terrains de cultures dans le terroir d'Ampasimbe. Il suffit d'aménager les planches de culture dans l'enceinte du *lavaka* et d'apporter du fumier de ferme pour améliorer la structure des sols. L'aménagement des anciens *lavaka* est plus rentable que celui des versants aux sols très pauvres. L'existence de source dans l'enceinte même du *lavaka* ou à proximité est également un avantage inestimable.

Ces espaces récupérés constituent 10 % des terrains de cultures maraîchères. Elles sont non négligeables dans l'économie des ménages car les rendements y sont plus conséquents. Les *lavaka* fournissent près de 20 % des revenus des paysans en matière de culture de rente.

CONCLUSION

La récupération des sols érodés en *lavaka* pour des cultures est une mise en valeur des sols ingénieuse par les paysans du terroir d'Ampasimbe. Dans ce sens, l'érosion n'est pas toujours négative : elle pourrait être transformée en une dynamique de production. À l'instar de la formation des riches dépôts alluviaux sur de grandes distances.

Les terrains érodés par les *lavaka* ont été transformés en des surfaces de production permettant de résoudre le manque de terres cultivables et la marginalité des ressources en sol dans le terroir d'Ampasimbe. Le fait de cultiver les bassins de réception des anciens *lavaka* est, en effet, engendré par l'exiguïté ou la saturation des bas-fonds et la médiocrité des sols des versants. C'est une pratique culturale d'alternative à une dynamique de dégradation des ressources naturelles. En résumé, l'érosion en *lavaka* développe sur une distance relativement courte la dynamique ablation-sédimentation, à l'instar de la formation des riches dépôts alluviaux sur de grandes distances.

Références bibliographiques

ANDRIAMAMPIANINA N., 1988. *Contribution à l'étude de la dynamique et de la stabilisation des lavaka à partir de quelques exemples*. Mémoire de maîtrise, Université de Madagascar, CUR d'Antananarivo, Etablissement d'enseignement supérieur des lettres, UER Géographie. 167 pages

ANDRIAMAMPIANINA N., 1988. Les *lavaka* malgaches : leur dynamique érosive et leur stabilisation. *Madagascar Revue de Géographie* n° 45, Antananarivo.

ANDRIAMAMPIANINA N., 1991. *Gestion de l'eau dans terroir des Hautes Terres malgaches : exemple d'Avaratrambolo*. Séminaire « Bas-fonds et rizicultures », Tananarive, FOFIFA, ORSTOM, CIRAD, 13 pp.

ANDRIAMAMPIANINA N., 1997. *Stabilisation des lavaka dans le bassin versant d'Androtra dans la région de Marovoay*. Travaux de consultant auprès de la Conservation Internationale, Ankarafantsika, Majunga.

BLANC-PAMARD C., RAKOTO RAMIARANTSOA H., 1991. Les bas-fonds des Hautes Terres centrales de Madagascar : construction et gestion paysanne. Séminaire « Bas-fonds et rizicultures » Tananarive, FOFIFA, ORSTOM, CIRAD, 13 pp.

GRET, 1988. *La maîtrise des crues dans les bas-fonds - Petits et micro barrages en Afrique de l'Ouest*. Dossier n° 12, « Les points sur ». Coopération Française, ACCT, AFVP, 474 pp.

HOEUBLICH J., J.M., 1983. L'organisation du relief dans les environs de Tananarive, Madagascar, *Revue de Géographie* n° 43, juil.-déc., 10-39, Tananarive.

KUNKLE S. H., 1980. Techniques hydrologiques de conservation des terres et des eaux en montagne. *Cah. FAO Rome,* n°2 : 121 pp.

LAL R., RUSSEL E.W., 1981. *Tropical Agricultural Hydrology. Watershed Management and Land Use*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. International Institute of Tropical Agriculture, 482 pp., Ibadan, Nigeria.

LANJANIRINA, 2005. *Les impacts géographiques de l'érosion des sols dans les moyennes vallées d'Ampasimbe et de l'Ihadiana*. Mémoire de maîtrise en préparation.

NEBOIT R., 1983. *L'homme et l'érosion*. Univ. Clermont-Ferrand, Nouvelle série, fasc. 17, 183 pp.

RAUNET M., 1980. *Les bas-fonds et les plaines alluviales des Hautes Terres de Madagascar. Reconnaissance morphologique et hydrologique*. Antananarivo, MDRRA-IRAT, 116 pp. + annexes.

ROUGERIE G., 1965. Les *lavaka* dans l'évolution des versants à Madagascar. Les *lavaka* malgaches : agent naturel d'évolution des versants. Paris, *Bull. Ass. Géogr. Franç*. n° 332-333.

PRATIQUES PAYSANNES ET GESTION DES SOLS SUR LES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR

Simone RANDRIAMANGA
Département de géographie, faculté des lettres,
Université d'Antananarivo, B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar,
tél. +261 (20) 22 235 63 ; baratsiv@wanadoo.mg

Abstract

This study is concerned by the analysis of the traditional farming system on the High hills of central Madagascar. The farmers have well organised their village territory. They invest most of their time around the valley where they have managed terraces for rice paddy fields and market gardening. Poor soils of hillslopes are extensively used for grazing and extensive croppings. In this area, soils are generally scoured by sheet erosion and subject to lavaka*, gullies developing by runoff and hydrolic pressure of the watertable*.

Keywords : *Madagascar* ; *GCES* ; *Indigenous Knowledges* ; Lavaka.

CONTEXTE

Cette étude porte sur l'analyse et l'observation des pratiques paysannes et les modes de gestion des sols par les paysans. Différents sites pris dans les bassins versants du Jabo, Sahasarotra et Mananara, choisis pour leur représentativité en matière de gestion de l'eau de la fertilité des sols ou de l'érosion, ont servi d'exemples aux travaux.

1. LES SITES D'ÉTUDE

Les sites d'étude, Ampahitrizina, Mangatany-Nord et Masakalina, se trouvent respectivement dans les sous-bassins du Jabo, Sahasarotra et Mananara et font partie des Hautes Terres malgaches. Là, l'érosion différentielle a dégagé différentes formes de relief. Ce sont des croupes arrondies ou convexes, des collines multifacettes, des hautes plaines d'alluvion ou de vieux massifs surmontés de barres ou dômes granitiques. Ces reliefs sont façonnés dans divers matériaux, principalement du vieux socle précambrien constitué de roches migmatites granitoïdes, de granites migmatitiques et migmatite gneissique granites, gneiss et quartzite, expliquant la vigueur des paysages. L'altitude varie entre 1 600 m dans la partie sud et 1 000 m, au nord. L'altitude moyenne est de 1 350 m.

Le climat est de type tropical d'altitude à deux saisons contrastées : une saison sèche et fraîche entre avril et octobre et une saison chaude et pluvieuse entre octobre et avril.

Les sols ferrallitiques constituent la couverture pédologique des reliefs. Ils reposent sur le socle cristallin datant du précambrien, appartenant au système du graphite du groupe d'Ambatolampy (Hottin, 1976). Les sols hydromorphes se rencontrent dans les bas-fonds. Ce sont des sols à gley ou pseudo-gley. Les sols alluviaux, quant à eux, occupent les hautes plaines.

La formation végétale dominante est la pseudo-steppe. La forêt naturelle a disparu presque en totalité. Les forêts de reboisements d'eucalyptus ou de *Pinus*, introduits pendant l'époque coloniale, couvrent la plupart du temps les sommets et les versants des reliefs.

L'habitat est groupé en villages et se concentre essentiellement à proximité des voies de communication. L'occupation humaine est ancienne. La population est dense avec 40 hab./ km^2 en moyenne, alors que la densité nationale n'est que de 27 hab./km^2. Il s'agit d'une population jeune. Quarante-cinq pour cent de cette population ont moins de 15 ans. C'est à la fois un atout et une contrainte car si la main-d'œuvre disponible est élevée, la charge de la population active est très lourde.

2. HYPOTHÈSE, OBJECTIF ET FINALITÉ DE L'ÉTUDE

Notre hypothèse de travail considère que la lutte contre la dégradation d'un milieu ne peut se faire sans le concours de la population qui l'occupe. En conséquence, si l'on veut préconiser des attitudes en termes de défense de sol ou de gestion des terres, la première action à faire, c'est d'abord de connaître le paysan, ses comportements, ses pratiques culturales et sa stratégie de défense des sols.

Notre problématique est de savoir quelles sont les attitudes des paysans face aux problèmes de l'eau, de fertilité et d'érosion de leurs terrains de culture. L'objectif des travaux porte alors sur la connaissance du milieu, en particulier des systèmes de production du paysan, des moyens de lutte contre l'érosion et des modes de gestion de l'eau et de la fertilité des sols afin de sécuriser les cultures.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les photographies aériennes, les images optiques de télédétection à haute résolution spectrale et différentes cartes, topographiques et thématiques, constituent la base des matériels utilisés.

La démarche préconisée porte sur l'inventaire des systèmes de production dans les sites d'étude, l'analyse et l'observation des stratégies paysannes de gestion de leurs terres pour comprendre les réalités du paysage et recueillir les informations sur l'occupation des sols, les types de sols, l'organisation et l'utilisation agricole.

Les travaux de terrain reposent sur l'observation, les mesures, la prise d'échantillons et l'analyse des sols, pour la compréhension de l'agencement des paysages naturels et humains. Les enquêtes semi-structurées menées auprès des

ménages et les interviews à caractère humain et économique complètent les observations. Ils valident les réponses obtenues à partir des enquêtes dites par quota réalisées avec un taux d'échantillonnage de 50 %, suivant la fonction et la classe d'âges des villageois. Ces enquêtes permettent la caractérisation du comportement paysan face aux problèmes du milieu naturel. La méthode participative a été utilisée pour la restitution des données.

4. RÉSULTATS

L'organisation des paysages agraires observée pour l'ensemble des sites étudiés diffère très peu les uns des autres. À l'exemple de Ampahitrizina, Mangatany-Nord et Masakalina, on retrouve en général les toposéquences typiques des Hautes Terres avec la riziculture irriguée dans les bas-fonds, les potagers sur les terrasses alluviales, les cultures pluviales sur les versants et flancs de colline et les zones de reboisements d'eucalyptus sur les sommets et flancs de colline à proximité des plantations.

La riziculture irriguée des bas-fonds reste traditionnelle et occupe la majorité du temps du paysan. On distingue les rizières des têtes de vallon *lohasaha*, celles des bas-fonds toujours humides : les *heniheny* où l'eau est quasiment présente toute l'année. C'est là que les paysans placent leurs pépinières car l'eau est plus facile d'accès du fait de la proximité des sources. Le « partage » de cette eau s'effectue, cependant, suivant la distance des parcelles rizicoles par rapport à la source ou au cours d'eau qui fournit l'eau et obéit à un calendrier fixé par les paysans. L'irrigation dépend alors du débit des sources et des cours d'eau.

Les rizières des corps des vallons *sakamaina* sont tributaires de la saison des pluies. Les rizières en amont sont les premières servies, mais leurs propriétaires doivent faire passer l'eau d'une rizière à une autre pour ne pas perturber la saison de repiquage. Le « partage » de l'eau est le fruit d'une décision collective paysanne. Elle se soucie d'une utilisation rationnelle des ressources et tient compte de l'entretien de ces sources et nappe phréatique. Elle vise en même temps le maintien de la bonne entente entre les exploitants. Le problème de l'eau est en effet fortement ressenti au début de la saison des pluies, qui correspond au repiquage des rizières des bas-fonds. Les besoins en eau sont alors importants. Le sol doit être humide, voire à l'état de boue, pour pouvoir être repiqué en plants de riz arrachés aux pépinières. C'est souvent l'occasion des disputes entre agriculteurs qui s'accusent de « vol d'eau » dans une rizière.

La stratégie appliquée est tributaire des pluies et demeure simple. Elle se fonde sur l'irrigation après captage des sources et utilise de nombreux canaux d'irrigation ou de drainage et quelques barrages rudimentaires en bois ou par amoncellement de pierres, témoignant d'une bonne gestion, rationnelle et très organisée de l'eau chez les paysans. L'entretien de cette infrastructure est obligatoire pour les usagers sous peine d'amende *dina.*

Les techniques modernes sont très peu utilisées. Cependant, l'usage du fumier organique, celui de la charrue et de la herse marquent un début de mécanisation dans les rizières. La main-d'œuvre est essentiellement familiale. Mais il arrive que le paysan fasse appel à une main-d'œuvre salariée au moment des labours du

repiquage ou du sarclage. Dans tous les cas, l'entraide villageoise est de mise, mais, dans des cas comme Mangatany-Nord, l'individualisme commence à gagner les paysans à cause des difficultés de la vie.

Les cultures maraîchères constituent une source importante de revenus pour les paysans. Elles sont pratiquées sur les bas de pente à sol de colluvions ou sur les terrasses alluviales. Dans les deux cas, l'accès à l'eau pour l'irrigation ou l'arrosage quotidien des cultures conditionne l'emplacement de la terrasse.

La terrasse est, en fait, un système de culture introduit dans la zone. La taille de chaque parcelle varie entre 1 m à 2 m de large sur 2 m à 3,5 m, voire 30 m de long, parfaitement horizontale, récupérée sur des terrains en pente forte. La construction d'une terrasse se fait en plusieurs étapes : on dégage dans un premier temps un mur d'environ 1,50 m de haut sur les parties les plus basses du terrain à transformer ; on arase ensuite le sol sur une largeur d'environ 2 m en amont du talus ; on apporte alors de la terre noire pour niveler la surface. Sa bordure est cultivée en légumineuses, haricot ou petit pois.

L'irrigation de la terrasse est assurée par des eaux captées en amont, dans les têtes de vallon, à partir d'une source ou d'un cours d'eau ou tout simplement des pluies, par le biais de petits barrages de rétention d'eau faits de mottes de terre et de branchages. L'eau est drainée vers les terrasses par l'intermédiaire de petits canaux d'irrigation situés en amont. Les eaux sont alors stockées dans des cuvettes d'environ 20 cm creusées dans la terre : les « trous de stockage » par intervalles de 3 m environ. L'eau ainsi collectée va servir à l'arrosage des cultures à partir d'une assiette. L'usage de l'arrosoir n'est pas pratiqué pour éviter que les talus qui bordent les terrasses ne s'écroulent.

Les cultures sur terrasses sont intensives et font l'objet d'un apport massif d'engrais d'au moins 20 t/ha de fumier car le sol des terrasses est en général pauvre. Le paysan prélève en outre la litière, les bois morts et les branchages des eucalyptus des versants supérieurs pour les brûler dans les terrasses, afin que la cendre qui s'y forme fertilise le sol. Cela n'empêche que le paysan ait aussi recours aux engrais chimiques et, en cas de maladie des cultures, aux produits phytosanitaires. Les principales cultures ici pratiquées sont celles de l'oignon et de l'ail.

La fertilité des sols est entretenue par un système de rotation de cultures au début : pomme de terre, petits pois ou haricots, enfin, oignon et ail. L'association des cultures est souvent pratiquée. Certains paysans utilisent aujourd'hui le compost pour résoudre le problème de fertilité des terrasses, mais dans les bas de versant, ils préfèrent la fumure de volaille au compost.

Les travaux agricoles sont toujours assurés par la main-d'œuvre familiale, sauf pour la préparation des terrasses pour laquelle le paysan a recours à des salariés.

Les cultures pluviales des flancs de colline se localisent près des villages, en amont des champs de cultures maraîchères et sur le bas de pente. Cette localisation est due à l'insécurité et au maraudage. Les cultures pluviales se font sur des sols médiocres. Elles ne bénéficient d'aucun soin particulier et restent tributaires des eaux de pluie. L'usage des engrais n'est guère pratiqué. Quand le champ ne produit plus, il est laissé en jachère pour une durée de deux à

quatre ans. Aucun système d'irrigation ne les caractérise. Ainsi, elles subissent les contraintes de l'eau, de la fertilité et de l'érosion des sols. La plante principale cultivée est le manioc. Il s'agit d'une culture d'appoint. Les rendements sont en général faibles. Dans la partie nord du bassin versant de Sahasarotra, aucun apport en fumure ou soin particulier n'est donné à ces parcelles, sauf à Mangatany-Nord où la culture de manioc hors saison des pluies bénéficie de soins particuliers : arrosage ou apport de fumure. Par contre, une mesure de protection contre les eaux de ruissellement est remarquée en amont des terrains de culture quand celui-ci se situe en aval d'un ravinement ou d'un *lavaka*. Dans ce cas, une tranchée en amont du champ le protège. Dans la partie sud-est, les flancs de colline ont été transformés depuis longtemps en terrasses portant des cultures sèches. Le versant est aménagé de façon à retenir le sol par un canal qui a pour effet de réduire le ruissellement.

La zone de reboisement à eucalyptus : l'eucalyptus fut introduit dans le bassin versant du Jabo vers la fin des années trente. Les plantations avaient pour but d'approvisionner la capitale en bois de chauffe et en charbon. Il s'agit d'une plante acidifiante. Selon le constat des paysans, elle ne doit pas être cultivée à proximité des champs car ses racines assèchent le sol. Les activités culturales ne peuvent pas en conséquence se faire près des zones de boisement d'eucalyptus. C'est pourquoi on ne le trouve quasiment pas dans les bas-fonds et les bas de pente. C'est une source de revenu pour le paysan : bois de construction, bois de chauffe, charbon de bois. La coupe des taillis se fait tous les quatre à six ans pour la fabrication du charbon de bois. Sa plantation est un moyen d'appropriation de la terre.

La formation de pseudo-steppe à *Aristida rufescens* est parcourue chaque année par les feux de végétation pour répondre au besoin de pâturage des paysans. Cette formation végétale n'a pas de véritable propriétaire et n'est dotée d'aucune forme de gestion communautaire, d'où son utilisation anarchique et incontrôlée : feu, fauchage, pâturage extensif. Elle peut aussi servir de fertilisant sur les versants dans les rizières et sur les terrasses après incinération des graminées. Une partie de la paille est utilisée comme litière pour la production de fumier dans les parcs à bœufs ou comme toitures des maisons d'habitation.

Observation sur l'érosion : le faible taux de recouvrement de la couverture végétale ainsi que la forte pente de la colline favorisent un ruissellement diffus des eaux de précipitation pendant la saison des pluies. Celles ci entraînent vers les bas-fonds des éléments arrachés au versant, les menaçant d'ensablement. De leur côté, les sols des versants sont décapés et parfois indurés.
Le système d'élevage contribue aussi à dégrader le sol. La plupart des paysans enquêtés possèdent au moins deux bœufs, utilisés pour les travaux agricoles et pour l'approvisionnement en engrais organiques. Les éleveurs ont l'habitude de déplacer quotidiennement le bétail, des hauteurs de la colline où se trouvent les pâturages pour se nourrir vers les bas-fonds où se trouve l'eau pour s'abreuver. Utilisant les mêmes chemins, ils finissent par creuser des sillons avec leurs sabots. Ces sillons à bœufs marquent le début des formes d'érosion à rigoles mais aussi des ravines devenues nombreuses dans la région. Face à cette situation, les conditions de production sont devenues précaires car les sols ne produisent plus.

Des ONG vont donc intervenir pour tenter d'enrayer le problème. Les actions se concentrent sur les effets du ruissellement, le décapage des sols et l'ensablement des bas-fonds. Les interventions portent sur le mode de gestion du bassin par l'aménagement des terrains de culture en courbe de niveau par le biais de la « parcelle vitrine », sur les versants. Le système d'embroussaillement sur les versants est recommandé pour restaurer les sols décapés, de même la pratique de la haie vive par l'utilisation du vétiver et celle des plantes de couverture du sol. Il faut 5 à 10 ans pour que le sol retrouve sa fertilité.

L'irrigation des cultures et l'utilisation des fumures organiques et non d'engrais chimiques sont enseignées aux paysans.

DISCUSSION ET CONCLUSION

La gestion traditionnelle de l'espace agraire sur les sites étudiés est caractérisée par un déséquilibre entre les unités d'aménagement des campagnes. On observe toutefois que la gestion des ressources en eau est partout liée à celles des parcelles de cultures. Les zones d'utilisation intensive, tels les bas-fonds rizicoles et les terrasses de cultures maraîchères, sont prioritaires dans les activités des paysans à cause du riz qui constitue le principal aliment. La riziculture des bas-fonds répond essentiellement aux besoins de l'autosubsistance et les cultures maraîchères qui représentent les seuls produits de rente du paysan, dont la vente permet de subvenir aux besoins quotidiens et d'acheter le riz en période de soudure. Les zones d'utilisation extensive rassemblent les espaces naturellement peu productifs par manque d'eau, infertilité des sols ou par une végétation déficiente. Ces zones sont utilisées de façon moins intense en fertilisants et sont laissées souvent en jachère. La technique intensive pratiquée sur les terrasses permet une récolte échelonnée de la production qui est destinée à la vente.

Du point de vue érosion, les terrasses constituent un excellent moyen de lutte contre l'énergie du ruissellement. Les cultures de légumineuses qui sont pratiquées sur les parois ont pour effet de fixer le sol ou freiner le ruissellement. Mais les terrasses nécessitent beaucoup d'investissements de la part du paysan. L'action anthropique est très poussée. L'exploitation de la forêt et la fabrication de charbon de bois, outre la riziculture, sont les principales occupations des paysans. Les enquêtes menées auprès des paysans sur les techniques de LAE qu'on leur a enseignées montrent qu'ils sont satisfaits des résultats. Les paysans des Hautes Terres malgaches sont donc assez bien organisés dans la gestion de leur terroir, mais il est nécessaire de les accompagner dans leur mode d'exploitation de leurs terroirs et de leur faire prendre des mesures de protection des versants et de la nappe phréatique pour pérenniser les ressources.

Références bibliographiques

HOTTIN G., 1976. Précambrien de Madagascar. *Bull. BRGRM,* IV : 151-199.

RANDRIAMANGA S., COLLET C., RAKOTONDRAOMPIANA S., RANDRIANARISON L.-T., 2003. Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjojorobe, *Revue Télédétection* 3, 2-3 : 1 131-149.

RAMILSON A., 1997. *Pratiques et stratégies paysannes de gestion des sols sur les Hautes Terres centrales malgaches : exemple d'Ampahitrizina*. Mémoire de maîtrise de géographie, Université d'Antananarivo, 123 pp.

EFFICACITE DE LA GESTION CONSERVATOIRE DES EAUX ET DES SOLS AU TIGRÉ, ÉTHIOPIE

J. MOEYERSONS*, J. NYSSEN/***,**
J. POESEN**, J. DECKERS***, M. HAILE****

** Musée royal de l'Afrique centrale, B-3080 Tervuren, Belgique ; jan.moeyersons@africamuseum.be*
*** Mekele University, P.O.Box 231, Mekele, Ethiopia ; jan@ethionet.et*
**** Institute for Land and Water Management, K.U. Leuven,*
Vital Decosterstraat 102, B - 3000 Leuven, Belgium ; Seppe.Deckers@biw.kuleuven.be
***** Physical and Regional Geography Research Group, K.U. Leuven,*
Redingenstraat 16, B - 3000 Leuven, Belgium ; Jean.Poesen@geo.kuleuven.be

Abstract

The current desertification in Tigray, Ethiopia, has urged the government to promote traditional and new SWC techniques. This study investigates the measurable effects of the management of stoniness of the fields, massive stone bund on steep slopes, check dam in gullies, installation of exclosures and the construction of microdams lakes. The methods comprised pedological and geomorphological mapping, field measurements, experiments and interviews. Experiments showed the existence of an optimal stone fragments (> 2 cm) cover between 5 to 10% of tef production. Stone bunds reduced water erosion from 57 to 18 t/ha/year. They increased water infiltration and boost the crop yield by 7%. Massive checkdam building is retarding gullying. Exclosures can trap more than 2 cm of runoff deposits/year. Finally, reservoirs replenish ground water and lead to gully stabilisation.

Keywords : *Tigray* ; *Ethiopia* ; *GCES Efficiency* ; *Production* ; *Stoniness Effect* ; *Exclosures* ; *Dagets*.

INTRODUCTION

La déforestation par l'homme a été un facteur important dans la dégradation environnementale qui affecte le Tigré (Éthiopie septentrionale) depuis 5 000 ans (Moeyersons *et al.*, 2005). Selon les normes des Nations unies (UNEP, 1994), cette dégradation se qualifie de nos jours même de désertification. Elle se caractérise par un développement accru depuis le dernier siècle de l'érosion pluviale diffuse et de l'érosion par le ravinement. (Nyssen *et al.*, 2005a).

Le ravinement contribue à la désertification de deux manières :

- d'abord, la baisse généralisée des nappes aquifères dans les vallées depuis les cinquante dernières années ne reflète pas une diminution des précipitations annuelles, mais est commandée par le niveau du fond de ravine (Nyssen *et al.* 2005a) ;

- ensuite, les grandes ravines concentrent et transmettent rapidement des volumes considérables de sédiments, érodés des interfluves, vers les parties en dépression du paysage. Là, elles occasionnent des inondations et des accumulations boueuses et ont d'autres effets négatifs, comme la réduction considérable du temps de vie des réservoirs d'eau pour l'irrigation (Nigussie Haregeweyn *et al.* 2006). Les sédiments transmis sont d'ailleurs dérivés, dans la plupart des cas, des horizons pédologiques supérieures, qui constituent généralement la partie la plus fertile du sol. L'érosion pluviale diffuse et en rigoles est de l'ordre de 10 t $ha^{-1}an^{-1}$ à 60 t $ha^{-1}an^{-1}$ (Nyssen *et al.*, 2004a ; Desta Gebremichael, 2005).

Il existe deux mesures traditionnelles de CGES : la gestion de la pierrosité à la surface du sol et l'établissement de *dagets* (rideaux ou talus enherbés). La FAO a aussi soutenu le gouvernement dans l'introduction de mesures de CGES plus modernes, comme la mise en œuvre de murets isohypses, la stabilisation de ravines par des seuils empierrés, la création de terres en défens du pâturage et la construction de petits lacs de barrage de l'ordre de 1 000 000 m^3 pour l'irrigation.

Cette étude veut évaluer ces mesures CGES en ce qui concerne leur impact sur l'environnement et sur une agriculture durable.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. La région étudiée

- Localisation : Hagere Selam, à 50 km à l'ouest de Mekelle, Tigré.
- Climat d'altitude : précipitation annuelle de 772 mm, concentrée essentiellement entre juin et septembre, avec des pluies de grande érosivité. (Nyssen *et al.*, 2005b).
- Géologie : superposition subhorizontale de strates marines, continentales et volcaniques. Les calcaires d'Antalo, d'âge jurassique, sont les affleurements les plus vieux dans la région. Ils ont une épaisseur de 450 m. Ceux-ci sont couverts d'un banc de grès d'Amba Aradam, puissant de ± 50 m, datant du Crétacé, et de deux séries de basaltes et basaltes trachytiques du Tertiaire, séparés par des assises lacustres silicifiées et fossilifères. À la suite d'une surélévation tectonique depuis le Tertiaire, la région a été incisée. Des escarpements et des replats reflètent la structure géologique de couches horizontales à résistance différentielle.
- Sols : les basaltes portent des toposéquences luvisol-regosol-cambisol-vertisol, tandis que des regosols calcareux, des cambisols et des calcisols se sont développés sur les calcaires (Naudts *et al.*, 2002). Les sols basaltiques sont nettement plus fertiles que les sols sur calcaires.

1.2. Méthodologie

- Cartographie : géomorphologique, géologique et pédologique sur base d'observations de terrain et de l'interprétation stéréoscopique de photos aériennes, le tout intégré dans un environnement SIG.

- Parcelles expérimentales :
    - étude de la perte des terres par le ruissellement et par le labour ;
    - étude de la productivité en fonction des structures de conservation de sol, de la pierrosité des champs, de l'utilisation de la charrue.
- La méthode AGERTIM ou *Assessment of Gully Erosion Rates Through Interviews and Monitoring* (Nyssen *et al.*, 2005) a été développée : une combinaison de mensurations annuelles des paramètres topographiques des ravines et d'interrogations des gens, permettant la reconstitution du développement des ravins depuis plusieurs décennies.

2. RÉSULTATS

2.1. La pierrosité

Les paysans connaissent le rôle d'une couverture de pierres et gravats pour la conservation des eaux et des sols. Les expériences montrent qu'une production optimale est atteinte si la couverture par des fragments de roche (> 2 cm) se situe entre 5 % et 10 % (Nyssen *et al.*, 2001). Pour les plus petits fragments, la production augmente avec le taux de couverture.

2.2. *Dagets* et murets

À l'origine, les *dagets* constituaient des limites de champs enherbés, environ 2 m de large, parfois stabilisés par quelques arbres. Les talus situés en contrebas d'un champ fixent une certaine quantité des terres érodées à l'amont et un « rideau » se forme graduellement (Nyssen *et al.*, 2000a). Cette méthode traditionnelle est actuellement remplacée par les murets en pierre, qui prennent moins de place et qui suivent plus rigoureusement les courbes de niveau. Ces murets mènent à une réduction des pertes en terre de 68 % (Desta *et al.*, 2005), et vont de pair avec une augmentation de la production agricole (Vancampenhout *et al.*, 2005). Afin de maintenir une bonne capacité de rétention de terres, elles doivent être rehaussées après une dizaine d'années.

2.3. L'érosion par le labour

L'érosion par le labour constitue un facteur important de la redistribution des sédiments au sein de la parcelle. Les expériences montrent que l'érosion par le labour varie entre 68 kg/m et 272 kg/m pour des pentes de 3 % à 48 % (Nyssen *et al.*, 2000b).

2.4. Seuils empierrés

L'origine des ravines est fortement liée à la déforestation et à l'extention de l'agriculture pendant le siècle dernier (Nyssen *et al.*, 2004a). La construction de routes provoque le ravinement (Nyssen *et al.*, 2002). Les seuils empierrés sont vulnérables et doivent être inspectés régulièrement. Il est conseillé de fortifier ce type de barrage avec des moyens biologiques (Nyssen *et al.*, 2004b). Néanmoins, sur base d'interviews et d'observations, on sait que dans la région, le ravinement

n'a plus augmenté depuis l'installation d'un grand nombre de seuils et l'établissement de murets isohypses sur les interfluves.

2.5. Les mises en défens

Les mises en défens entraînent une reprise rapide d'une végétation arbustive. Les zones en défens et les petites forêts d'église constituent de nombreux îlots verdoyants dans la région. Ces forêts ont une grande capacité de rétention de terres en transit, érodées à l'amont. (Naudts *et al.*, 2002 ; Moeyersons *et al.*, 2003),

2.6. Le rôle des réservoirs dans la conservation du sol

Depuis 1994, quelque soixante de petits lacs de retenue, de l'ordre du million de mètres cubes, ont été construits au Tigré. Une bonne partie des schémas d'irrigation, liés aux lacs, ne satisfait pas aux besoins. La première raison est le colmatage rapide des lacs. Un sondage de l'épaisseur des dépôts dans une douzaine de lacs de retenue dans la région montre clairement que l'espérance de vie des lacs ne dépasse pas quelques dizaines d'années, sauf si, entre-temps, des mesures antiérosives sont prises dans leurs bassins (Nigussie *et al.*, 2005).

Un deuxième problème se pose pour les lacs de retenue en domaine de calcaires d'Antalo. À cause de la grande perméabilité secondaire, des pertes importantes en eau sont notées. Ainsi le réservoir de May Leiba n'a jamais été plein depuis sa construction en 1999. L'importante percolation qui s'est créée depuis la construction du barrage s'est traduite par l'installation d'un régime pérenne sur les chutes d'eau de Tinsehe, à 2,5 km en aval du lac. Un autre cas de perte en eau se présente au Sewhimeda pond, à 15 km à l'ouest de Mekelle. Le lac se vide en quelques semaines après les pluies.

Les lacs de retenue sont souvent considérés comme un échec, mais ils contribuent à la recharge des nappes aquifères. Souvent, la ravine en aval du lac coule lentement pendant la plupart de l'année, une végétation luxuriante s'y installe et stabilise la ravine.

CONCLUSIONS

Des murets isohypses, des seuils empierrés dans les ravines, la mise en défens de terres marginales et la construction de mares et de petits lacs de retenue sont autant de moyens qui prouvent que la situation peut être améliorée. Mais l'effort actuel perdra de son efficacité si l'on ne continue pas sur cet élan. Les murets et les seuils doivent être maintenus et leur capacité de rétention augmentée. Il est nécessaire d'étudier le rôle possible des terres en défens dans la protection des réservoirs contre leur colmatage. Enfin, les petits lacs de retenue, même s'ils ne rencontrent pas les objectifs posés, jouent un rôle très important dans le rétablissement des nappes d'eau et dans la régularisation des sources et des cours d'eau. Ils sont cruciaux pour l'environnement dans le cadre d'une agriculture durable.

Références bibliographiques

DESTA GEBREMICHAEL, NYSSEN J., POESEN J., DECKERS J., MITIKU HAILE, GOVERS G., MOEYERSONS J., 2005. Effectiveness of stone bunds in controlling soil erosion on cropland in the Tigray Highlands, northern Ethiopia. *Soil Use and Management,* 21, 3: 287-297.

MOEYERSONS J., NYSSEN J., POESEN J., DECKERS J., MITIKU HAILE, KABETO KURKURA, GOVERS G., DESCHEEMAEKER K., NIGUSSIE HAREGEWEYN, 2003. L'utilisation du sol, l'hydrologie et la désertification au Tigré, Éthiopie, depuis la fin du Pléistocène. *Geo-Eco-Trop*, 27/1-2:1-8.

NAUDTS J., DE GEYNDT K., NYSSEN J., DECKERS J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS J., POESEN J. 2002. The trap efficiency for sediment and carbon in exclosures on steep slopes. Tembien Highlands, Tigray, Ethiopia - Abstr. Int. Coll. Land use, Erosion & Carbon Sequestration, Montpellier, 23-28 Sept. 2002, p. 120.

NIGUSSIE HAREGEWEYN, POESEN J., NYSSEN J., VERSTRAETEN G., DE VENTE J., GOVERS G., DECKERS J., MOEYERSONS J., 2005. Specific sediment yield in Tigray – Northern Ethiopia: assessment and semi-quantitative modelling. *Geomorphology,* 69: 315-331.

NYSSEN J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS J., POESEN J., DECKERS J., 2000a. Soil and water conservation in Tigray (Northern Ethiopia): the traditional daget technique and its integration with introduced techniques. *Land Degradation and development,* 11: 199-208.

NYSSEN J., POESEN J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS J., DECKERS J.: 2000b. Tillage erosion on slopes with soil conservation structures in the Ethiopian Highlands. *Soil & Tillage Research,* 57, 3: 115-127.

NYSSEN J., MITIKU HAILE, POESEN J., DECKERS J., MOEYERSONS J., 2001. Removal of rock fragments and its effect on soil loss and crop yield, Tigray, Ethiopia. *Soil Use and Management,* 17: 179-187.

NYSSEN J., POESEN J., MOEYERSONS J., LUYTEN E., VEYRET-PICOT M., DECKERS J., MITIKU HAILE, GOVERS G. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 12 :1267-1283.

NYSSEN J., POESEN J., MOEYERSONS J., DECKERS J., MITIKU HAILE, LANG A., 2004a. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean Highlands – a state of the art. *Earth Science Reviews,* 64, 3-4: 273-320.

NYSSEN J., VEYRET-PICOT M., POESEN J., MOEYERSONS J., MITIKU HAILE, DECKERS J., GOVERS G. 2004b. The effectiveness of loose rock check dams for gully control in Tigray, northern Ethiopia. *Soil Use and Management* 20: 55-64.

NYSSEN J., POESEN J., VEYRET-PICOT M., MOEYERSONS J., MITIKU HAILE, DECKERS J., DEWIT J., NAUDTS J., KASSA TEKA, GOVERS G., 2005a. Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from Northern Ethiopia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 2 : 167.

NYSSEN J., VANDENREYKEN H., POESEN J., MOEYERSONS J., DECKERS J., MITIKU HAILE, SALLES C., GOVERS G., 2005B. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands. *Journal of Hydrology,* 311: 172-187.

VANCAMPENHOUT K., NYSSEN J., DESTA GEBREMICHAEL, DECKERS J., POESEN J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS J., 2005. Stone bunds for soil conservation in the northern Ethiopian highlands: impacts on soil fertility and crop yields. *Soil & Tillage Research,* sous presse.

INFLUENCE DES SYSTÈMES DE TRAVAIL DU SOL SUR LES PROPRIÉTÉS DES SOLS EN ZONES SEMI-ARIDES DU MAROC

Rachid MRABET*, Abderrahim ESSAHAT et Rachid MOUSSADEK*****

** Institut national de la recherche agronomique (INRA), Centre régional de la recherche agronomique de Tanger, 78 boulevard Sidi Mohamed Ben Abdellah, Tanger, 90000 Maroc, tél.: +212 39 93 80 33, fax +212 39 93 66 81 ; rachidmrabet@gmail.com*

*** Centre régional de la recherche agronomique de Meknès, B.P. 578, Meknès VN, 50000 Maroc*

**** Centre régional de la recherche agronomique de Rabat, B.P. 415, Rabat, 10000 Maroc*

Abstract

Environmental and economical benefits from reducing tillage in production systems are enhancing adoption of no-tillage practices in the world. Undesirable effects of intensive conventional tillage systems on soil properties and processes are well documented. Potential improvement of soil quality under no-tillage systems is under intensive research. Among the soil quality improvement, it is agreed that no-tillage systems help reducing soil erosion, increasing soil cohesion and aggregation, enhancing organic carbon content and facilitating water flow in soil profile.

In semi-arid Morocco, though plow-based tillage systems are still the most common, no-tillage research started in early 1980s emphasizing on water conservation, crop productivity improvement and soil quality build-up. Experiment results have shown that on rich clay soils and in dry years, no-tillage systems favored higher cereal yields than conventional tillage systems. Among other desirable and pertinent results, it was found that no-tillage systems increased levels of total and particulate organic matter, water and wind stable aggregates and nutrients (phosphorus, nitrogen, potassium) and permitted higher capacity to store available water in seed-zone. Nevertheless, no-tillage effects became less pronounced with increased profile depth. In addition, no-tillage practices reduced soil water evaporation while improved water level and entry in soil surface. In other side, no-tillage systems did not have significant influence on soil temperature, pH, bulk density, calcium and magnesium content and cation exchange capacity. Consequently, no-tillage systems provided better soil features than commonly used tillage systems.

Keywords : *No-tillage* ; *Soil Quality* ; *Water Conservation* ; *Sustainability* ; *Carbon sequestration* ; *Morocco*.

INTRODUCTION : DES RAISONS MAJEURES ET VITALES POUR GERER DURABLEMENT LE SOL

Le sol est la base spatiale du développement socio-économique, industriel et agricole de tout pays, dont le Maroc. Cependant, il est soumis à des contraintes très fortes dont les plus importantes sont la désertification, l'aridité et la salinité (Mrabet, 2003a). La première fonction concernée par les dégradations du sol est la fonction de la production agricole. Le défi majeur du secteur agricole est double : assurer une sécurité alimentaire pour une population à fort taux démographique et amortir la dégradation des ressources naturelles. En effet, à une série de conditions socio-économiques caractérisée par la fragilité du tissu social, la pauvreté, la démographie, l'exode, s'ajoutent des conditions naturelles difficiles : sécheresse, érosion, dégradation des sols, etc. Il s'ensuit ainsi une désertification intense, une baisse d'aptitude culturale des sols, aggravées par les mauvaises pratiques agricoles : labour, préparation des sols, pâturage, exportation de la paille, systèmes de cultures...

Pendant des décennies, l'agriculteur marocain croyait que le labour représentait le seul moyen pour créer un état de sol favorable à la croissance, au développement et à la production des cultures. Cependant, l'utilisation excessive et inadaptée de divers instruments de labour se faisait au détriment de la fertilité des sols, qui se trouvent dégradés à long terme. En effet, pendant plus de 4 000 ans, l'homme a travaillé le sol sans avoir eu une explication scientifique de sa nécessité.

L'agriculteur marocain, pour faire face à des insuffisances techniques, économiques et foncières, s'oriente vers une exploitation maximale du disponible végétal. Ainsi, après des décades d'utilisation des terres, le sol se trouve dépourvu de matière organique et présente une structure dégradée facilement transportable. L'élevage extensif basé sur le pâturage des chaumes, les travaux du sol tardifs d'automne ou précoces d'été, le faible recyclage des résidus de récolte, voire même des racines, ont induit des pertes énormes du patrimoine sol, une pollution de l'air et une sédimentation et contamination des eaux de surface à l'échelle nationale. En plus, les milieux arides et semi-arides marocaines reçoivent de moins en moins d'eau de pluies en raison des changements climatiques planétaires (Balaghi *et al.*, 2007). En d'autres termes, le déclin du potentiel de productivité des terres agricoles est le résultat d'une dégradation accélérée du sol qui déstabilise l'écosystème et pulvérise la qualité physique et physico-chimique du sol. Cet état des lieux est simplement l'illustration du dysfonctionnement de la politique agricole nationale.

Au Maroc, le travail du sol et d'autres pratiques (pâturage, exportation de résidus…) baissent le niveau de fertilité et le taux de matière organique des sols. Ce qui empêche l'incorporation de matériel organique en quantité suffisante dans le sol (Mrabet, 2001a) et contribue à la dégradation de la structure des sols. La destruction progressive de la qualité des sols résulte d'abord de la logique du profit du court terme, qui prime sur les besoins des générations futures. Il est donc judicieux de revoir les techniques culturales en cherchant des systèmes de gestion agricoles qui permettent une agriculture durable et techniquement acceptable, en augmentant et stabilisant les rendements, tout en préservant les ressources en sols (Mrabet, 2001b). De plus en plus, les agronomes et les producteurs remettent en cause les techniques conventionnelles de travail du sol. Plusieurs stratégies

agricoles basées sur la réduction du labour ont été envisagées et sont connues comme étant les systèmes de labour de conservation ou agriculture de conservation. Ces systèmes englobent les travaux réduits du sol jusqu'aux cultures en semis direct.

Les recherches menées au Maroc ont montré que le semis direct augmente le rendement du blé par rapport au travail du sol conventionnel (Bouzza, 1990 ; Kacemi, 1992 ; Mrabet, 1997 et 2002b). Cette augmentation du rendement est due à l'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau (Kacemi *et al.*, 1995 ; Mrabet, 2000) et de la qualité du sol (Bessam et Mrabet, 2001 et 2003b ; Mrabet *et al.*, 2001a, 2001b, 2002a, 2007a et 2007b). Ce système encore peu connu au Maroc, pourrait offrir des solutions aux problèmes que connaît l'agriculture, surtout dans les zones à faible pluviométrie. Le présent article présente une synthèse des résultats majeurs sur les impacts des systèmes de travail du sol, dont le semis direct, sur les paramètres de la qualité des sols.

1. AGRICULTURE DE CONSERVATION : CONCEPTS NOVATEURS DE GESTION DURABLE DU SOL ET DE L'EAU

L'agriculture de conservation promet différents bénéfices écologiques à différentes échelles (locale, régionale et mondiale) aussi bien pour l'agriculteur que la société. Elle cible une agriculture moins mécanisée et plus écologique, nécessitant une nouvelle mentalité (Derpsch, 2005). Elle est un concept basé sur le maintien d'une couverture de résidus à la surface du sol, le choix des rotations et la réduction ou l'élimination du travail du sol. Elle repose sur des technologies déjà connues telle que le zéro labour ou semis direct. L'importance de l'agriculture de conservation réside dans son potentiel à générer des gains plus importants et plus stables, tout en préservant la qualité des ressources naturelles : sol, eau et atmosphère.

Le système du semis direct vise à reproduire des processus naturels en se basant sur quatre principes :

- le non-remaniement du sol entre la récolte et le semis ;
- le maintien permanent d'une couverture de résidus de récolte ;
- le semis direct dans un sol non perturbé et couvert de résidus, en créant une simple fente pour déposer l'engrais et la semence aux profondeurs désirées ;
- et le désherbage chimique pour lutter contre les adventices.

À l'échelle mondiale, il y a actuellement un retour vers la simplification des techniques culturales pour remédier à la dégradation des sols et maintenir leur évolution naturelle. En effet, l'adoption de nouveaux systèmes de travail du sol dits de conservation connaît une évolution rapide (100 millions d'hectares en 2005). En effet, on assiste depuis plus d'un demi-siècle, à une évolution technique dans les systèmes de travail du sol où les labours et les préparations des lits de semences laissent leur place à des semis directs pour maintenir la qualité des sols (Lal, 2007a). Ces technologies conservatrices de l'eau et du sol sont déjà adoptées dans les pays industrialisés d'Amérique pour diminuer les effets des aléas climatiques érosifs des terres. Toutefois, dans les pays en voie de développement,

les recherches et les études sur la conservation de l'eau et du sol restent très limitées et fragmentaires, à l'exception de l'Amérique latine (Lal, 2007b).

2. QUALITÉ PHYSIQUE DU SOL : POUR RÉTABLIR L'HARMONIE ENTRE SOLS ET CULTURES AU MAROC

2.1. Agrégation du sol

Dans les systèmes d'exploitation agricole mécanisés, le sol est sous régime de culture intensive et présente une structure extrêmement instable. En régime de semis direct, la seule cause de variation d'état physique du sol reste la structuration naturelle sous l'effet des cultures, du type d'aménagement, de la variation d'humidité et des conditions climatiques.

Le semis direct 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, les réactions physico-chimiques, etc. Il protège le sol contre la dégradation et contribue à la bonne santé des cultures.

L'arrêt du travail du sol, par le semis direct, transforme les sols en « puits » de carbone et assure ainsi une stabilité structurale et une richesse biochimique du sol par l'accumulation d'un taux important en matière organique. Cette dernière recycle en permanence la fertilité du sol par ses remontées biologiques, améliore la cohésion et l'agrégation et réhabilite les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du sol (porosité, rétention d'eau, drainage).

Dans le semi-aride marocain, Lahlou et Mrabet (2001) ont montré que le semis direct a permis une augmentation de la stabilité structurale d'un sol argileux essentiellement près de la surface au bout de quatre années d'expérimentation seulement. Dans l'horizon de surface (0 cm-2,5 cm), le pourcentage des agrégats stables est passé de 48 % sous labour conventionnel à 56 % sous condition de non-labour, avec une couverture (par des résidus de culture) de 50 %. En plus, les résidus de récoltes en surface ont amélioré davantage cette stabilité structurale, qui est passée à 65 % sous condition de non-labour, avec une couverture de 100 %. Le semis direct a induit une stratification des agrégats stables en surface, l'indice de stratification est plus élevé sous condition de non-labour que sous labour conventionnel.

En d'autres termes, l'apport de résidus de récolte en condition de non-labour améliore la stabilité structurale d'un sol calcimagnésique vertique (v. tab. 1). Ce résultat ne peut que renforcer les données acquises par Kacemi (1992). Après onze ans d'expérimentation, Mrabet *et al.* (2001a) ont trouvé une importante amélioration de l'agrégation d'un sol argileux, mesurée en terme de pourcentage d'agrégats secs et hydro-stables en conditions de semis direct par rapport au travail du sol conventionnel.

Tab. 1. Influence de travail du sol et du taux de résidus sur le pourcentage d'agrégats hydrostables après 4 ans d'expérimentation (Lahlou et Mrabet 2001).

Travail du sol	Horizons en cm et agrégats stables en %		
	0-2.5 cm	2.5-7 cm	7-20 cm
Non-labour NL_0	52b	40c	42a
Non-labour NL_{50}	56b	47b	46a
Non-labour NL_{100}	65a	51a	45a
Pulvériseur à disques	48c	45b	44a
Moyenne	56	46	44

NL_0 : sans résidus (sol nu) ; NL_1 : 50 % de résidus ; NL_2 : 100 % de résidus.
Les valeurs suivies de la même lettre sont identiques à 5 %.

2.2. Hydrodynamique du sol et contrôle de l'érosion et du ruissellement : amélioration de l'image de marque de l'agriculture

Les phénomènes d'érosion sont caractéristiques du paysage agricole marocain (Merzouk, 1985). En outre, la sensibilité du sol à l'érosion ou érodibilité est liée à la stabilité des agrégats (Mrabet *et al.*, 2004). Les effets de la suppression du travail du sol et du maintien du couvert végétal sur l'érosion hydrique sont généralement positifs. La couverture du sol par les résidus de culture, 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. L'effet bénéfique du *mulch* de protection des sols vis-à-vis de l'impact des gouttes d'eau de pluie ou du vent n'est plus à démontrer (Mrabet, 2006).

La conservation des sols est un facteur capital pour garantir une agriculture durable dans les zones semi-arides. Le semis direct en présence d'une couverture de résidus de récolte en surface détermine les caractéristiques hydrodynamiques et hydriques du sol. En effet, ces résidus permettent de dissiper l'énergie cinétique des gouttes de pluie et diminuent le ruissellement (Mrabet et Beqqali, 2005) avant d'atteindre la surface du sol, préservant la rugosité du sol et évitant la formation d'une croûte de battance. La protection de la surface du sol et l'amélioration de l'infiltration de l'eau ont pour conséquence une réduction importante de l'érosion (quantité et vitesse).

Les températures élevées dans les régions semi-arides marocaines entraînent d'importantes pertes en eau par évaporation, qui peuvent atteindre 80 % des précipitations. 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 plus les chutes de pluie. Pour des profondeurs de 10 cm à 15 cm, une diminution de température de 1 °C à 5 °C a été observée durant le cycle du blé sous condition de non-labour par rapport au travail du sol conventionnel.

Toutes ces améliorations (augmentation de l'infiltration, diminution de l'évaporation…) entraînent assurément une amélioration du stockage de l'eau dans le sol. En effet, Bouzza (1990) a trouvé que le maintien de résidus en surface dans les conditions de non-labour a pu faire passer le stock d'eau du sol de 50 mm à 85 mm en comparaison avec un sol dont les résidus sont incorporés par travail du sol, et que, lors des années sèches, les faibles quantités d'eau stockée permettaient un rendement meilleur par rapport au travail du sol conventionnel, à cause d'une meilleure utilisation d'eau par la culture durant son cycle de développement.

Mrabet (1997) a montré que sous condition de non-labour avec résidus en surface, le stock d'eau dans le sol a été amélioré par rapport au labour conventionnel aussi bien en régime sec qu'en régime irrigué (tab. 2). Le non-labour a permis de maintenir l'humidité du sol en dessous du point de flétrissement 8 jours de plus par rapport au travail du sol au chisel (avec 40 % de couverture par les résidus) et de 23 jours par rapport à la charrue à disques, en régime humide, alors qu'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.

Tab. 2 : Nombre de jours nécessaires pour atteindre le point de flétrissement après apport d'eau dans les 10 premiers centimètres en fonction du type de travail du sol (Mrabet 1997)

Travail du sol	Régime humide Apport de 77 mm d'eau	Régime sec Apport de 35 mm d'eau
Non labour	39	25
Chisel	31	11
Rotavator	24	10
Pulvériseur à disques	26	9
Sweep à lames en V	17	8
Charrue à disques	16	0

L'humidité au point de flétrissement est de 0,16g/g^{-1}.

Un paillis de résidus organiques fournit de la matière organique au sol lors de sa décomposition par les agents climatiques et biologiques. Cette dernière est progressivement incorporée dans l'horizon de surface et l'enrichit au cours des cycles de culture. Ce phénomène entraîne une modification de la géométrie des pores et une stabilisation de la structure du sol (Lahlou *et al.*, 2005), qui, à leur tour, modifient la conductivité hydraulique et la sorptivité du sol, surtout quand les résidus sont laissés à la surface du sol.

3. QUALITÉ CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DU SOL : REMISE EN CAUSE FONDAMENTALE DE LA MANIÈRE DE CULTIVER

L'augmentation de la matière organique en surface accroît la résistance des micro-agrégats et la protection des matières organiques; lesquelles augmentent la stabilité des agrégats où elles se trouvent, et les agrégats, plus stables, à leur tour, protègent les matières organiques qui y sont incorporées, établissant ainsi des relations réciproques entre dynamique de la matière organique et stabilité de l'agrégation (autorégulation, autoprotection).

3.1. Matière organique totale ou agriculture du carbone : le semis direct assure la réduction de la consommation de l'humus et l'augmentation de sa synthèse

La dégradation biologique du sol est liée à la perte en matières organiques. Grâce à ses propriétés chimiques, la MO du sol joue un rôle capital dans le fonctionnement des agrosystèmes et constitue une composante importante de la fertilité des sols.
Dans les zones semi-arides marocaines, les sols ont, typiquement, des teneurs faibles en MO et une structure peu développée qui ne permettent que des taux faibles d'infiltration (Ryan *et al.*, 2006).
Le travail du sol (labour, déchaumage, préparation des lits de semences) conditionne la dynamique des matières organiques et leur distribution dans le profil cultural. La minéralisation, le stockage et la distribution du carbone et des éléments nutritifs sont étroitement liés à la gestion des résidus de récolte par l'outil ou la succession des outils aratoires. En d'autres termes, l'incorporation ou non des résidus de récolte affecte le contenu, la localisation et la qualité de la matière organique dans le profil (Mrabet, 2006).

Les pratiques du travail du sol conventionnel et d'exportation de résidus de récolte provoquent une réduction de la MO du sol en raison de sa décomposition accélérée dans la couche arable, affectant ainsi défavorablement les propriétés du sol. En effet, lors du travail du sol, les agrégats sont disloqués et le sol devient plus aéré, la MO du sol ainsi déprotégée subit une minéralisation progressive par les microorganismes du sol empêchant, par conséquent, son accumulation.
Les résidus de culture sont une source importante de nourriture pour les micro-organismes du sol. Un paillis de résidus déposé à la surface du sol augmente le pool de MO décomposables qu'utilisent les micro-organismes pour obtenir de l'énergie pour leur biosynthèse. Cette décomposition a entraîné une hausse importante des teneurs en carbone total dans le sol jusqu'à 7 cm de profondeur au bout de onze ans de culture avec résidus, sous un climat semi-aride au Maroc. En effet, une augmentation de 13 % de MO a été enregistrée sous semis direct, alors que sous le labour conventionnel, la séquestration du carbone était négligeable (3 %) (Mrabet *et al.*, 2001a). Cette amélioration est significative dans l'horizon (0 cm-2,5 cm), alors que dans les horizons plus profonds, aucune différence significative n'a été enregistrée. 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, 2002a).

Dans une autre expérience, sous non-labour, avec une couverture de résidus de 50 %, le carbone organique total a augmenté de 20 % dans les cinq premiers centimètres, au bout de la cinquième année seulement (tab. 3 ; Ibno Namr et Mrabet, 2004 ; Ibno-Namr, 2005).

Tab. 3 : Effet du travail du sol et de la gestion des résidus en semis direct sur le carbone organique (C_O), l'azote total (N_T), le carbone (C_P) et l'azote (N_P) particulaires d'un sol argileux (Sidi El Aydi, Maroc) après 6 années d'expérimentation (Ibno-Namr 2005).

Technique	Mg Ha^{-1}			
	C_O	N_T	C_P	N_P
Semis direct sur paillis d'une tonne par ha	47,7 a*	4,12 a	23,2 a	2,16 a
Semis direct sans paillis	44,4 b	4,06 a	19,9 b	1,96 b
Travail du sol au cultivateur	44,1 b	3,89 b	20,1 b	1,85 c
Moyenne	45,4	4,02	21,1	1,99

* Sur une tranche de 0-20 cm.
N.B. : Dans une même colonne, les valeurs suivies de la même lettre sont statistiquement similaires (LSD, 5 %).

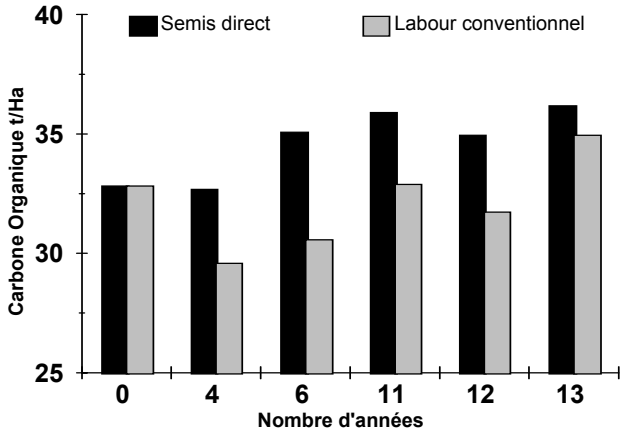


Fig. 1. Variation temporaire de la teneur en carbone organique dans l'horizon 0 cm-20 cm, sous semis direct et labour conventionnel (Bessam et Mrabet, 2003).

Sous semis direct, la production de matière organique est continue (fig. 1) et elle conduit à un sol biologiquement actif. Par contre, le travail du sol interrompt ce cycle et accélère la minéralisation de la matière organique.

L'accroissement de la MO du sol en semis direct provient des résidus de culture laissés sans manipulation. L'augmentation des teneurs en MO provient aussi en

partie de la dégradation du système radiculaire de la culture, très développé en surface, sous semis direct, avec paillis de résidus. Par ailleurs, la forte réduction du ruissellement et, donc, de l'érosion empêche la perte de cette MO par écoulement de surface.

Selon Ibno-Namr et Mrabet (2004) et Ibno-Namr (2005), l'addition des résidus sous semis direct a permis une amélioration sensible des contenus de la surface du sol en carbone organique (C_O) et azote total (N_T) (tab. 3). Par contre, l'exportation totale des résidus a négativement affecté ces paramètres et qui sont à des niveaux égaux ou même inférieurs à ceux mesurés sous labour conventionnel. Le maintien des résidus en surface est nécessaire pour la réussite du semis direct.

3.2. Matière organique particulaire

Le premier constituant touché par le travail du sol est la diversité biologique. La matière organique particulaire (MOP), fraction labile, est constituée de fragments de racines et de débris de végétaux. Elle constitue plus de 10 % du carbone organique total du sol. Cette fraction, facilement biodégradable par les micro-organismes, est plus sensible aux changements de l'environnement du sol. La MOP non protégée est la fraction entre 53 et 2000 µm libre et la MOP protégée la fraction de 53 µm à 250 µm qui se trouve à l'intérieur des micro-agrégats. L'incorporation de la MOP dans des microagrégats, liée chimiquement aux surfaces des agiles, semble être le principal processus de protection de matière organique du sol.
Dans le semi-aride marocain et au bout de onze ans, la teneur en MOP a été augmentée dans les horizons 0 cm-2,5 cm (4,11 %) sous condition de non-labour par rapport au labour conventionnel (2,68 %). Dans les horizons inférieurs (2,5 cm-20 cm), elle était inférieure sous condition de non-labour, à cause probablement de l'enfouissement des résidus par le travail du sol et qui ont probablement été accumulés à la base de la couche labourée, au cours du temps (Mrabet *et al.*, 2001a ; Bessam et Mrabet, 2004).

Le *mulch* de résidus associé au semis direct agit sur la fertilité du sol en enrichissant en MO la couche de surface (stratification) et en stimulant son activité biologique (Bessam et Mrabet, 2003). En effet, le paillis favorise l'accumulation de la fraction labile de la MO (tab. 3) et, par conséquent, le développement de micro-organismes adaptés, le plus souvent, favorable à la culture, qui active la dégradation de la matière organique dans le sol et sa biodisponibilité. Il permet également le développement d'une macrofaune, qui crée une macroporosité importante tout en incorporant la matière organique du paillis dans le sol et en homogénéisant sa distribution (Mrabet et Beqqali, 2005).

3.3. Éléments nutritifs

Mrabet *et al.* (2001b) ont trouvé que sous semis direct, le sol s'enrichit en azote, en phosphore et en potassium affectant positivement sa disponibilité pour la culture. Cette amélioration a été enregistrée dans les horizons superficiels, alors qu'en profondeur (7cm-20 cm), P et K disponibles ont diminué (tab. 3).

3.3.1. Azote total (Nt) et particulaire (Np)

L'azote est un élément majeur très important dans la nutrition des plantes. Il influence la minéralisation de la matière organique qui fournit le carbone et

l'énergie indispensables à la biologie du sol. En plus, il y a libération de N à partir de cette minéralisation.

Mrabet *et al.* (2001a) ont trouvé que le non-labour a permis une amélioration de l'azote totale (Nt), dans l'horizon 0 cm-7 cm, par rapport au labour conventionnel ; dans l'horizon 7 cm-20 cm, cette différence n'était pas significative. Le contenu de la MOP en azote (Np) a été amélioré par l'apport des résidus sous semis direct (tab. 3).

3.3.2. Phosphore (P)

Le phosphore (P) est le deuxième élément majeur (après l'azote) dans la nutrition des plantes. Il joue un rôle important dans la fertilité des sols. Mrabet *et al.* (2001b) ont trouvé que sous agriculture de conservation, le sol s'enrichit en phosphore, affectant positivement sa disponibilité pour la culture. Cette amélioration a été enregistrée dans les horizons 0 cm-2,5 cm et 2,5 cm-7 cm, alors qu'en profondeur (7 cm-20 cm), le P disponible a diminué. Ceci a engagé les chercheurs à construire des semoirs semis direct combinés spéciaux (Mrabet, 2001a).

3.3.3. Potassium (K)

Le potassium est un élément indispensable pour le développement des plantes. Il entre dans la constitution de la chlorophylle, il joue un rôle est important dans le métabolisme des plantes. Les carences en cet élément dans les sols argileux sont rares.

Les teneurs en K sont influencés par la gestion des sols et des cultures. En effet, l'amélioration de K échangeable dans les conditions de non-labour était positivement corrélée au taux de matière organique du sol. Les résidus de récolte en surface sont responsables de cette séquestration. En effet, dans les horizons 0 cm-2,5 cm et 2,5 cm-7 cm, le non-labour a permis de séquestrer plus de K, respectivement 67 % et 27 % de plus par rapport au labour conventionnel, mais 16 % de moins dans l'horizon 7 cm-20 cm. Cette diminution de la teneur en K dans l'horizon 7 cm-20 cm peut être expliquée par l'exportation plus importante sous condition de non-labour.

3.3.4. Le pH du sol

Le pH, facteur important de la qualité du sol, contrôle les échanges chimiques et influence, par conséquent, la disponibilité des éléments nutritifs du sol. Dans un essai de onze ans au Maroc, Mrabet *et al.* (2001b) ont trouvé une diminution de 0,2 unité pH_{eau} sous condition de non-labour par rapport au labour conventionnel, dans l'horizon 0 cm-2,5 cm. Cette valeur était estimée très importante pour les sols calcaires en terme de disponibilité des éléments nutritifs pour les céréales, particulièrement en N et P. Ces résultats sont confirmés par Ibno-Namr et Mrabet (2004) et Ibno-Namr (2005).

Mrabet *et al.* (2001b) ont postulé que sous semis direct, les apports de fertilisants doivent être modifiés par rapport aux apports en conditions conventionnelles du labour. En effet, le sol s'enrichit en P, N et K et s'acidifie. C'est un état critique qui peut affecter la disponibilité en éléments nutritifs (pompe biologique). L'amélioration des niveaux des éléments nutritifs sous condition de non-labour suggère une

révision à la baisse des recommandations de fertilisants sous ces systèmes de conservation, du moins à moyen terme.

3.3.5. Capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables

À l'exception d'une réduction du niveau du magnésium dans les conditions de semis direct, les autres bases échangeables et la CEC n'ont pas été affectées par le système de travail du sol après quinze années d'expérimentation (tab. 4).

Tab. 4: Influence du système de travail du sol sur la capacité d'échange cationique (CEC) et les bases échangeables dans la zone de semis (0-5cm) d'un sol argileux gonflant (Sidi El Aydi, après quinze ans d'expérimentation)

Travail du sol	meq/100g				
	CEC	Ca^+	Mg^+	Na^+	K^+
Semis direct	48,5a	62,8a	6,85b	0,36a	1,64a
Travail du sol	48,6a	63,5a	9,29a	0,41a	1,09b
Average	48,5	63,2	8,07	0,38	1,36

N.B. : Dans une même colonne, les valeurs suivies de la même lettre sont statistiquement similaires (LSD, 5 %).

4. POROSITÉ ET COMPACTION : MEILLEURE RÉCUPÉRATION DE LA QUALITÉ PHYSIQUE DU SOL

La qualité du sol est définie comme étant la capacité du sol à fonctionner dans la limite de l'écosystème et en interaction positive avec l'environnement extérieur (Lahmar et Ribaut, 2001). En effet, comme montré dans les paragraphes précédents, le semis direct permet une réhabilitation de la qualité chimique et biologique du sol en améliorant le stockage de la matière organique et sa protection. Le semis direct apporte également une amélioration de la qualité physique du sol, à savoir les indices relatifs à l'agrégation, l'hydrodynamique, la compaction, les échanges de matière et de gaz et le régime thermique. À moyen terme, le semis direct aide à une réduction de la compaction des sols, principalement liée à une réduction des passages de la machinerie.

Le semis direct est reconnu causer une consolidation du sol en surface (0-15 cm) par rapport au travail conventionnel du sol (fig. 2). En effet, Mrabet et El-Brahli (2005) ont conclu qu'après quatre années d'expérimentation du semis direct, le sol de la station de Sidi El Aydi s'est compacté plus en surface que quand il est travaillé. Toutefois, ce phénomène de compaction a disparu après six années (Lahlou *et al.*, 2005). Il faut cependant remarquer une compaction dans l'horizon sous-jacent qui reflète la formation de la semelle du labour.

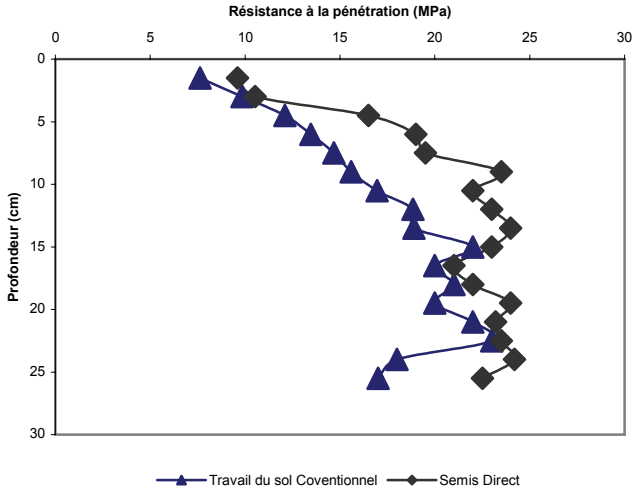


Fig. 2. Effet du système de travail du sol sur la pénétrabilité d'un sol argileux gonflant (données non publiées)

5. FAISABILITÉ SOCIALE ET ÉCONOMIQUE DU SEMIS DIRECT : PLUS GRANDE IMPLICATION DE L'AGRICULTEUR

Si le système de semis direct présente 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'adoption des systèmes de semis direct au Maroc peut être retardée par un contexte défavorable : manque d'associations d'agriculteurs, compétition avec le bétail dans l'utilisation des résidus de récolte (relation agriculture-élevage et pâturage) ; accès réduit aux intrants de qualité et aux équipements; appui insuffisant de la part des institutions en raison d'un manque de connaissances sur le semis direct, gestion du foncier, droits et pratiques agraires usuels; droits d'utilisation de la terre peu durables; politiques inopportunes qui favorisent les pratiques conventionnelles, politiques trop pro-urbaines ; infrastructures rurales inadéquates et manque d'accès aux marchés.

En semis direct, la suppression du travail du sol nécessite une utilisation renforcée des herbicides. L'emploi des herbicides exige un coût 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 semis direct peuvent être envahies par les adventices (Mrabet, 2001a et 2001b).

Les activités d'élevage au Maroc constituent une contrainte souvent mentionnée à l'adoption de ce système. Ainsi, les systèmes de semis direct 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 (Mrabet, 2001c et 2007a). En effet, l'application du semis direct dans ces zones peut aussi se heurter à des

résistances culturelles et historiques dues à une très ancienne pratique du labour et à l'accoutumance au pâturage des chaumes en été (Mrabet, 2007b).

Pour encourager l'adoption par les agriculteurs et l'acceptation par les décideurs, il est donc nécessaire de réaliser une analyse à l'échelle des unités de production, en considérant en simultané les avantages agronomiques visés, la possibilité d'intégration du semis direct au sein des systèmes d'exploitation (équipement, main d'œuvre, intrants, élevage) et la rentabilité économique, financière et écologique.

CONCLUSIONS : TRANSFORMER LES BARRIÈRES DE DÉVELOPPEMENT EN OPPORTUNITÉS DE PROGRÈS

L´image qui ressort de la présente analyse est bien celle de l´urgence mais aussi celle de la complexité. L'agriculture de conservation offre une alternative aux problèmes causés par l'agriculture conventionnelle. Son importance réside dans son potentiel à améliorer la qualité des ressources naturelles : sol, eau et atmosphère, tout en générant des gains importants et stables en terme de rentabilité et de production agricole.

L'agriculture de conservation, par le maintien des résidus de récolte en surface, permet de protéger le sol contre l'érosion, de diminuer la température, d'augmenter le stockage de l'eau dans le sol et d'améliorer la structure, tout en augmentant les rendements des cultures. Les résidus sont aussi une source importante d'éléments nutritifs dans le sol. Ils augmentent le niveau de la matière organique ainsi que celui d'autres éléments (N, P et K…) dans le sol.

La matière organique du sol est un indicateur important de la qualité des sols, puisqu'elle intervient à plusieurs niveaux en améliorant l'agrégation et en fournissant énergie et nutriments à la biomasse du sol. Elle fournit aussi les éléments nutritifs pour les cultures, améliorant ainsi la fertilité physique; chimique et biologique du sol. L'élimination du travail du sol transforme les sols en « puits » de carbone et d'autres éléments nutritifs, en les séquestrant et en créant leur stratification dans le sol. Ainsi, les couches près de la surface seront plus riches que celles de la profondeur. Cette séquestration permet aussi de préserver l'environnement en diminuant le transfert des éléments vers les eaux de surface et de profondeur ou vers l'atmosphère par les émissions de dioxyde de carbone et d'azote (Mrabet *et al.*, 2003).

Pour le Maroc, l'agriculture de conservation présente une alternative pour le développement de l'agriculture, secteur vital pour l'économie et la société. Elle permettra d'assurer une production et une rente acceptables et durables pour les agriculteurs, tout en leur évitant de changer d'activité ou de migrer pour survivre. Son impact positif sur l'environnement permettra de préserver les ressources naturelles du pays. Le semis direct est une alternative incontournable pour les milieux arides et semi-arides marocaines. C'est un système de gestion écologique du sol qui permet d'améliorer simultanément la production agricole et la qualité du sol. Cet article confirme très clairement que le semis direct permet à l'agriculteur à la fois de mieux tirer parti de son milieu physique en préservant et améliorant sa fertilité, comme de mieux s'adapter aux fluctuations climatiques et surtout

économiques en constante mutation. Cependant, il faut remarquer qu'il existe un coût supplémentaire de la technique dû à la mobilisation d'une partie des résidus au détriment du bétail, à l'adaptation de l'équipement et à la lutte contre les adventices.

Références bibliographiques

BALAGHI R., JLIBENE M., TYCHON B., MRABET R., 2007. Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 18, 3 : 169-76.

BESSAM F. & MRABET. R., 2001. Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixeroll in a semiarid area of Morocco. In: GARCIA-TORRES *ET AL.* (eds.), 2001. *Proceedings of First World Congress on Conservation Agriculture*. Madrid. October 1-5, 281-286.

BESSAM F., MRABET R., 2003. Long-term changes in soil organic matter under conventional and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use & Management* 19, 2 : 139-143.

BOUZZA A. 1990. *Water conservation in wheat rotations under several management and tillage systems in semiarid area*s. PhD. Dissertation University of Nebraska, Lincoln, NE USA, 200 pp.

DERPSCH R. 2005. The extent of Conservation Agriculture adoption worldwide: Implications and impact. III World Congress on Conservation Agriculture: *Linking Production, Livelihoods and Conservation*, 3rd to 7th October 2005, Nairobi, Kenya. 15 pp.

KACEMI M. 1992. *Water conservation, crop rotations, and tillage systems in semiarid Morocco*. Ph.D. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 200 pp.

KACEMI M., PETERSON G. A., MRABET R., 1995. Water Conservation, Wheat-Crop Rotations and Conservation Tillage Systems in A Turbulent Moroccan Semi-Arid Agriculture. In: EL GHARROUS *et al.* (eds), *Proceedings of the International Dryland Agriculture Conference*. May 1994, Rabat, Morocco. 83-91.

IBNO-NAMR K., MRABET R., 2004. Influence of agricultural management on chemical quality of a clay soil of semi-arid Morocco. *Journal of African Earth Sciences*. 39, 3-5 : 485-489.

IBNO-NAMR K. 2005. *Effet à moyen terme du travail du sol, de la gestion des résidus de récolte et de la rotation céréalière sur la qualité chimique d'un sol calcimagnésique à caractère vertique dans le semi-aride marocain*. PhD Thesis, Faculty of Sciences, El Jadida, Morocco. 143 pp.

LAHLOU S., MRABET R., 2001. Tillage Influence on Aggregate Stability of a Calcixeroll Soil in Semiarid Morocco. In: GARCIA-TORRES *ET AL.* (eds), *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture.* Madrid, Spain. October 1-5, 2001: 249-254.

LAHLOU S., M. OUADIA O., MALAM ISSA Y., LE BISSONNAIS Y., MRABET R., 2005. Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine. *Etude et Gestion des Sols*. 12, 1 : 69-76.

LAHMAR R., RIBAUT J-P., 2001. *Sols et sociétés, regards pluriculturels*. Éditions Charles Léopold Mayer, 218 pp.

LAL R., 2007a. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res*. 93 : 1–12.

LAL R., 2007b. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. *Soil Till. Res*. 94 : 1–3.

MERZOUK A., 1985. *Relative erodibility of nine selected Moroccan soils as related to their physical, chemical and mineralogical properties*. PhD Thesis, University of Minnesota.

MRABET R., 1997. *Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semi-arid area of Morocco*. Ph.D. Dissertation. Colorado State University, Fort Collins, CO. USA, 220 pp.

MRABET R., 2000. Differential response of wheat to tillage management systems under continuous cropping in a semiarid area of Morocco. *Field Crops Research* 66, 2 :165-174.

MRABET R., 2001a. Le semis direct: Une technologie avancée pour une agriculture durable au Maroc. *Bulletin de transfert de technologie en agriculture* MADR-DERD, 76 : 4 pp.

MRABET R., 2001b. Le système de semis direct: pour une agriculture marocaine durable et respectueuse de l'environnement. Séminaire sur les aléas climatiques et politiques agricoles. Association marocaine de l'agro-économie (AMAEco). 24-25 Mai 2001. Rabat, Maroc. 337-348.

MRABET R., 2001c. No-Tillage System: Research Findings, Needed Developments and Future Challenges for Moroccan Dryland Agriculture. In. GARCIA-TORRES *ET AL.* (eds.), *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture*. Madrid, Spain. October 1-5, 2001, 2 : 737-741.

MRABET R., SABER N., EL–BRAHLI 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., 2002a. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil Till. Res.* 66 : 119-128.

MRABET R., 2002b. Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Experimental Agriculture* 38 : 237-248.

MRABET R., 2003a. Lutte contre sécheresse et la désertification en Afrique du Nord. Rapport d'expertise pour la commission économique pour l'Afrique (ONU), 36 pp.

MRABET R., 2003b. *Mediterranean Conservation Agriculture: A paradigm for cropping systems. 16th Triennial Conference of International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO-2003). 13-19th July, 2003*. Brisbane, Australia. 6 pp. (available on CD-Rom).

MRABET R., EL-BRAHLI A., BESSAM F., ANIBAT I., 2003. No-Tillage Technology: Research review of impacts on soil quality and wheat production in semiarid Morocco. *Options Méditerranéennes* 60: 133-138.

MRABET R., LAHLOU S., LE BISSONNAIS Y., DUVAL O., 2004. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées. *Bull. Réseau Erosion IRD* 23, 2 : 405-415.

MRABET R., BEQQALI M., 2005. Semis direct : une technique conservatrice de la qualité du sol. In Soudi *et al.* (édit.), *Proceedings Séminaire International Gestion environnementale de l'agriculture. Maîtrise des flux de matières et rationalisation des pratiques agricoles*., 9-10 Juin 2005, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc : 121-140.

MRABET R., EL BRAHLI A., 2005. Soil and crop productivity under contrasting tillage management systems in semiarid Morocco. III World Congress on Conservation Agriculture: *Linking Production, Livelihoods and Conservation*, 3rd to 7th October 2005, Nairobi, Kenya, 6 pp.

MRABET R., 2006. Soil quality and carbon sequestration: Impacts of no-tillage systems. *Options Méditerranéennes* 69 : 43-55.

MRABET R., 2007a. *Conservation agriculture in Morocco: A research review. International Workshop Conservation agriculture for sustainable land management to improve the livelihood of people in dry areas*. ACSAD, FAO, GTZ, AAAID & UNEP. Damascus, May 7-9, 2007, 27 pp.

MRABET R., 2007b. No-tillage Research in Rainfed Areas of Morocco. Work Package 1.1 Report Mediterranean Platform. In: LAHMAR *ET AL.* (eds). KASSA Project. 21pp. ISBN 978-2-87614-646-4.

RYAN J., DE PAUW E., GOMEZ H., MRABET R., 2006. Chap. 15 - Drylands of the Mediterranean Zone: Biophysical Resources and Cropping Systems. In: PETERSON G.A. *et al.* (eds), *Dryland Agriculture* (2nd ed.). American Society of Agronomy Monograph 23 : 577-624.

STRATÉGIES DE LUTTE ANTIÉROSIVE INTRODUITES AU NORD-CAMEROUN

Boniface GANOTA* et Michel TCHOTSOUA**

** Doctorant en géographie, université de N'Gaoundéré ; ganotab@yahoo.fr*
*** Géographe, Professeur, université de N'Gaoundéré ; tchotsoua@yahoo.fr*
Avec le concours du réseau Érosion de l'Agence universitaire de la Francophonie

Abstract

The present study relates to the antierosive strategies introduced into the northern Province of Cameroon. From the field investigations in 30 villages, the authors propose to examine the reasons of the successes and failures of the antierosive structures introduced by the organizations of development and to make suggestions as for a better adoption of the aforesaid structures. The results show that in 17 of the 30 surveyed villages, the introduction made a success, more than 75% of the structures there are maintained and into the 13 others, the failures are significant with more 70%. The successes are justified by the tradition of fight against erosion, the financial motivation which makes it possible to the farmers to have a little money in period of welding, the good relations between popularizers and the peasants and the availability of the raw material, in particular stones. The failures are primarily the consequences of the repulsive behaviours of the popularizers, the embarrassment caused structures once installation, and especially, the lack of explanation of what the farmers will gain from the realization of such structures. As a whole, the ten years assessment of test of popularization remains mitigated in the surveyed villages.

Keywords : *Northern Cameroon* ; *Investigation* ; *Antierosional Structures* ; *Successes* ; *Failures*.

INTRODUCTION

La province du Nord est située en milieu soudanien à tendance humide (Suchel, 1972), avec une pluviométrie variant entre 1 200 mm/an et 1 400 mm/an. C'est un domaine où le ruissellement diffus est le plus généralisé (Mietton, 1988 ; Roose, 1989). Cette situation résulte, selon Albergel et Valentin (1989), de la dégradation du couvert végétal qui réduit l'infiltration du sol et augmente le ruissellement de l'eau. Cette dégradation et le ruissellement provoquent la chute permanente de l'état organique du sol et interdisent toute amélioration de la productivité végétale (Diatta, 1994). Au Cameroun, il faut ajouter à ce problème, qui prévaut depuis des années, le désengagement de l'état qui ne fournit plus des aides aux agriculteurs de même que la pression humaine de plus en plus forte dans les régions soudano-sahéliennes (Mainguet, 1991). Les champs sont alors cultivés en continu. En

conséquence, on enregistre une baisse drastique du rendement dans cette zone. Face à cette dégradation sans cesse croissante, nombreux sont les auteurs (Fournier, 1967 ; Roose, 1977) qui ont conclu qu'il était nécessaire de couvrir le sol pour lutter efficacement contre l'érosion.

Localisation de la zone d'étude

Bien que pour réduire l'érosion et parfois augmenter l'infiltration des eaux, les paysans de certains secteurs du Nord-Cameroun, depuis des siècles, réalisaient de cordons pierreux, des terrasses et de biefs avec des troncs d'arbres et branchages (Tchotsoua et Fotsing, 2006), face à la gravité du phénomène d'érosion, suite à l'introduction du coton et de la culture attelée, certains organismes tels que DPGT (Développement paysannal et gestion du terroir), TERDEL (Territoire et développement local) et ESA (Eau sol arbre) se sont penchés sur la question de l'érosion des sols et de la baisse de fertilité, en introduisant dans beaucoup de villages de nouvelles structures antiérosives, pour contrecarrer ce problème devenu inquiétant tant pour les pouvoirs publics que pour la population locale. Aussi, les bandes enherbées et boisées, les cordons pierreux et les seuils ont-ils été proposés aux agriculteurs. Si dans beaucoup de villages, elles sont facilement adoptées, dans d'autres, par contre, elles sont rejetées. Quelles peuvent être les raisons de ces réussites ou échecs observés ici et là ? Qu'est-ce qui peut contribuer à leur réussite ?

L'objectif de cet article est d'examiner les raisons des réussites et échecs de mise en place des structures antiérosives introduites par les organismes de développement et faire des suggestions quant à une meilleure adoption desdites structures.

1. MÉTHODOLOGIE

Les données exploitées pour cette étude ont été collectées à partir des enquêtes de terrain menées dans 30 villages répartis dans toute la province du Nord. Les enquêtes ont été conduites auprès d'un échantillon de 210 paysans et ont permis non seulement d'apprécier le niveau de réalisation, la qualité et la pérennisation des structures, mais aussi de connaître les raisons pour lesquelles l'introduction a été réussie ou non dans les différents villages étudiés. En outre, des visites des blocs aménagés ont été organisées avec l'aide des agents vulgarisateurs et des paysans qui ont effectivement réalisé les structures proposées. Lors de ces visites, les blocs ont été localisés à l'aide d'un GPS. Il en est de même des villages grâce aux cordonnées GPS pris dans la cour du chef. Les données recueillies codifiées et saisies dans un tableur *Excel* nous ont permis d'obtenir un certain nombre de résultats traduits en tableaux et histogrammes.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Mise en place et typologie des structures antiérosives introduites

La mise en place des structures antiérosives a commencé depuis 1995 avec le projet DPGT rattaché à la SODECOTON (Société de développement du coton) et a continué jusqu'aujourd'hui avec le projet ESA. Elle a concerné toute la partie nord du pays dans son ensemble. Chaque année, des villages-cibles sont choisis pour leur vulgarisation. Plusieurs types de structures ont été proposés par expérimentation aux paysans. Ce sont les bandes boisées, les bandes enherbées, les cordons pierreux et les biefs. Ce sont surtout les trois derniers types de structures qui ont été pérennisés dans les villages enquêtés : 14 villages pour les cordons pierreux, 6 pour les bandes enherbées et 10 pour les biefs.

Les bandes enherbées et boisées sont des espaces d'un mètre de largeur et de longueur variable, couverts d'herbes ou d'arbres. Elles sont réalisées perpendiculairement à la pente à l'intérieur d'une parcelle ou d'un bloc de parcelles d'exploitation. Les cordons pierreux sont des lignes de pierres de 30 cm de largeur, de 40 cm de hauteur et de longueur variable, réalisées également dans le sens perpendiculaire à la pente à l'intérieur d'une parcelle. Les biefs, quant à eux, sont des ouvrages maçonnés, en pierres calées ou réalisés traditionnellement à l'aide d'associations de branchages et de tiges perpendiculairement à un petit cours d'eau ou un ruisseau qui traverse une parcelle.

Ces différentes structures antiérosives jouent deux principaux rôles : soit elles favorisent la rétention et l'infiltration d'une quantité importante d'eau dans leur partie amont et maintiennent l'humidité pendant plusieurs jours (cas des biefs), soit elles freinent l'érosion des sols en réduisant la vitesse des eaux de ruissellement dans les parcelles mises en exploitation (c'est le cas des bandes enherbées et cordons pierreux).

En dépit des efforts des vulgarisateurs, les structures antiérosives n'ont pas fait l'unanimité dans tous les villages. Leur réussite est cependant indéniable dans beaucoup d'entre eux (tab. 1).

Tab. 1. Les aménagements (bandes enherbées et cordons pierreux) introduits et pérennisés.

Villages/État des aménagements antiérosifs	Surface totale aménagée (en ha)	Surface des aménagements pérennisés (en ha)	Surface des aménagements abandonnés (en ha)	Taux d'adoption (en %)
Bidzar Yaoundou	10	10	0	100
Kola	24	24	0	100
Djédjengué	8	6	2	75
Chibré torou	17	15	2	88,23
Bidzar Sud	46,25	42,5	3,75	91,89

Villages/État des aménagements antiérosifs	Surface totale aménagée (en ha)	Surface des aménagements pérennisés (en ha)	Surface des aménagements abandonnés (en ha)	Taux d'adoption (en %)
Soulkadou	51	51	0	100
Gara golombé	25,5	21	4,5	82,35
Moulvouda	8	8	0	100
Goudou	11	9	3	81,81
Gashiga	109	100	9	91,74
Lam	43,5	40	3,5	91,95
Djéfatou	101,5	84,5	1	83,25
Sorawel	12,25	11,75	0,5	95,91
Mafakilda	55,25	55,25	0	100
Israel	7	7	0	100
Mayo Oulo	83,75	68,25	15,5	81,49
Kong-Kong	10,75	8,25	2,5	76,74

Source : ESA, DPGT et enquêtes de terrain

Il ressort de ce tableau que dans les 17 des 30 villages enquêtés, les structures antiérosives introduites sont bien entretenues. En effet, les surfaces abandonnées n'excèdent pas 4,25 ha dans l'ensemble de ces villages. En valeur relative, les proportions obtenues montrent clairement que dans au moins 75 % des surfaces aménagées, les structures sont entretenues contre 25 % des surfaces où elles sont abandonnées. Dans d'autres villages par contre, l'introduction des structures est plutôt un échec comme le présente le tableau 2.

De ce tableau, il apparaît que, contrairement au tableau 1, très peu de structures sont entretenues et pérennisées. En valeur relative, on constate que dans chaque village, plus de 73 % des surfaces aménagées ne sont pas entretenues contre moins de 30 % où les structures sont entretenues. Dans l'ensemble, deux groupes de villages apparaissent clairement. D'un côté, nous avons 17 villages dans lesquels l'introduction peut être considérée comme étant une réussite et, de l'autre, nous avons 13 villages dans lesquels cette introduction peut être qualifiée d'échec. Quelles sont donc les raisons qui expliquent ces réussites et échecs observés ?

Tab. 2. Les aménagements (bandes enherbées et cordons pierreux) introduits et non pérennisés

Villages/État des structures	Surface totale aménagée (en ha)	Surface aux aménagements pérennisés (en ha)	Surface aux aménagements abandonnés (en ha)	Taux d'abandon (en %)
Batao	15,25	3,25	12	78,68
Kéreng	5,25	0,5	4,75	90,47
Laindé massa	75	12	63	84
Djaouro dori	68,25	18	50,25	73,62
Adoumri	20,25	3,75	16,5	80,29
Bossoum	12	3	9	75
Bamé 1	3,25	0	3,25	100
Douroum	25,5	4,25	21,25	83,33
Ndélélé	20	4	16	80
Goré Ngaska	26,5	6,5	20	75,47
Chibré	5	2	4	80
Mokorvong	4	1	3	75
Dahal	3	0,25	2,75	91,66

Source : ESA, DPGT et enquêtes de terrain

2.2. Les raisons des réussites et échecs

2.2.1. Les réussites

Plusieurs raisons militent pour la réussite ou pour le rejet. L'une des raisons principales de l'adoption des structures mises en place par les différents organismes de développement est sans doute la motivation financière. En effet, face à la réticence des paysans et afin d'encourager la réalisation des structures antiérosives, les vulgarisateurs ont mis en place un système de rémunération qui tient compte de la qualité des structures réalisées par les agriculteurs, en leur donnant une modique somme dont le montant ne dépasse point 1 000 F CFA par an. Les propos des agriculteurs justifient cette idée lorsqu'ils affirment qu'ils réalisent les structures antiérosives parce qu'ils auront de l'argent de la structure vulgarisatrice. Ce qui laisse croire que pour cette catégorie d'agriculteurs, les structures ne seraient jamais réalisées sans ces modiques sommes qui leur sont données.

La seconde raison qui ressort des enquêtes est la relation qu'entretiennent les agents vulgarisateurs des organismes opérant sur le terrain. Celle-ci permet de mettre en confiance les agriculteurs et facilite le dialogue entre ceux-ci et les vulgarisateurs. Par ailleurs, de larges explications et sensibilisations sur les apports du point de vue hydrique, organique et la réduction de l'intensité des écoulements d'eau qui découlent des structures sont autant d'éléments qui militent pour l'adoption massive par les agriculteurs. Sur les 210 agriculteurs enquêtés, 50 % avancent cette raison.

La troisième est la saturation foncière. En effet, dans cette partie de la province, hormis les aires protégées, les terres vacantes sont rares à cause de la démographie sans cesse croissante, dont les taux se situent autour de 5,1 %. En conséquence, dans beaucoup de villages, la saturation foncière a atteint un degré tel qu'il ne soit plus possible de défricher même un lopin de terre. Les villages de Mafakilda, Djéfatou, Soulkadou, Sorawel, Gara Golombé, Djédjengué pour ne citer ceux-là, en sont des illustrations patentes. Les agriculteurs sont contraints d'exploiter de façon continue leurs parcelles sans véritable moyen de les rendre plus productifs. Ainsi, la baisse continue de la productivité constitue un des éléments qui militent en faveur de l'adoption des structures antiérosives. Les agriculteurs espèrent à défaut de rendre plus fertiles leurs terres, de les conserver tout au moins par cette technique, et ce, d'autant plus que les intrants sont devenus difficilement accessibles et que l'Etat s'est totalement désengagé.

Enfin, l'état du terrain et la disponibilité en matière première constituent une autre raison. Du point de vue de l'état du terrain, on constate que les villages ayant des terrains pentus (de l'ordre de 7 % à 10 %) sont ceux où les structures sont les plus adoptées. C'est le cas dans 10 des 30 villages où nous avons enquêté : Moulvouda, Soulkadou, Bidzar Yaoundou, Bizar Sud, Kola, Djedjengué, Chibré Torou, Goudou, Gara Golombé et Lam.

La disponibilité en matière première et surtout des cailloux pour les cordons pierreux, par exemple, est également une raison. Elle facilite en effet la construction des cordons dans les champs. C'est le cas des villages tels que Lam, Moulva, Bidzar Yaoundou, Bidzar Nord, Kola, Goudou, Chiré Torou, Sorawel, Soulkadou. Ces villages, riches en cailloux, sont ceux dans lesquels les paysans ont le plus adopté les structures proposées.

À côté de ces éléments, il faut relever le fait que dans cette partie du pays, les luttes antiérosives sont une tradition et favorisent dans certains villages l'adoption des techniques « nouvelles ». S'il est vrai que la vulgarisation des structures antiérosives par les organismes est une réussite sans conteste dans nombre de villages, il n'en demeure pas moins vrai que dans d'autres, cela est un échec total. Qu'est-ce qui justifie cette situation ?

2.2.2. Les raisons des échecs observés

Les échecs sont dus à l'absence de participation des agriculteurs. Ils se traduisent soit par une insuffisance des aménagements, soit par le manque d'entretien des structures réalisées ou l'abandon pur et simple des structures en place. Pour ce qui est de la zone étudiée, les paysans citent la mauvaise implication des agents

vulgarisateurs, la gêne qu'occasionnent les structures lors des labours et l'apport de mauvaises herbes dans les champs.
S'agissant de l'implication des agents vulgarisateurs, il a été relevé que « *beaucoup d'agents ont un comportement qui laisse à désirer, voire hostile à l'égard des agriculteurs* ». Il faut y adjoindre le manque d'explication sur le bien-fondé de structure. Une incompréhension s'installe alors entre les deux acteurs et se solde par un échec dans la mise en place des structures. C'est le cas des villages tels Adoumri, Douroum, Laïndé Massa, Djaouro Dori, Batao et Kereng. Dans ces villages, 80 % des agriculteurs pensent que la mise en place des structures gêne considérablement les labours, surtout en ce qui concerne les labours attelés. De même que 90 % d'entre eux pensent aussi que les structures sont responsables de l'apport de mauvaises herbes dans les champs. Aussi sont-ils réticents quant à leur mise en place.

Les 20 % restant évoquent le manque de matériels, surtout en ce qui concerne les cordons pierreux. En effet, la construction des cordons pierreux nécessite un moyen de transport qui n'est pas toujours facile à obtenir par les agriculteurs. En tout état de cause, même si les innovations en matière de structures antiérosives sont une réussite dans 17 villages enquêtés de la province du Nord, il a été relevé que dans les 13 autres, les échecs sont nombreux. Compte tenu de l'importance de ces structures dans la lutte contre l'érosion des sols dans cette partie du pays, la question qui se pose est celle de savoir ce qu'il faut faire pour rallier davantage les agriculteurs à l'adoption de telles structures.

CONCLUSION

Au total, il a été pour nous question d'analyser les raisons profondes qui justifient l'adoption ou non des structures antiérosives mises place par les organismes tels DPGT, ESA et TERDEL, qui œuvrent dans le développement local. Il apparaît que les réussites observées dans beaucoup de villages résultent de la conjonction de plusieurs éléments : la tradition de la pratique des techniques antiérosives, comme c'est le cas des monts Mandara (Tchotsoua et Fotsing, 2006), la disponibilité de la matière première, les relations qu'entretiennent les agents vulgarisateurs avec les paysans, l'état de terrain, notamment la topographie, la saturation foncière. L'acceptation des aménagements antiérosifs tiendrait moins à leur efficacité technique aux yeux des paysans qu'à la prise de position en leur faveur par leur chef de village et à une stratégie de sécurisation foncière. Ce constat avait déjà été fait par Abaïcho en 1997 (cité par Roose et *al.*, 1998).

Les échecs, quant à eux, s'expliquent par le comportement répulsif de certains agents, la gêne qu'occasionnent les structures une fois mises en place et, surtout, le manque de matériels et d'explication de ce que les agriculteurs gagneront de la réalisation de telles structures. Dans l'ensemble, le bilan des dix années d'essai de vulgarisation reste mitigé car c'est un échec dans près de 40 % des villages enquêtés. En fin de compte, il apparaît que c'est surtout le comportement des agents vulgarisateurs qui est mis en cause. Ils devraient aussi mettre l'accent sur l'explication des apports desdites structures dans la fertilisation et la conservation des sols car les agriculteurs ne semblent pas encore avoir bien compris les apports des structures antiérosives.

Références bibliographiques

ALBERGEL J., VALENTIN C., 1989. « Sahélisation » d'un petit bassin versant soudanien Kognore-Boulsa, au Burkina Faso, pp. 119-133, In : RICHARD J.F. (édit.), *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest*. AUPELF, Coopération française, UINC, ENDA, Dakar, 310 pp.

DIATTA M., 1994. *Mise en défens et techniques agroforestières au Sine Saloum (Sénégal). Effets sur la conversation de l'eau, du sol et sur la production primaire*, Thèse de Doctorat, université scientifique L. Pasteur de Strasbourg, 202 pp. + annexes.

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

MAINGUET M., 1991. *Desertification: natural background and human mismanagement*. Springer Verlag, Berlin, 306 pp.

MIETTON M., 1988. *Dynamique de l'influence lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane*. Thèse de doctorat de Géographie, université de Grenoble, 511 pp.

ROOSE E., BOUTRAIS J., BOLI BABOULE Z., 1998. *Rapport d'évaluation fertilisation des sols du projet* DPGT *(Développement paysannal et gestion des terroirs) au Nord-Cameroun*, ORSTOM-CIRAD, Montpellier, 72 pp.

ROOSE E., 1989. Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale, ICRISAT, 55-72.

ROOSE E., 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest, *Agron. Trop.*, 32, 2 : 8 pp.

SUCHEL, J.-B., 1972. La répartition des pluies et régions pluviométriques au Cameroun. Centre de recherches africanistes, Université fédérale du Cameroun : 173-176.

TCHOTSOUA M., FOTSING J.-M., 2008. Stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols autour de Mokolo dans les monts Mandara au Nord-Cameroun. 14th International Soil Conservation Organization (ISCO), 14-19 Mai 2006, Marrakech, 4 pp.

GESTION DE L'EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS DANS LES PLAINES DE L'EXTRÊME-NORD-CAMEROUN. STRATEGIES TRADITIONNELLES ET MODERNES

Christophe BRING* et Michel TCHOTSOUA**

** Géographe, chargé de cours, université de N'Gaoundéré ; bringchristophe@yahoo.fr*

*** Géographe, professeur, université de N'Gaoundéré ; tchotsoua@yahoo.fr*

Abstract

In order to evaluate the antierosive strategies of fight in the plains of Extreme-North of Cameroon, this article appreciates the levels of adoption of the innovations suggested for the management of water and of the ground by the structures of development vis-à-vis the existing traditional strategies. It comes out from it that under the pluviometric constraint and of the impoverishment of the soil, the populations developed techniques a long time allowing them to improve the outputs. The appropriation and the perpetuation of the innovations are then a function of the aptitudes of the mediums and the constraints application of the techniques which are sometimes comparable with a deterministic attitude.

Keywords : *Far Northern Cameroon* ; *Water* ; *Soil Fertility* ; *Plains* ; *Traditional Strategies* ; *Modern Strategies*.

1. PROBLÉMATIQUE

La plaine de l'Extrême-Nord du Cameroun présente un régime tropical, avec une saison sèche et une saison des pluies de durées variables. La saison des pluies est régulièrement soumise à des aléas climatiques. En effet, elle commence parfois très tôt, obligeant les paysans à semer précocement, et, quelquefois, elle débute très tard ou s'interrompt brusquement. De la même manière, certaines années présentent des déficits pluviométriques généralisés, avec des insuffisances pluviométriques de l'ordre de 80 % (Bring, 2005).

La variabilité pluviométrique soumet ainsi la région à plusieurs types de risques qui entraînent une désorganisation de la vie rurale dans de nombreux terroirs. Il s'ensuit alors des pénuries alimentaires, marquées par la baisse de production, du manque d'eau potable, des mouvements migratoires.

Ces problèmes sont étroitement liés à la qualité du sol et aux techniques de culture qui nécessitent une constante amélioration pour s'adapter à la dynamique du milieu. C'est dans cette logique que des stratégies de conservation et de gestion de l'eau et du sol ont été proposées pour améliorer celles existantes. Ces propositions, souvent inspirées des techniques venues d'ailleurs, ont parfois du

mal à être acceptées ou adoptées par les populations locales. Pourtant, certaines d'entre elles sont susceptibles d'améliorer les rendements. C'est l'analyse de ces niveaux d'appropriation qui fait l'objet de cet article, un des premiers résultats du projet de recherche *Évaluation des stratégies de lutte antiérosive en milieu soudano-sahélien tchado-camerounais*, financé par l'Agence universitaire de la Francophonie en 2004. Il est question de présenter, dans une première partie, les stratégies traditionnelles existantes avant d'apprécier, dans une seconde partie, les niveaux d'appropriation des innovations proposées.

2. MÉTHODES

La démarche méthodologique adoptée s'est appuyée sur des fiches d'enquête. Ces fiches comportent des informations sur la localisation des sites suivant la logique des levés GPS, l'identification des groupes ethniques concernés, les types de structures antiérosives proposées, incluant le nombre d'exploitants les ayant adoptés. Les informations sont tirées des parcelles organisées en blocs d'observation. Pour ce qui est des aménagements traditionnels, une appréciation directe s'est faite sur le terrain suivant les calendriers culturaux des zones concernées. Cette démarche a surtout concerné les pratiques liées à la culture du sorgho de contre-saison (*mouskwari*).

3. RÉSULTATS

3.1. Des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosives anciennes : l'exemple de la culture du *mouskwari*

3.1.1. La culture traditionnelle du mouskwari

L'introduction de la culture du *mouskwari* au Nord-Cameroun remonte à la conquête peuhle. Il se cultive sur des sols hydromorphes de type vertisol appelés *karal* (en foulfouldé), qui possède une teneur en argile élevée de l'ordre de 35 % à 70 % ; sa grande cohésion à l'état sec et sa plasticité à l'état humide conditionne son comportement à l'égard de l'eau. En effet, dès l'arrivée des pluies, les eaux pénètrent les fentes qui présentent des retraits de 2 cm à 3 cm avec des profondeurs atteignant 80 cm. Le *karal* se sature d'eau et est entièrement submergé juste avant la fin des pluies. Cet apport d'eau provient aussi des cours d'eau avoisinant les parcelles par canalisation. Cette eau nécessaire pour alimenter la plante, dont « *le système radiculaire suit la descente de la nappe phréatique* », est alors retenue dans les parcelles par des diguettes construites préalablement (Consultants associés 1997).

Le début de la culture du *mouskwari* est lancé dès le mois d'août avec la constitution des pépinières (*sak-ré*). 30 à 40 jours après cette opération, on procède au repiquage, lequel consiste au forage de trous de 20 cm à 35 cm, espacés de 0,8 m à 1,20 m. L'eau contenue dans le sol jusqu'à environ 120 cm de profondeur est alors essentielle pour faire grandir la plante. Cependant, la réussite du *mouskwari* dépend aussi, en partie, de l'état hygrométrique de l'air qui doit être frais entre novembre et décembre.

3.1.2. La construction des diguettes et la culture du mouskwari

Cette opération intervient dès les premières pluies, parallèlement au semis des cultures pluviales. Elle consiste en l'édification de buttes d'argile d'une hauteur comprise entre 40 cm et 60 cm tout autour des parcelles (*dignédjés* en langue foulfouldé). Ces diguettes permettent de retenir l'eau tout le long de la saison des pluies ; cette eau devra s'infiltrer progressivement dans le sol. Quelquefois, on aménage en même temps une canalisation, qui peut permettre d'alimenter les parcelles à partir d'un cours d'eau voisin ou à partir d'une sorte de puits (*akolori*) de 2 m de largeur environ et de profondeur variable. Ce puits qui est rempli d'eau de pluie en fin de saison pluvieuse constitue le point d'eau permettant d'humidifier le sol à travers les trous au moment des repiquages. Ces opérations permettent de réduire considérablement les risques de stress hydrique pour les plantes.

3.1.3. La « restitution » annuelle de la fertilité du sol dans le système de culture du mouskwari : défrichage et brûlis

Le système de culture intégrant le défrichage et le brûlis est fréquemment pratiqué au Nord-Cameroun. La culture du *mouskwari* évoquée dans cette partie est celle qui est la plus concernée par cette technique. À la fin des pluies, on observe des parcelles de graminées, présentant une strate herbacée développée en fonction de la disponibilité de l'eau dans le sol. La première opération consiste alors à défricher les herbes et à les laisser sécher sur les parcelles. Le début de la saison sèche avec le retour du souffle sec du vent permet un assèchement rapide des herbes qui seront alors brûlées sur place. Les zones de production présentent à ce moment un paysage assombri du sol qui est alors prêt pour l'opération de repiquage.

3.2. Analyse des niveaux d'adoption des innovations proposées

3.2.1. Les stratégies proposées. Les digues à sorgho des plaines inondables en aval du barrage de Lagdo

La construction des digues à sorgho par la MEADEN (Mission d'étude pour l'aménagement et le développement du Nord) est devenue indispensable à partir de 1982, suite aux déficits pluviométriques constatés au moment de la mise en fonctionnement du barrage de Lagdo. En effet, avec l'édification de cette retenue d'eau, on va constater en aval un important déficit d'inondation avec possibilité de compromettre la réussite de la culture du *mouskwari*. Il était alors nécessaire de mettre en place des stratégies pour retenir l'eau et les limons en aval et permettre l'inondation nécessaire à la pratique du *mouskwari*.

Les deux premières digues construites dans les cuvettes de Garoua et Pitoa ont échoué à cause des problèmes techniques. Cela a poussé la MEADEN à bâtir des digues plus stables et d'étendre la technique à d'autres cuvettes de la zone : Garoua, Pitoa, Guébaké, Dengui, Douloumi. L'objectif de l'implantation des digues se base sur les possibilités d'optimiser les retenues, « *soit à l'endroit où le lit majeur se rétrécit, soit sur les hauteurs relativement élevées au sein du lit majeur* » (Consultants associés 1997). À cet effet, les cuvettes de Guébaké, Pitoa et Garoua sont disposées de sorte que l'eau se déverse d'une cuvette à l'autre en partant de Guébaké en amont jusqu'à Garoua, en passant par la cuvette de Pitoa. La

superficie des cuvettes tient d'ailleurs compte de ce déversement : 524 km^2 à Guébaké, 160 km^2 à Pitoa et 110 km^2 à Garoua. Ainsi, les eaux sont retenues de juin à novembre. Durant cette période, la crue fait pourrir toutes les mauvaises herbes et présente un espace nettoyé au moment des repiquages des plants. De ce fait, un sarclage simple permet d'assurer de bonnes récoltes. Par ailleurs, en plus de cette aptitude à nettoyer les espaces à *mouskwari*, les inondations déposent des limons qui assurent la fertilité des cuvettes.

Actions de maîtrise de l'eau pour la conservation du sol sur les parcelles de culture initiées par le projet ESA (Eau, sol, arbre)

La maîtrise de l'eau est associée ici à la maîtrise de l'érosion. Elle vise la conservation du sol par l'aménagement des structures antiérosives. Tout est orienté vers le contrôle du ruissellement sur les parcelles de culture et vers la réduction des ravinements. L'action sur les parcelles concerne les cultures en courbes de niveau, les systèmes en bandes enherbées et les cordons pierreux. En ce qui concerne l'action sur les rigoles, elle est centrée sur la construction des diguettes et de biefs. Pour ce dernier aspect, nous analyserons la logique de son adoption dans le cadre des activités du Comité diocésain pour le développement (CDD).

a. Les cultures en courbes de niveau

L'utilisation de la technique de culture en courbe de niveau se justifie par la forme du champ qui peut être en pente ; dans ce cas, l'écoulement est rapide, avec un grand potentiel hydrique, et le sol se lessive rapidement.

b. Les diguettes sur les espaces de culture classique

La réalisation des diguettes en terre se fait en deux phases : l'une en saison sèche et l'autre en saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, on plante des piquets suivant les courbes de niveau pour repérer les lignes de réalisation des diguettes. Ensuite, on entasse sur ces lignes des tiges de mil et les restes des déchets des champs qu'on renforce par des pierres. En début de saison des pluies, on réalise des billons en couvrant de terre le dispositif fait en saison sèche. Pendant la saison des pluies, on plante sur les diguettes des herbes qui servent à stabiliser l'ouvrage et qui peuvent résister plusieurs années. La maintenance de la diguette est assurée par la remise en terre sur les billons au fur et à mesure qu'ils se désagrégent. On peut aussi construire des diguettes en pierres qui sont réalisées en saison sèche par un système de rangement de pierres dans un fossé de 30 cm de profondeur.

La durabilité des diguettes tient à leur bon entretien car il faut les réparer chaque année, en respectant la technique de culture exigée par les conditions du milieu, en évitant de brûler les restes de tiges — il faut plutôt renforcer la fertilité par un apport de fumier —, et en assurant la richesse des parcelles en y plantant des arbres utiles : *Faidherbia, Ziziphus*…

c. Les bandes enherbées antiérosives

Les bandes antiérosives enherbées se réalisent en une phase, sans apport supplémentaire de tâches en saison agricole. Sa technique repose sur le ralentissement de la vitesse de l'eau sans la bloquer. Les bandes ont donc la

capacité de filtrer l'eau. Les herbes qui renforcent et constituent ces bandes sont, en outre, considérées comme des réserves végétales qui peuvent être utilisées ultérieurement pour la couverture des toitures en paille ou comme litière pour la fabrication du fumier.

d. Les cordons pierreux antiérosifs

Les cordons pierreux antiérosifs sont réalisés dans des tranchées d'environ 5 cm dans lesquelles on ancre des pierres. Les pierres sont plus colmatées du côté amont de l'ouvrage pour permettre de constituer une petite barrière de dépôt de sédiments. Sur ces cordons, la terre servant à boucher les interstices entre les pierres doit aussi permettre le développement de graminées qui doivent, au fil du temps, stabiliser l'ouvrage. Sur ce dispositif, l'eau, comme dans le cas des bandes enherbées, est ralentie et non stoppée. Elle peut donc s'infiltrer à travers les pierres.

Ces techniques ont eu des succès divers dans la conservation et la gestion de l'eau et du sol.

La technique de bief proposée par le Comité diocésain pour le développement dans les monts Mandara

Adopté en 1984, le terme « bief » se démarque de la définition habituelle pour désigner un ouvrage réalisé en pierre ou en ciment dans le lit d'un mayo. Son but est de ralentir la vitesse des eaux et de les retenir (Roose 1999). Ces eaux pourront alors s'infiltrer et réapprovisionner les nappes souterraines et aussi pourvoir les puits situés en aval de la retenue.

Le choix du site de réalisation des biefs obéit à certaines contraintes, notamment celle de pouvoir construire une grande retenue. À cet effet, il est préconisé de construire une longue retenue pour assurer l'efficacité du bief. L'ouvrage doit être conçu de façon à ne pas retenir toute l'eau du mayo, l'objectif étant de ralentir la vitesse de l'eau. Nous allons décrire ci-dessous, la technique du bief en pierres calées.

C'est une technique spécifique des autres types de retenue. Elle consiste en un amoncellement de pierres disposées les unes sur les autres pour former un seul bloc. Cette technique présente l'avantage d'être très résistante et de ne présenter pour seule dépense que l'énergie humaine. Il est nécessaire de construire plusieurs biefs sur un mayo, afin de renforcer la capacité d'infiltration des eaux. La garantie d'une bonne efficacité est dégagée lors de la réalisation même du bief. Les biefs sont aussi réalisés pour aménager des parcelles de culture hydrique. Il s'agit alors de faire des aménagements à l'endroit où l'on souhaite valoriser la culture. C'est l'exemple de la culture du riz qui est effectuée sur une parcelle aménagée dans un petit affaissement.

4. DISCUSSION

Le niveau d'adoption de ces structures varie en fonction des régions et des villages. Pour certaines localités, ces aménagements entrent dans la logique d'amélioration des stratégies existantes. C'est leur pérennité qui pourrait faire

problème compte tenu du fait que leur entretien dépend de chaque utilisateur. Or, dans le cadre des encadrements par les structures initiatrices (DPGT, ESA), il y a nécessité d'une organisation globale de l'entretien. Pour ce qui est des biefs notamment, le besoin lié à la ressource hydrique est une motivation supplémentaire à l'entretien des ouvrages. L'appui des structures initiatrices (MIDIMA, CDD) est par conséquent plus aisé.
Dans l'ensemble, l'analyse du niveau d'adoption ou d'appropriation des structures antiérosives semble complexe. Dans certaines régions, la nécessité de conservation de l'eau et du sol permet aux populations d'accepter et de pérenniser les innovations proposées (776,25 ha aménagés en cordons pierreux à Maroua-Sud contre 0 ha à Tchadibali) ; dans d'autres, le faible niveau de perception de la nécessité d'adoption des stratégies limite la pérennisation des stratégies proposées (absence de bandes antiérosives à Maroua). En effet, la diffusion à grande échelle des cordons pierreux, par exemple, doit sa réussite non seulement à l'existence de la stratégie comme technique ancienne, mais aussi du fait de la disponibilité de la matière première dans le milieu concerné. C'est aussi dans cette logique qu'on peut apprécier la pérennisation des plants. À cet effet, la synthèse du volet opérationnel du projet ESA indique un niveau non négligeable d'appropriation pour les plants (106 577 en deux années).

Les réalisations du projet ESA (années 1 et 2) dans les régions de l'Extrême-Nord Cameroun

Régions	Aménage-ments bandes antiérosives (ha)	Aménage-ments cordons pierreux (ha)	Aménage-ments bourrelets (ha)	Total aménage-ments (ha)	Pérennisa-tion plants (nombre)	Pérennisa-tion bornes (nombre)
Maroua-Nord	0	577	1 732	2 310	28 113	0
Maroua-Sud	0	776	849	1 625	30 022	0
Kaele	3 411	279	65	3 755	41 894	4 541
Tchatibali	476	0	0	476	6 548	0
Total	3 887	1 632	2 647	8 167	106	4 541

Enfin, le volet financier constitue un des aspects explicatifs de l'appropriation des innovations. En effet, certains aménagements nécessitent un investissement matériel que ne peuvent assurer seuls les agriculteurs bénéficiaires. Le faible niveau de revenus lié à la faible production atténue leur implication effective dans l'entretien et la pérennisation des aménagements.

CONCLUSION

Les contraintes du milieu (climat et sol) ont poussé les populations à adopter des techniques et des stratégies de conservation et de gestion de l'eau et du sol. Il s'est donc développé une habitude traditionnelle basée sur des techniques locales mais « intelligentes » de conservation de l'eau et du sol, et une adoption des

systèmes de culture adaptés aux difficultés de l'environnement (pluviométrie et sol). Ces efforts sont complétés par l'appui des structures de développement qui viennent améliorer ou compléter un savoir-faire existant. L'adoption des stratégies proposées varie alors en fonction des milieux et des contraintes d'application des innovations.

Références bibliographiques

BRING, 2005. *Évaluation des ressources en eau atmosphérique sur le Nord-Cameroun à l'aide des méthodes conventionnelles et satellitales*. Thèse de Doctorat/Ph.D., Université de N'Gaoundéré.

CONSULTANTS ASSOCIES, 1997. *Les aménagements hydro-agricoles dans la vallée de la Bénoué : analyse diagnostic*. Rapport de mission, F.E.D, MEAVSB.

SEIGNOBOS C., 1993. Hardé et Karal du Nord-Cameroun, leur perception par les populations agropastorales du Diamaré. *In* Peltier R. (édit.), Les Terres Hardé, caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad, *Cahiers Scientifiques du CIRAD-Forêt*, Nogent-sur-Marne, 11 : 121 pp.

ROOSE E., BOUTRAIS J., BOLI BABOULE Z., 1998. *Rapport d'évaluation fertilisation des sols du projet DPGT (Développement Paysannal et Gestion des terroirs) au Nord-Cameroun*, ORSTOM-CIRAD, Montpellier, 72 pp.

ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin des Sols FAO*, Rome, 420 pp.

Remerciements

Nous remercions très sincèrement la SODECOTON à travers le Projet ESA pour les données et informations mises à notre disposition, le réseau Erosion de l'AUF pour le soutien financier et le Dr Eric Roose, coordonnateur de ce réseau, pour ses multiples observations et interpellations.

Processus d’érosion, indicateur de risques et extension

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)

A. CHEGGOUR*, V. SIMONNEAUX, M. SABIR*** et E. ROOSE******

** Faculté des sciences Semlalia, programme SudMed, Centre Geber, salle 26, Université Cadi Ayyad, B.P. 2390, Marrakech, Maroc ; a.cheggour@ucam.ac.ma*
*** IRD-CESBIO, 18 av. Edouard Belin, 31401 Toulouse CEDEX 9, France ; simonneaux@ird.fr*
**** École nationale forestière des ingénieurs, B.P. 511, Salé, Maroc ; sabirenfi@wanadoo.net.ma*
***** IRD, Laboratoire Most, B.P. 64501, 34394 Montpellier CEDEX 5, France ; Eric.Roose@.ird.fr*

Abstract

The objective of this study is to investigate the risks of runoff and erosion on the various soils of the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco) using rainfall simulation experiments on 1 m^2. We are looking for easy to access indicators obtained from field observations and/or by laboratory tests, well correlated with infiltration and turbidity measurements issued from simulations experiments. For the various soils present in the study area, the results show a large variability of infiltration (from 1 to 70 mm h^{-1}) and turbidity (from 3 to 325 g.l^{-1}). The turbidity was correctly measured thanks to the development of a new runoff collector which does not disturb the soil. The measurements show that infiltration is correlated mainly with texture and soil surface opening, and that turbidity is related to the surface of bare soil exposed to runoff.

Keywords : *Rainfall Simulations* ; *Erosion Indicators* ; *Infiltration* ; *Turbidity* ; *Morocco* ; *Atlas*.

INTRODUCTION

Ce travail concerne le bassin montagneux du Rhéraya, situé dans le Haut-Atlas occidental du Maroc, dont la dégradation de la végétation et des sols sur les versants, causée par le surpâturage et le défrichement, a provoqué une augmentation du ruissellement et de l'érosion. Une étude est actuellement en cours pour estimer le taux d'érosion et les risques de ruissellement dans ce bassin. Six parcelles d'érosion de 100 m² dont une ravine ont été mises en place sur les différents substratums représentatifs du bassin (granite, colluvion de bas de pente, argile). Deux années après leur installation, un seul orage de 25 mm de pluie et de 60 mm.h^{-1} d'intensité a provoqué un ruissellement significatif sur les parcelles, et dix pluies ont provoqué du ruissellement dans la ravine sur argile. Il apparaît ainsi

que dans notre contexte, les méthodes de mesure *in situ* des risques de ruissellement et d'érosion sous pluies naturelles (parcelles d'érosion) sont longues et coûteuses du fait de la rareté des évènements ruisselants. Pour obtenir rapidement des indicateurs d'érodabilité des sols, une alternative aux parcelles d'érosion est constituée par les simulations de pluies. L'objectif de ce travail est ainsi de mettre en œuvre ces méthodes pour rechercher des indicateurs de risque d'érosion, faciles à déterminer directement sur le terrain (exemple : caractérisation des états de surface du sol) ou à partir des tests en laboratoires (exemple : stabilité des agrégats, texture et matière organique), en se basant sur des corrélations significatives entre les résultats des simulations et les différents paramètres du sol.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le bassin versant du Rhéraya, d'une superficie de 228 km², est localisé dans le Haut-Atlas occidental du Maroc, à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech. Les altitudes varient de 925 m à 4 165 m. Le climat est semi-aride, caractérisé par une très grande irrégularité des précipitations dans le temps et dans l'espace, avec une moyenne de 360 $mm.an^{-1}$. L'hétérogénéité spatiale des précipitations est liée à l'altitude et au relief. La variabilité temporelle est typique des régions arides, avec une forte proportion d'orages. Du point de vue géologique, les substratums affleurant dans le bassin sont très variés. La zone aval du bassin comprend des argiles rouges permotriasiques extrêmement érodables lorsqu'elles sont nues, alors que les deux tiers amont sont constitués par des formations volcaniques nettement plus stables. La végétation naturelle, constituée essentiellement de thuya en basse altitude et de chamaephytes en haute altitude, est très dégradée, suite à la déforestation et au surpâturage.

Le simulateur de pluie choisi pour ce travail est un irrigateur manuel à rampe (Roose, 1997), simulant des averses sur des parcelles de 1 m² (largeur 60 cm, longueur 163 cm). Dans le dispositif habituel du simulateur à main, le collecteur des eaux de ruissellement à l'aval de la parcelle était constitué par une tôle, fixée au sol dans sa partie amont, par une cornière métallique enfoncée dans le sol barrant le bas de la parcelle. La perturbation du sol induite par la fixation du collecteur perturbait le sol et faussait les mesures de sédiments, et créait de plus une zone potentielle d'infiltration préférentielle. Nous avons mis au point un nouveau dispositif de collecte constitué par un film plastique souple collé au sol. Le sol est préalablement nettoyé des éléments posés (cailloux, litières…) sans le perturber, puis une couche de peinture cellulosique est répandue sur environ 4 cm de large. Cette peinture pénètre dans le sol et les fissures et permet d'obtenir une étanchéité et une bonne adhérence à la surface du sol. Après 5 minutes de séchage, la peinture est recouverte par une couche de joint silicone, sur laquelle le film plastique est collé en épousant la surface du sol. Ce film plastique est alors roulé pour diriger l'eau de ruissellement vers un bocal de collecte du ruissellement. On obtient ainsi une interception sans fuite du ruissellement et également sans infiltration parasite, due à la fissuration de l'horizon de surface consécutive à l'enfoncement de la cornière dans la configuration initiale du simulateur. On arrose le plus régulièrement possible une parcelle de 1 m², avec des pluies d'environ 80 $mm.h^{-1}$ d'intensité durant 30 minutes. Les eaux de ruissellement mesurées toutes les deux minutes en bas de la parcelle permettent de calculer la pluie

d'imbibition, de suivre l'évolution du ruissellement et d'infiltration et de mesurer la charge solide totale des eaux de ruissellement. La valeur de l'infiltration est calculée toutes les 2 minutes par soustraction du ruissellement de la pluie reçue. On observe en général en fin d'expérience une stabilisation de cette valeur que l'on nomme infiltration finale. Cette courbe d'infiltration en fonction du temps permet aussi d'estimer la pluie d'imbibition, qui exprime la capacité du sol à absorber des averses brèves et à retarder l'apparition de ruissellement.

Nous avons effectué 29 simulations réparties sur 9 sites représentant les principaux types de sols (argiles rouges, sol colluvial volcano-sédimentaire, sol colluvial sur granite altéré, sol marno-calcaire et sol brun vertique sur basalte) et des utilisations de terres (forêts, parcours, sol nu et cultures) affleurant dans le bassin, sur des pentes de 40 % à 60 %. Avant chaque simulation, les états de surface de la parcelle sont caractérisés par la méthode des points quadrats. On observe en chaque point le type de surface rencontré : sol nu, cailloux (posés ou inclus), litière, végétation, ainsi que la nature ouverte ou fermée de la surface (du point de vue hydrodynamique), selon la méthode proposée par Roose (1996). Sur chaque site des échantillons de sols sont prélevés dans les 5 premiers centimètres pour analyses et tests physiques (stabilité des agrégats, texture et matière organique).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La variation moyenne de la pluie d'imbibition est comprise entre 2 mm et 4 mm pour tous les sols étudiés. Ces valeurs sont comparables à celles trouvées par Al Karkouri (2000) dans le Rif central sur des sols naturels, avec des moyennes de 3 mm pour des sols limoneux et 2,25 mm pour des sols limoneux sableux. Elles sont également comparables aux résultats de Sabir (2004) dans le Rif occidental pour des sols peu évolués, avec des valeurs qui varient de 2,4 mm à 4,3 mm.

Les valeurs d'infiltration finale observées sont très variables selon les sols. Les sols les plus infiltrants sont les sols bruns vertiques (de 30 $mm.h^{-1}$ à 70 $mm.h^{-1}$), tandis que les ravines sur argiles rouges sont les moins infiltrants (3 $mm.h^{-1}$ à 5 $mm.h^{-1}$). Pour les autres types de sols, l'infiltration varie de 20 $mm.h^{-1}$ à 40 $mm.h^{-1}$. Globalement, ces valeurs sont très faibles à moyennes, mais sont en accord avec les mesures effectuées par Al Karkouri (2000), qui annonce des maxima de 99 $mm.h^{-1}$ sur terrain à couvert végétal continu. Les turbidités moyennes pour chaque type de sol, obtenues sur les 30 minutes de simulation, varient de 3 $g.l^{-1}$ à 325 $g.l^{-1}$, très supérieures aux valeurs de 12 $g.l^{-1}$ trouvées par Mathys (2005) sur des *badlands* marneux, pour des pluies pourtant supérieures (150 $mm.h^{-1}$), mais du même ordre de grandeur que les maximum de 400 $g.l^{-1}$ à 800 $g.l^{-1}$ observés par Oostwoud (1998) sur des marnes.

Dans un objectif de recherche d'indicateurs d'érosion facilement déterminables, les corrélations entre ces derniers et l'infiltration et la turbidité ont été étudiées. Nos résultats montrent que la capacité d'infiltration du sol est assez bien corrélée avec l'ouverture du sol ($r^2 = 0,77$). Cette relation indique que l'ouverture telle qu'on l'a estimée visuellement est un paramètre hydrodynamique pertinent. Les analyses granulométriques montrent qu'il existe trois classes principales de texture parmi les sites étudiés : une classe sableuse qui regroupe les sols volcaniques, granitiques

ainsi que les sols marno-calcaires, une classe limono-sableuse correspondant aux sols colluviaux sur argiles sous forêt et sur parcours, et une classe limono-argileuse associée aux ravines sur argiles. De bonnes corrélations sont obtenues entre infiltration et des fonctions exponentielles des fractions granulométriques. L'infiltration est corrélée positivement avec la proportion de sable ($r^2 = 0,64$) et négativement avec celle d'argile ($r^2 = 0,71$) et de limon ($r^2 = 0,61$), ce qui concorde avec les résultats de Marston (1999). Par contre, Sabir n'a trouvé aucune relation entre infiltration et texture pour des sols peu évolués du Rif occidental (Sabir 2004), ce qui peut provenir du fait que les textures y étaient peu variables et leur effet potentiellement masqué par d'autres facteurs. Pour les autres facteurs, couverture, matière organique et macro agrégats, aucune corrélation nette avec l'infiltration n'a été observée, ce qui montre que même si ces facteurs ont un rôle dans les processus d'érosion, ils sont ici masqués par d'autres.

La meilleure relation concernant la turbidité est observée avec le pourcentage de sols nus ($r^2 = 0,7$) pour une relation de type exponentiel, comme l'a déjà montré Morgan (1999). Mais elle est faiblement liée à l'intensité du ruissellement ($r^2 = 0,41$), ce qui concorde avec les résultats de Boardman (2003) sur des parcours en zone semi-aride. Par contre, aucune relation significative avec les autres facteurs (fermeture, MO, macro agrégats et texture) n'est observée.

CONCLUSION

Il s'avère que les simulations de pluie sont d'une grande utilité pour l'étude du ruissellement et de l'érosion dans les zones de montagnes semi-arides, qui se caractérisent par une énorme variabilité de pluies et par la rareté des phénomènes érosifs. Les résultats obtenus ont permis d'obtenir une première approximation de la capacité d'infiltration du sol et de sa fragilité à l'érosion et de comprendre les processus dominants en jeu. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que l'on a pu recueillir de manière significative les matières en suspension exportées grâce à une amélioration du récepteur de ruissellement du simulateur initial. Dans ce milieu très contrasté sur sols peu épais et dégradés, ce sont finalement l'ouverture de la surface du sol et la texture qui commandent en priorité la capacité d'infiltration. La turbidité est contrôlée, quant à elle, par la surface de sol nu. Ces indicateurs cartographiables permettent d'envisager une spatialisation du risque d'érosion au niveau de tout le bassin versant.

Références bibliographiques

AL KARKOURI J., LAOUINA A., ROOSE E., SABIR M., 2000. Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Beni Boufrah, Rif central (Maroc).*Bull. Réseau Érosion*; 20 : 342-356.

BOARDMAN J., PARSONS A.J., HOLLAND R., HOLMES P.J., WASHINGTON R., 2003. Development of badlands and gullies Sneeuberg, Great Karoo, South Africa. *Catena* 50: 165-384.

MARSTON RICHARD A., DOLAN LAWRENCE S., 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology*, 31: 313–323.

MATHYS N., KLOTZ S., ESTEVES M., DESCROIX L., LAPETITE J.-M., 2005. Runoff and erosion in the Black Marls of the French Alps: Observations and measurements at the plot scale. *Catena* 63 , 2-3 : 261-281.

MORGAN R. P. C., MCINTYRE K., VICKERS A. W., QUINTON J.N., RICKSON R.J., 1997. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technology* 11: 291-299.

OOSTWOUD WIJDENES D. J., ERGENZINGER P., 1998. Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *Catena* 33: 179-200.

ROOSE E., 1996. Méthodes de mesure des états 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, en particulier sur les versants cultivés de montagnes. *Bull. Réseau Erosion* 16 : 87-97.

ROOSE E, SMOLIKOWSKI B., 1997. Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. *Bull. Réseau Érosion* 17 : 282-296

SABIR M., BARTHES B., ROOSE E., 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosions sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du rif occidental (Maroc). *Sécheresse* 15, 1 :105-110.

SPATIALISATION DE L'ÉROSION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RHERAYA (HAUT-ATLAS, MAROC). COMPARAISON DE SIMULATIONS DE PLUIES ET D'EXPORTATION À L'EXUTOIRE DU BASSIN

V. SIMONNEAUX*, A. CHEGGOUR, M. SABIR*** et E. ROOSE******

** IRD, CESBIO, UMR CNES/CNRS/IRD/UPS, 18 v. Édouard Belin, 31401 Toulouse CEDEX 9, France ; simonneaux@ird.fr*
*** Faculté des sciences Semlalia. Centre Geber, salle 26, université Cadi Ayyad, B.P. 2390, Marrakech, Maroc ; a.cheggour@ucam.ac.ma*
**** École nationale forestière des ingénieurs, B.P. 511, Salé, Maroc ; sabirenfi@wanadoo.net.ma*
***** IRD, Laboratoire Most, B.P. 64501, 34394 Montpellier CEDEX 5, France ; Eric.Roose@ird.fr*

Abstract

This study compares erosion from runoff plots of about 150 m^2 and sediment delivery measurements at the outlet during two years. In the main part of the watershed, the observations showed rare runoff events, producing few sediment (between 0.015 and 0.342 t/ha/year). Conversely, runoff was more frequent on clayey badlands covering less than 1% of the area, but producing about 95% of the watershed sediments (300 t/ha/year). The average erosion over the watershed was about 3 t/ha/year, which is close to, although smaller, than the mean sediment exportation at the outlet (4 t/ha/year).

Keywords : *Morocco* ; *Erosion* ; *Runoff Plots* ; *Sediment Exportation* ; *Watershed*.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un problème environnemental majeur dans les zones arides et semi-arides. Elle est favorisée par la faible couverture des sols et l'agressivité des précipitations, associées au surpâturage quasi généralisé. L'érosion manifeste ses effets négatifs au niveau du sol lui-même en diminuant sa fertilité et son potentiel écologique et pastoral, mais elle est également préjudiciable au gestionnaire de l'eau du fait de l'envasement des barrages. Une gestion correcte des phénomènes d'érosion passe par leur évaluation spatialisée afin d'identifier les zones à risque. Si un examen visuel permet souvent d'estimer qualitativement l'érosion affectant un sol, sa quantification nécessite des observations longues et coûteuses. Pour pouvoir estimer l'érosion à l'échelle d'un bassin versant à partir de variables spatialisées plus abordables (substrat, type de sol, végétation, pluviométrie, morphologie, etc.), différentes approches de modélisation de type « SIG » sont disponibles. Nous présentons ici une première analyse de mesures

d'érosion réalisées à différentes échelles dans un bassin versant de montagne, dans la perspective d'une modélisation spatialisée de l'érosion.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude concerne le bassin versant du Rheraya (228 km²), situé dans le Haut-Atlas de Marrakech (Maroc), dont les altitudes varient de 925 m à 4165 m. Le climat est semi-aride, caractérisé par une grande irrégularité spatiale et temporelle des précipitations, dont une partie tombe sous forme d'orages. L'hétérogénéité spatiale est due au relief (de 300 à 900 mm/an, pour une moyenne de 360 $mm.an^{-1}$). Le substratum de la zone aval du bassin comprend des argiles rouges permotriasiques et des calcaires localement marneux, alors que les deux tiers amont sont constitués par des formations volcaniques (andésites, granites). La végétation naturelle est constituée de quelques boisements plus ou moins denses de thuya au nord du bassin, et de steppes à chamaephytes partout ailleurs, en général très dégradées par le surpâturage et les prélèvements anthropiques.

Sur les principales unités de paysage, des mesures d'érosion *in situ* sont réalisées sous forme de simulations de pluies et de parcelles d'érosion. Des mesures de transport de sédiments ont été effectuées à l'exutoire du bassin. Nous avons ensuite comparé ces mesures pour une première évaluation des processus d'érosion dans ce bassin.

Quatre parcelles d'érosion d'environ 150 m^2 ont été installées et observées pendant deux ans sur les principaux sols du bassin. 29 simulations de pluies ont également été réalisées sur ces sites en utilisant un simulateur manuel sur 1 m^2 (Roose, 1997). Ces simulations ont permis une première mise en évidence des contrastes importants existant entre les *badlands* sur argiles et le reste du bassin, avec des turbidités variant de 3 g/l à 325 g/l (Cheggour, 2006). La répartition des précipitations a été estimée au moyen de 9 pluviomètres disposés sur l'ensemble du bassin. Malgré des erreurs locales d'observation, ils ont permis de connaître les substrats touchés par chacun des évènements ayant donné lieu à une crue significative. Enfin, l'exutoire du bassin est équipé par l'Agence de bassin hydrologique du Tensift. Les débits y sont mesurés 4 fois par jour par relevés visuels des hauteurs, et des jaugeages sont effectués chaque mois pour ajuster la calibration. La fréquence d'observation augmente lors des crues afin de bien décrire le pic. Systématiquement tous les 7 jours, et régulièrement lors des crues, l'observateur prélève des échantillons d'eau pour l'analyse de la turbidité par filtration gravitaire ou sous vide pour les faibles charges. 424 échantillons ont ainsi été analysés en 2 ans. Les données de débits et de turbidité ont été traitées grâce au logiciel *Hydraccess* (Vauchel, 2005) pour estimer les exportations journalières de sédiments.

2. RÉSULTATS

Le tableau 1 résume deux années d'observation des parcelles d'érosion. Compte tenu de l'irrégularité des précipitations, cette durée n'est pas suffisante pour estimer correctement l'érosion moyenne, mais elle nous permet d'avoir une première idée des ordres de grandeurs des phénomènes.

Tab. 1. Bilan des mesures sur parcelles d'érosion pour les principaux types de sols du bassin versant du Rheraya

Site	Infiltration estimée en mm/h	Texture (% de sable)	Nombre d'évène-ments ruisselants par an (> 0,1 mm)	Matières en suspension exportées t/ha/an	Exportation de l'évènement majeur observé t/ha/an	% surface du bassin	Contribution à l'ensemble du bassin (t/ha/an)
Parcours sur sol volcanique bon état	60	74	3	0,015	0,014	40	0,006
Parcours sur sol volcanique dégradé	30	78	3	0,342	0,661	30	0,1026
Parcours sur sol argilo-calcaire	20	27	5	0,161	0,145	29	0,04669
Ravines sur argile	3	7	10	297	100	1	2,97

On note une bonne liaison entre le nombre d'évènements ruisselants (lame supérieure à 0,1 mm) et la vitesse d'infiltration du sol estimée à partir des simulations de pluies (Cheggour, 2006). Le ruissellement est bien ici un processus hortonien, ce qui explique la rareté des évènements érosifs de surface qui se produiront seulement lors des orages, dont l'intensité dépasse la capacité d'infiltration du sol. Seules les ravines sur argiles, étant donné leur très faible capacité d'infiltration, ruissellent souvent, pour des évènements de plus faible intensité. Ces différences d'infiltration se combinent à de fortes variations de détachabilité des sols, liées à leur texture, et induisent un bilan d'érosion extrêmement contrasté selon les sols. Relativement aux autres sols du bassin, les argiles présentent une érosion extrême, résultante de leur imperméabilité et de leur faible cohésion, ce qui est classique pour ce genre de substrat (Oostwoud, 1998). Inversement, les sols volcaniques ruissellent peu et sont de plus de texture plus grossière avec de nombreux cailloux, donc générant moins de suspension.

À partir de la carte géologique, nous avons estimé la représentativité de chacune des parcelles d'érosion, et partant, de calculer leur contribution à l'érosion totale du bassin (tab. 1). Cette généralisation spatiale rudimentaire à partir du seul substrat est possible ici du fait de la variabilité relativement faible des états de surface sur chaque type de sol, occupés principalement par des parcours. On en déduit que malgré la faible surface représentée par ces zones de *badlands* (1 %), elles contribuent de manière écrasante (près de 95 %) à l'érosion totale du bassin, phénomène déjà souligné par divers auteurs (Marston, 1999). Un des principaux facteurs d'incertitude de ce bilan provient de la surface occupée par les zones ravinées sur argiles. Ces zones sont peu visibles sur des photographies aériennes, et malgré une signature assez bien différenciée, elles sont également peu

détectables sur des images satellites SPOT multispectrales (pixel 20 m). Il est probable que des images multispectrales très haute résolution de type *QuickBird* (pixel 2,4 m) permettraient de les identifier plus précisément. Toutefois, afin de ne pas sous-estimer l'influence de ces ravines, nous avons retenu la borne supérieure des estimations de surfaces effectuées (1 %).

L'analyse des chroniques de débits et transports solides journaliers à l'exutoire a confirmé l'irrégularité des processus érosifs. L'essentiel des transports a lieu durant les crues, et pour l'année 2004-2005, une seule crue est responsable de plus de la moitié des exportations. Le tableau 2 présente les bilans de transports solides à l'exutoire. Les valeurs annuelles mesurées pour 2003-2004 et 2004-2005 sont bien comprises dans l'intervalle, large, communiqué par l'agence de bassin (DRPE 1988), mais elles sont cependant nettement supérieures en regard des débits observés. Ce résultat partiel n'est cependant pas suffisant pour conclure à une augmentation relative significative des transports solides.

Tab. 2. Exportations de sédiments du bassin versant du Rheraya

		Débit moyen annuel en m^3/s	Exportations en t/ha/an
Références Agence de bassin	Année sèche	0,65	0,65
	Année moyenne	1,5	1,85
	Année humide	2,7	22,35
Observations 2003/2004		0,76	5,9
Observations 2004/2005		0,74	2,9

La comparaison entre l'extrapolation des mesures annuelles sur parcelles (tab. 1) et les exportations à l'exutoire (tab. 2) montre des chiffres voisins, les exportations étant toutefois supérieures. Pour 2003-2004 et 2004-2005, la contribution estimée des ravines est respectivement de 3,9 et 2 t/ha/an, ce qui est bien proportionnel aux exportations totales (5,9 et 2,9 t/ha/an). Lors de l'extrapolation spatiale, nous avons veillé à ne pas sous-estimer le rôle des ravines. Mais il est possible que nous ayons sous-estimé l'érosion des autres sols, très étendus et faiblement décrits par seulement trois parcelles. Il faudrait cependant une correction très forte pour parvenir à égaler les exportations, ce qui semble peu probable. Une hypothèse plus vraisemblable est que, au moins pour les deux années étudiées, les exportations sont effectivement plus importantes que les départs sur les versants, montrant le rôle important de la reprise des sédiments du lit de l'oued et de l'érosion des berges. La spatialisation des pluies a montré qu'il n'y avait pas d'effet du lieu de chute de la pluie (argiles/autres sols) sur la turbidité du pic de crue, et cela, malgré une assez bonne relation débits turbidités ($R^2 = 0,8$). Ceci tend à confirmer le rôle de l'érosion du lit de l'oued dans le tamponnement de la charge solide. Ces sédiments repris dans le lit de l'oued seraient issus d'évènements érosifs exceptionnels dont les dépôts peuvent mettre plusieurs

années à se résorber, ainsi que de l'érosion des terrasses agricoles, dont l'observation visuelle montre qu'elles sont souvent sapées lors des crues. Une autre hypothèse possible est que cette érosion « manquante » soit le fait d'érosion linéaire sur les versants. Toutefois, l'observation visuelle montre que les sols y sont peu épais et donnent rarement lieu à des ravines profondes, sauf dans les bas de versants autour de certains villages (surpâturage). En effet, les ruissellements sur les versants sont rapidement canalisées par des chenaux stabilisés (roche mère ou empierrement) jusqu'au lit majeur de l'oued. Il est ainsi peu probable que l'érosion linéaire des versants, même si elle existe bien, fournisse suffisamment de matière pour équilibrer le bilan.

CONCLUSION

Ces premiers résultats de mesure de l'érosion montrent que malgré les effets d'échelles qui interviennent au cours des processus d'érosion entre la parcelle et l'exutoire, et que nous avons négligé ici, on parvient à relier grossièrement les départs au niveau de parcelles et les sorties du bassin. Malgré la taille du bassin et son hétérogénéité apparente, quelques parcelles bien choisies permettent ainsi d'estimer l'importance de l'érosion. Celle-ci est dominée par quelques zones de *badlands* argileux qui s'avèrent produire l'essentiel des sédiments exportés par le bassin (95 %). Les aménagements, tels que banquettes et plantations, seuils en gabion, ont donc bien un effet en amont sur la stabilisation des sols, et surtout en aval sur la régularisation des débits. En revanche, ces zones ne sont pas productrices de sédiments susceptibles d'envaser les retenues. Ainsi, dans une perspective de contrôle de l'envasement, ce sont plutôt les *badlands* argileux qui doivent retenir toute l'attention des aménageurs. Des techniques adaptées doivent être recherchées, car les reboisements réalisés en 1968 se sont soldés par un fort taux d'échec.

Références bibliographiques

CHEGGOUR A., SIMONNEAUX V., SABIR M., ROOSE E., 2006. Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluie sur les principaux sols du bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc), International Soil Conservation Organisation Symposium, May 14-19 2006, Marrakech, Morocco.

DRPE (DIR. DE LA RECHERCHE ET DE LA PLANIFICATION DE L'EAU), 1988. *Étude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou, Bou, Regreg, Oum er Rbia et Tensift. Motor Columbus (Suisse), Coyne et Bellier (France), CID (Maroc), Ingema (Maroc)*.

MARSTON RICHARD A., DOLAN LAWRENCE S., 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology* 31: 313–23.

OOSTWOUD WIJDENES D. J., ERGENZINGER P., 1998. Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *Catena* 33: 179-200.

ROOSE E, SMOLIKOWSKI B., 1997. Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap-Vert. *Bull. Réseau Érosion* 17: 282-296.

VAUCHEL, 2005. *Hydraccess v 2.1.4 : logiciel de gestion et traitement de données hydro-météorologiques*. Institut de recherche pour le développement (IRD), Paris.

INFLUENCE DE L'UTILISATION D'UN SOL BRUN VERTIQUE SUR LES STOCKS DE CARBONE DU SOL. LES RISQUES DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION ET LE DEVENIR DU CARBONE ÉRODÉ (BASSIN DE L'OUED RHERAYA, HAUT-ATLAS, MAROC)

E. ROOSE*, D. BLAVET*, M. SABIR, T. OUAGGA**, A. CHEGGOUR***, V. SIMONNEAUX****, R. OLIVER*****, H. FERRER*, J. LOURI* et J.-L. CHOTTE***

** IRD, UR SeqBio, B.P. 64501, F 34394 Montpellier CEDEX 5 ; Roose ou Blavet@mpl.ird.fr*
*** ENFI, B.P. 511, Salé, Maroc ; Sabirenfi@wanadoo.net.ma*
**** Université El Cadi Ayyad, département de géologie, Marrakech, Maroc ; geol_ch@yahoo.fr*
***** IRD, UMR CNES-CNRS-IRD-UPS CESBIO, Marrakech, Maroc ; Simonneaux@ucam.ac.ma*
****** CIRAD, UPR Recyclage et Risque, avenue Agropolis, 34398 Montpellier CEDEX 5 ; Robert.Oliver@cirad.fr*

Abstract

About the carbon sequestration in the soils of Atlas mountains, in semi-arid areas, it is important to evaluate the impact of the reforestation on erosion, carbon eroded on cropped or fallows soils. A rainfall simulator was used to measure the soil erosion on three different vegetations (cropped soils, old bush fallow and the same fallow overgrazed) on a brown vertic soil on basalt rich in clay & SOM. In the IRD Laboratory of Montpellier, were estimated the soil turbidity, the Solid Organic Carbon eroded compared to the SOC of the 1 and 10 cm topsoil and the potential mineralisation of C Eroded compared to SOC of the topsoil. The first data seemed to show that after the splah energy of the rain drops and of the runoff, the aggregation was decreased and the mineralization potential was increased. Erosion should increase the CO^2 delivered in the atmosphere when the soils are cropped, not only because more sediments and SOC are delivered to the rivers, but also because this SOC is more easy mineralised the aggregate being more fragile.

Keywords : *Morocco Atlas Mountains* ; *Soil Organic Matter* ; *C Mineralization* ; *Erosion* ; *Aggregation* ; *Greenhouse Effect* ; *Mineralisation Potential Of Sediments*.

1. PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre du réchauffement climatique, la reforestation d'une partie du Haut-Atlas permettrait de stocker une quantité appréciable de carbone dans la végétation et dans les sols. La séquestration du carbone dans les sols dépend à la fois de la masse de litière produite, de son exploitation par le bétail, du type de sol ainsi que des pertes de carbone par érosion. Or, le colloque *Érosion et*

séquestration du carbone (Roose et Barthès, 2005) a montré que ces pertes peuvent varier de 0,1 à 2 500 kg/ha/an en fonction de l'usage des terres, des stocks de carbone, de la pente et du climat. On ne dispose cependant pas d'information sur le devenir du carbone qui est érodé à l'échelle des parcelles, déposé en bas des pentes (colluvions) ou dans les plaines (alluvions), mais qui peut être remis en circulation lors des crues (Lal, 2005). L'objet de cette communication est d'évaluer :

- les différences de stock de carbone dans un sol argileux entre un matorral dense, un matorral dégradé par le parcours et une terre cultivée depuis plus de quarante ans ;
- les déterminants et les indicateurs de risque de ruissellement et d'érosion ;
- le devenir des agrégats et du carbone dans les sédiments érodés à l'échelle d'une parcelle de 1m² jusqu'à l'exutoire de l'oued Rhéraya (228 km^2).

2. MILIEU ET MÉTHODE

Dans le bassin versant du Rhéraya, situé à 60 km de Marrakech, vers 900 m d'altitude, sous un climat semi-aride (P ~ 400 mm/an), on a choisi, près du village d'Asni, un versant raide (pente de 25 % à 35 %) formé d'une coulée basaltique, dont l'altération a donné un sol brun vertique argileux relativement riche en MO et profond de plus de 60 cm. On a mis au point un simulateur de pluies manuel très simple, adapté aux versants raides, permettant de simuler des averses de fréquence 1/5 (intensité = 80 ± 5 mm/h, durée 30 à 60 mn), sur 1 m² (0,6 x 1,65 m), averses qui provoquent des ruissellements significatifs (Cheggour *et al.* 2004). Sur chaque site de simulation de pluies, on a déterminé les stocks de carbone dans le sol sur 10 cm et 30 cm (> 10 répétitions), la pluie d'imbibition sur sol sec, l'infiltration stabilisée, la lame ruisselée après 40 mm de pluie, la turbidité et la perte en terre. Au laboratoire (IRD, Montpellier), on a mesuré le C total et C organique dissous dans les eaux de ruissellement, et le C solide dans la couche superficielle du sol (sur 0-1, 0-10, et 15-25 cm) ainsi que dans les sédiments à deux niveaux d'espace (1 m², 228 km²). Enfin, on a tenté de préciser le devenir du carbone des terres érodées par comparaison de certaines caractéristiques de la couche superficielle du sol et de sédiments emportés par les eaux de ruissellement de pluies simulées sur 1 m² ou de pluies naturelles à la sortie de l'oued : taux de macro agrégats stables à l'eau (Kemper *et al.* 1986) et le taux de minéralisation potentielle du carbone des MO d'échantillons de sol et de sédiments (CIRAD, Montpellier). Pour cette minéralisation potentielle, 3 x 15 g de chaque échantillon réhumecté à 60 % de sa capacité de rétention en eau ont été mis à incuber en étuve ventilée à 28 °C pendant 28 jours dans des pots de verre étanches de 850 ml, et la quantité de CO_2 produite durant la minéralisation du carbone du sol a été mesurée par chromatographie en phase gazeuse (micro-chromatographe MTI) après prélèvements les 1er, 2e, 4e, 7e, 14e et 28e jours d'incubation.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

On observe des différences significatives de stock de carbone organique entre chacune des trois utilisations du sol tant pour la couche 0 cm-10 cm que pour la couche 0 cm-30 cm du sol, soit, respectivement, pour le sol cultivé, le matorral dégradé et le matorral dense avec litière :

- couche 0 cm-10 cm : 6,0 ; 9,9 et 14,9 $tCorg_{/ha/10cm}$ (pour 9,9 ; 13,7 et 17,1 $tCtotal_{/ha/10cm}$) ;
- couche 0 cm-30 cm : 29,2 ; 32,3 et 37,2 $tCorg_{/ha/30cm}$ (pour 41,8 ; 50,9 et 54,3 $tCtotal_{/ha/30cm}$).

Sabir et Roose (2004) ont trouvé des valeurs plus élevées dans le Rif occidental où les pluies sont plus abondantes : 95 t C/ha/30 cm pour la forêt naturelle de chêne liège, 74 t C/ha/30 cm sous matorral dégradé, 54 t C/ha/30 cm sous cultures de céréales. On observe toutefois que les variations vont dans le même sens puisqu'à chaque fois, les stocks de carbone sont moins élevés sous culture. Ils ont par ailleurs trouvé 71 t C/ha/30 cm sous agro-foresterie et 93 t C/ha/30 cm sous une plantation de pin de 40 ans, ce qui montre que la restauration des MO des sols est possible mais sous certaines conditions de culture et de temps.

Les résultats de 16 pluies simulées ont également montré que l'érosion du sol durant une averse de 40 mm en 30 minutes varie beaucoup en fonction de l'utilisation des terres et est moindre sous végétation naturelle : de 11 g/m² (0,11 t/ha/averse de 40 mm) sur matorral dense à 283 g/m² (2,83 t/ha/averse) sur matorral dégradé et 457 g/m² (4,57 t/ha/averse) sur sol cultivé.

Les états de surface et les paramètres de ruissellement mesurés durant la simulation de pluie confirment l'existence de trois modes de fonctionnement liés au type d'utilisation des terres : le matorral dégradé par le parcours fonctionne comme un stade intermédiaire entre le matorral dense (avec litière) et le sol cultivé (dénudé).

La pente a peu d'effet sur les risques de ruissellement et d'érosion à l'échelle du m², mais la « surface fermée » initiale (variant dans notre essai de 41 % à 84 %) est déterminante pour le risque de ruissellement. Par contre, la « surface nue » (variant de 2 % à 98 %) contrôle la turbidité et l'érosion et l'évolution de la surface fermée durant les averses. Roose (1994) a trouvé des résultats semblables sur d'autres sols en milieux tropicaux et tempérés.

L'analyse de 68 mesures de densité apparente dans les 10 premiers cm des 16 parcelles montre que le sol est peu dense (dapp = 1,07 ± 0,16) et qu'il n'y a pas de différence significative entre les utilisations des terres pour ce caractère. Ainsi que déjà observé sur d'autres versants cultivés (Roose 1996), les risques de ruissellement vont donc dépendre de la formation de croûtes de battance, de sédimentation ou de tassement superficiel plutôt que de la porosité de l'ensemble de l'horizon humifère.

Tab. 1. Teneur en carbone du 1er cm de sol et des sédiments érodés

Occupation du sol	C_{org} (gC.100g-^{1})		C_{total} (gC.100g-^{1})	
	Sol 0-1 cm	Sédiments	Sol 0-1 cm	Sédiments
Culture	0,54 ± 0,08	0,58 ± 0,14	0,81 ± 0,06	1,02 ± 0,35
Matorral	1,01 ± 0,10	0,93 ± 0,63	1,01 ± 0,10	1,33 ± 0,85

Ainsi que le montre le tableau 1, le taux de carbone organique des sédiments érodés issus des parcelles de 1 m² est voisin du taux de carbone du 1er cm du sol, qui est plus élevé sous matorral que sous culture. Le carbone érodé est donc fonction des teneurs en C total des sédiments (C = 0,8 à 1,3 g C.100 g-^{1}) mais surtout des pertes en terre (E au niveau du m² en cours d'averse = 11 g/m² à 457 g/m²). L'érosion du C s'élève ainsi au cours d'une pluie à 1,2 kg C/ha sur matorral litière, 31,1 kg C/ha sur parcours (matorral) dégradé et 41,1 kg C/m² sur sol cultivé sur des pentes de 24 % à 35 %. Comme il y a en moyenne trois à cinq pluies de cette importance par an, on peut estimer des pertes de C de l'ordre de 6 kg C/ha/an à 180 kg C/ha/an. Ces résultats sont compris dans les échelles de pertes trouvées en pays tropicaux et méditerranéens (Roose et Barthès, 2005).

Le taux d'agrégats stables diminue de 30 % de la surface du sol aux sédiments (après 1 m de parcours) et s'annule à l'exutoire de l'oued : plus le parcours est long, moins les agrégats sont abondants (déposés ou détruits), mais en temps de forte crue, la dégradation des berges de l'oued peut apporter à l'exutoire des blocs de terre non entièrement désagrégés et plus riches en MO et en agrégats résiduels (par exemple : 1,36 ± 0,30 g C_{org}.100 g-^{1} (n = 5) et 9 % d'agrégats > 200 µm en période de crue, contre 0,52 ± 0,12 g C_{org}.100 g-^{1} (n = 8) et 0,8 % d'agrégats hors crue).

Les premiers résultats de minéralisation potentielle des MO du sol et des sédiments apparaissent à la figure 1 (résultats cumulés). Ils suggèrent que la teneur en carbone organique pourrait être un déterminant principal du potentiel de minéralisation. En effet, pour des matériaux de même nature (sol ou sédiment), ce potentiel (exprimé ici en mg de C dégagé par kg de sol) augmente lorsque la teneur initiale en carbone organique du matériau augmente. C'est le cas entre un sol sous culture contenant 0,68 g C_{org} kg^{-1} et un sol sous matorral contenant 1,76 g C_{org} kg^{-1} (fig. 1a), mais aussi entre des sédiments transportés par l'oued hors période de crue contenant 0,39 g C_{org}.kg^{-1} et en période de crue contenant 1,84 g C_{org}.kg^{-1} (fig. 1b).

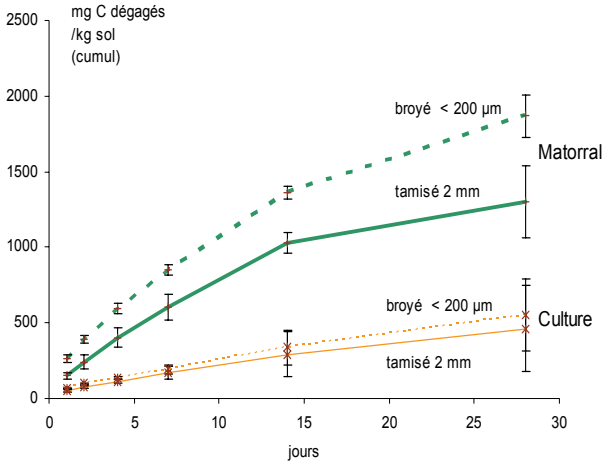
Ainsi que le montre la figure 1a, la taille des agrégats semble également influencer ce potentiel. En effet, pour un même matériau, ce potentiel est plus élevé lorsque l'on broie les agrégats à une taille inférieure à 200 µm, ce qui pourrait s'expliquer par un effet de protection contre la minéralisation de la matière organique au sein des agrégats (Feller et Beare, 1997).

Enfin, ainsi que le montre la figure 2, des sédiments issus de pluie simulées contenant 0,59 g C_{org}.kg^{-1} ont un potentiel de minéralisation du carbone (exprimé en mg C dégagé/kg de sol ou en mg C dégagé/g de C organique) significativement plus élevé que le sol cultivé en place (0 cm-10 cm),contenant pourtant davantage

de carbone organique (0,68 g C_{org} kg^{-1}). Ceci pourrait s'expliquer en partie par le fait que ces sédiments possèdent moins de macro agrégats susceptibles de protéger la matière organique contre la minéralisation. Néanmoins, il est possible que d'autres effets liés à la composition de la matière organique et à son environnement physico-chimique interviennent sur le potentiel de minéralisation. Il nous faut encore vérifier ces hypothèses sur une deuxième série (140 échantillons, dont les mesures sont en cours). En particulier, il nous faut vérifier que cette différence n'est pas influencée par le mode de traitement des sédiments, dispersés dans les eaux de ruissellement et floculés au sulfate d'alumine à dose de 1 cm^3 par litre de suspension puis séchés à 40 °C à l'étuve ventilée.

Fig. 1. Dynamique comparée de la minéralisation du carbone dans des situations à « forte » et « faible » teneur en carbone organique

1a. Couches 0 cm-10 cm du sol contenant 1,76 $gC_{org}.kg^{-1}$ sous matorral et 0,68 $gC_{org}.kg^{-1}$ sous culture (échantillons tamisés à 2 mm et broyés à 200 µm)



1b. Sédiments recueillis dans l'oued contenant 1,84 $gC_{org}.kg^{-1}$ en période de crue et 0,39 $gC_{org}.kg^{-1}$ hors période de crue (échantillons tamisés à 2 mm)

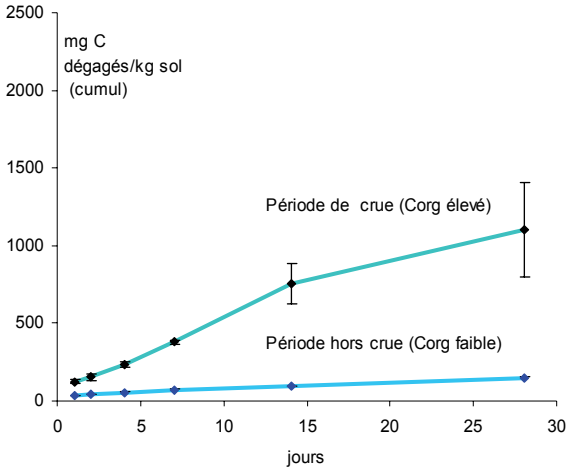
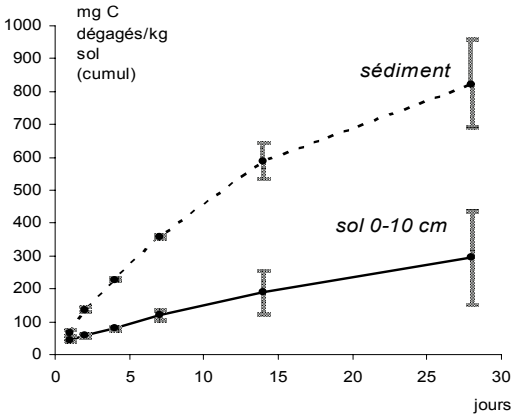
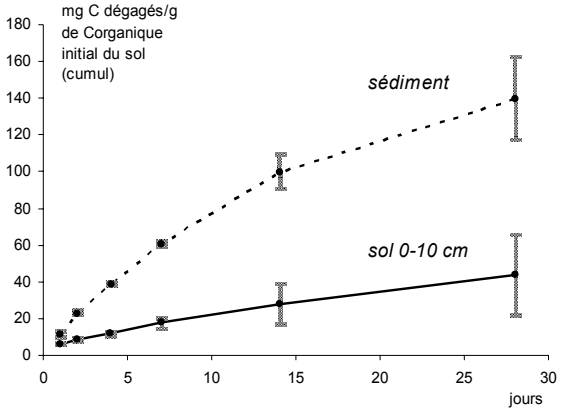


Fig. 2. Dynamique comparée de la minéralisation du carbone dans un sol cultivé de surface (couche 0 cm-10 cm contenant 0,68 $gCorg.kg^{-1}$, et dans les sédiments produits par pluies simulées de 80 mm/h sur ce sol (0,59 $g.Corg.kg^{-1}$) (échantillons tamisés à 2 mm)

2a. Données rapportées à la masse de matériau



2b. Données rapportées à la teneur initiale en carbone organique



CONCLUSIONS

Cette étude confirme que le stock de carbone organique du sol est significativement réduit par la culture sur un sol brun vertique couvert initialement de matorral. De plus, pour des pentes de 24 % à 35 %, les risques de ruissellement et d'érosion s'avèrent significativement plus élevés sous culture. Ensuite, on observe que l'érosion du carbone augmente fortement dans le sol cultivé puisqu'elle peut s'élever au cours d'une pluie à 1,2 kg C/ha sur matorral avec litière, contre 31,1 kg C/ha sur parcours (matorral) dégradé et 41,1 kg C/m² sur sol cultivé.

Par ailleurs, d'après des premiers résultats obtenus à propos du devenir du carbone érodé, le rôle de l'érosion sur le carbone ne se limiterait pas à un simple transfert latéral. En effet, ces résultats montrent une augmentation significative du potentiel de minéralisation entre des sols et des sédiments issus de ces sols et exportés par l'érosion sous pluie simulée. Ceci pourrait être lié à la diminution de la taille moyenne des agrégats stables qui s'observe lors du transport des fragments de sol érodés. Des modifications dans la composition de la matière organique et dans son environnement physico-chimique pourraient également intervenir dans ces différences de potentiel de minéralisation générées par l'érosion. De nouvelles données de potentiel de minéralisation (en cours d'acquisition) devraient permettre de vérifier ces hypothèses.

Références bibliographiques

CHEGGOUR A., SIMONNEAUX V., ERROUANE S., SABIR M., ROOSE E., 2004. Spatial erosion risks in a semi-arid montainous basin of Atlas, Morocco (Rheraya valley). Communication to Int. Symposium of Luang-Phrabang, Laos, 14-17/12/2004, *Global change in mountainous regions*, 41 diapositives/ PPT.

FELLER C., BEARE M. H., 1997. Physical control of some SOM dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.

KEMPER W. D., ROSENAU R. C., KLUTE A., 1986. Aggregate stability and size distribution, Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. *Amer. Soc. Agron.*, Madison, 425-442.

LAL R. 2005. Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. In: ROOSE, LAL, FELLER, BARTHÈS, STEWART (eds.), *Soil erosion and C dynamics*, *Advances in Soil Sciences*, CRC publisher, USA, 23-36.

ROOSE E., 1994. Introduction à la GCES. *Bulletin des sols FAO* n° 70, 420 pp.

ROOSE E., 1996. Méthodes de mesure des états 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, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull. Réseau Érosion,* Montpellier, 16 : 87-97.

ROOSE E., DE NONI G., PRAT C., GANRY F., BOURGEON G., 2004. Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone. 1. Érosion du Carbone. Bull. Réseau Érosion 22, 493 pp. 2. Séquestration du Carbone et érosion des sols. *Bull. Réseau Érosion* 23, 636 pp.

ROOSE E., BARTHÈS B., 2005. Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions. *In* Roose, Lal, Feller, Barthès, Stewart (eds.), *Soil erosion and carbon dynamics, Advances in Soil Sciences*, CRC publisher, Bocca Raton, USA: 55-72.

SABIR M., ROOSE E., 2004. Influences du couvert végétal et des sols sur les stocks de carbone et les risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes méditerranéennes du Rif occidental, Maroc. *Bull. Réseau Erosion*, Montpellier, 23 : 144-154.

EFFETS D'ÉCHELLE ET VARIABILITÉ DE L'ÉROSION ENTRE PARCELLE ET BASSIN VERSANT EN RÉGION DE VIGNOBLE MÉDITERRANÉEN (FRANCE)

Y. LE BISSONNAIS, D. RACLOT, P. ANDRIEUX, R. MOUSSA, X. LOUCHART et M. VOLTZ

INRA-IRD UMR LISAH Campus Agro, place Viala, 34060 Montpellier CEDEX 1, France ; lebisson@supagro.inra.fr

Abstract

The objective of this paper is to identify the nature and the cause of spatial and temporal variations in erosion response for areas ranging from small fields to 1 km^2 catchment. Two data sets are studied: data from plots of ca. 1000 m^2 and 3000 m^2 consisting of vineyard with either mechanical or chemical weeding; data from a catchment of 91 ha with 70% vineyard. Between the two scales, a significant decrease in the erosion rate is observed as the area increases. This trend, which has already been observed by many researchers, confirms that catchment erosion cannot be considered as the sum of individual field's erosion. In this context, the scaling transition between the plots and the 1 km^2 catchment can be analysed in terms of connectivity between the sediment producing and deposition areas. Furthermore, data with contrasting land management for the field scale show large differences for the erosion rate.

Keywords : *Southern France* ; *Scale Effect* ; *Vineyard* ; *Erosion* ; *Plots* ; *Watershed*.

INTRODUCTION

La modélisation de l'érosion à l'échelle du bassin versant, tout comme l'évaluation et la cartographie régionale de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique, repose le plus souvent sur des observations ou des mesures ponctuelles sur des petites parcelles expérimentales. Une question importante est donc d'évaluer dans quelle mesure des résultats issus d'une échelle peuvent être extrapolées à une échelle plus large (Kirkby, 2001). Les résultats les plus courants pour le ruissellement et l'érosion font état d'une diminution de la réponse lorsque l'échelle augmente (Joel *et al.*, 2002 ; Le Bissonnais *et al.*, 1998, Cerdan *et al.*, 2004), mais d'autres résultats indiquent une tendance inverse ou encore une absence de tendance ou une variabilité de tendance (Mathier et Roy, 1996 ; Cammeraat, 2002).

On peut identifier différentes causes à l'origine de problèmes d'échelles (Blosch et Sivapalan, 1995) : par exemple, l'hétérogénéité spatiale des processus de surface, la non-linéarité des réponses, des effets de seuil dans la manifestation de certains

processus ou encore le développement de propriétés émergeantes à certaines échelles. Plusieurs solutions ont été proposées pour prendre en compte ces problèmes de changement d'échelle en hydrologie : une approche globale à l'échelle du bassin, s'appuyant sur des paramètres moyens « effectifs », et une calibration basée sur des observations. L'inconvénient est que cette calibration n'est plus valide dès lors que les conditions changent. Une autre réponse est d'utiliser un modèle distribué avec une description d'unités élémentaires basée sur les observations locales. La question qui se pose est alors celle du choix de ces unités élémentaires et de la prise en compte des interactions entre elles au sein d'un schéma agrégatif. Il devient nécessaire de paramétrer ces interactions.

L'objectif de notre étude est d'analyser, pour une série d'événements pluvieux, des mesures d'érosion simultanées à deux échelles emboîtées correspondant, d'une part, à l'échelle d'unités élémentaires en milieu cultivé, les parcelles, et d'autre part, à l'échelle globale d'intérêt, le bassin versant élémentaire, ceci, afin d'évaluer les variabilités spatiales et temporelles de l'érosion pour pouvoir *in fine* les prendre en compte dans la modélisation.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude a été réalisée sur le bassin de Roujan (91 ha), situé dans le département de l'Hérault (France). Les sols, essentiellement carbonatés et de texture sablo-limoneuse, se développent sur un substrat géologique miocène plus ou moins remanié et sur des dépôts fluviatiles pliocènes. Le climat est de type méditerranéen sub-humide, à saison sèche prolongée. La pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 650 mm et l'ETP (Penman) annuelle moyenne de 1 090 mm. La culture principale est la vigne. Le site est fortement anthropisé : réseau de fossés, versants aménagés en terrassettes… L'intensification des systèmes de culture date de plusieurs décennies et s'accompagne à présent de forts processus de pollution des eaux par les produits de traitement agricole. Une hétérogénéité importante des pratiques culturales est observée : désherbage chimique total des sols *vs* travail mécanique. L'équipement hydro-météorologique de base, en place depuis mai 1992, est constitué d'un réseau de pluviomètres et pluviographes, d'un dispositif de mesure des débits et des matières en suspension aux exutoires du bassin versant et de deux parcelles à itinéraires culturaux différents et d'un réseau de 8 stations de mesure des teneurs en eau du sol et du potentiel hydrique. Roujan fait partie de l'Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau. Les caractéristiques des deux parcelles de mesure sont présentées dans le tableau 1.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Vingt événements couvrant une large gamme de conditions climatiques et d'états de surface des parcelles ont été sélectionnés. Les résultats obtenus pour ces événements ayant entraîné du ruissellement sur au moins une des deux parcelles de mesure au cours de la période 1995-1999 sont présentés dans le tableau 2. Nous discuterons de ces résultats du point de vue de la variabilité spatiale entre parcelles puis vis-à-vis du changement d'échelle de la parcelle au bassin versant.

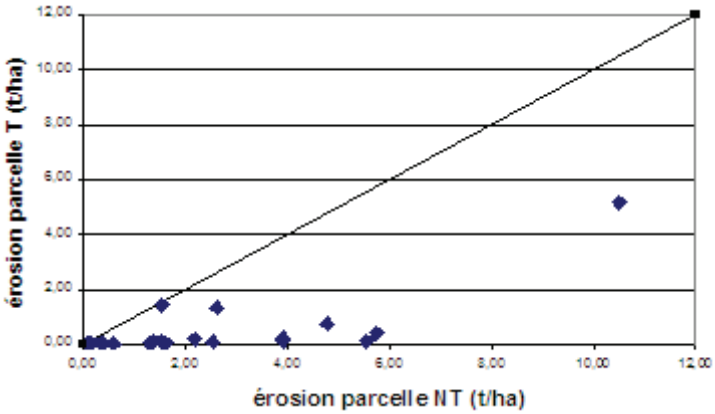
Tab. 1. Caractéristiques des deux parcelles de mesure du bassin versant de Roujan

Paramètres	Parcelle travaillée (T)	Parcelle non travaillée (NT)
Superficie (ha)	0,324	0,12
Orientation	NS	EW
Pente (%)	2-10	6-19
Longueur de pente (m)	108	60
Argile < 2 µ m (%)	22	18,6
Désherbage chimique	rang uniquement	total
Vendange	mécanique	manuelle

2.1. Variabilité de l'érosion entre parcelles en fonction des pratiques culturales

Une difficulté pour ce type de mesure sur des parcelles agricoles en conditions naturelles est qu'il est impossible de faire varier strictement un seul paramètre à la fois et que plusieurs facteurs peuvent éventuellement expliquer les différences observées. Cependant, la comparaison des résultats obtenus sur les deux parcelles expérimentales montre clairement que l'érosion est nettement supérieure sur la parcelle non travaillée pour la plupart des événements (fig. 1). Par ailleurs, l'analyse des facteurs explicatifs du ruissellement (tab. 3) indique que ce dernier est nettement moins expliqué par la hauteur de pluie pour les parcelles travaillées ($R^2 = 0,33$) que pour les parcelles non travaillées ($R^2 = 0,85$). Autrement dit, le travail du sol induit une variabilité temporelle de la réponse hydrologique et érosive des parcelles qui se combine à la variabilité spatiale des pratiques. Il semble donc particulièrement difficile et risqué d'attribuer au bassin versant une valeur moyenne équivalente en ce qui concerne les paramètres de ruissellement et d'érosion.

Fig. 1. Comparaison de l'érosion par événement sur les parcelles travaillée et non travaillée



Tab. 2. Caractéristiques des pluies, du ruissellement et de l'érosion pour les événements étudiés.

Date	Hauteur de pluie (mm)	I_max_1 min (mm/h)	I_max_ 30 min (mm/h)	Ruissellement(mm)			Q_max (1 min) (l/s)			Coeff. ruissellement			Erosion (t/ha)		
				NT	T	EXU	NT	T	EXU	NT	T	EXU	NT	T	EXU
13/10/95	40,31	101,01	38,88	20,5	26,2	2,6	17,2	39,6	448,9	51,0	64,9	6,40	1,53	1,45	0,10
08/12/95	21,17	11,46	9,30	7,9	3,9	1,6	2,1	1,9	131,5	37,5	18,6	7,44	0,15	0,06	0,01
05/05/97	11,22	121,71	22,12	5,5	2,9	0,1	10,2	13,1	60,3	49,6	25,7	1,27	1,52	0,14	0,01
01/06/97	37,58	44,57	17,84	14,8	4,5	1,3	6,5	2,2	108,0	40,1	11,9	3,54	1,30	0,05	0,01
05/06/97	24,68	51,61	20,46	10,1	4,8	1,4	10,2	6,9	267,2	41,2	19,4	5,75	1,37	0,12	0,02
11/08/97	36,89	100,17	49,74	13,7	2,7	0,4	21,4	14,6	115,6	37,2	7,2	0,97	3,90	0,25	0,02
01/09/97	36,16	192,32	49,43	23,2	11,2	0,6	44,7	40,5	201,1	64,3	30,8	1,71	4,78	0,75	0,02
07/10/97	8,68	72,00	16,36	2,5	0,1	0,1	10,1	0,9	47,3	28,8	1,5	1,39	0,58	0,00	0,01
03/11/97	67,02	75,06	25,55	39,0	16,4	5,5	13,5	9,3	584,7	58,3	24,4	8,18	2,54	0,08	0,10
20/11/97	3,72	36,90	7,19	1,5	0,3	0,1	1,5	1,0	26,6	39,5	8,4	3,25	0,08	0,00	0,00
25/11/97	8,65	36,83	13,09	4,6	2,3	1,0	4,8	4,8	186,0	53,8	26,2	12,08	0,12	0,03	0,05
16/12/97	49,51	17,14	9,31	14,1	3,0	6,5	3,1	1,0	259,4	28,4	6,1	13,17	0,21	—	0,02
29/04/98	15,65	136,67	23,98	11,7	2,6	0,3	38,5	6,6	98,3	75,3	16,5	1,93	5,55	0,13	0,07
02/05/98	9,29	67,46	18,09	7,4	3,8	0,5	16,2	14,4	157,0	80,2	40,7	5,54	2,19	0,18	0,04
07/09/98	35,61	78,45	36,08	21,9	13,9	2,0	22,1	43,9	630,5	61,6	39,0	5,74	4,28	—	0,08
26/04/99	11,73	15,00	10,86	6,2	1,7	0,1	3,5	2,5	46,8	52,9	14,9	0,70	0,38	0,04	0,00
03/05/99	96,06	15,25	7,78	43,7	7,5	6,1	3,4	0,8	341,5	45,5	7,8	6,35	1,61	0,04	0,05
17/05/99	37,51	41,07	14,05	22,7	6,7	3,5	9,6	10,1	542,4	60,5	17,9	9,31	2,61	1,32	0,11
02/08/99	19,10	126,26	30,04	9,8	1,2	0,2	30,8	4,3	98,3	51,2	6,5	1,05	3,90	0,12	0,01
06/08/99	62,67	190,30	106,70	45,2	24,1	6,5	44,4	59,5	1095,4	72,4	38,5	10,32	10,50	5,16	0,21

2.2. Évolution de l'érosion avec l'échelle de mesure

Un effet d'échelle très important pour l'érosion apparaît entre les parcelles et le bassin versant sur ce jeu de données, avec des valeurs moyennes d'un ou deux ordres de grandeurs plus faibles pour le bassin que pour la parcelle non travaillée. Cette tendance générale est largement liée à une diminution analogue des coefficients de ruissellement. Si l'on analyse les facteurs explicatifs de l'érosion, on observe que c'est le débit maximum sur une minute qui donne le meilleur coefficient de détermination pour l'érosion, et ceci, aux différentes échelles. Au contraire, les paramètres caractérisant l'intensité de la pluie, qui sont bien explicatifs de l'érosion à l'échelle des parcelles, ne sont plus pertinents à l'échelle du bassin. Une explication probable de ces résultats est que les processus dominants ne sont pas les mêmes aux différentes échelles : à l'échelle de la

parcelle, combinaison de détachement par la pluie et le ruissellement avec une forte variabilité du ruissellement et donc de la part de l'érosion expliquée par ce dernier ; à l'échelle du bassin, dépôts des sédiments dans le réseau de circulation de l'eau liés aux variations de débit du ruissellement entre les parcelles et l'exutoire. En conséquence, c'est probablement plus la géométrie et la continuité de ce réseau et son influence sur les processus de dépôt qu'un facteur strictement dimensionnel qui explique l'effet d'échelle sur l'érosion lorsque l'on passe de la parcelle au bassin versant.

Tab. 3. Analyse des facteurs déterminants de l'érosion

Variable explicative (X)	Variable expliquée (Y)	Coefficient de détermination linéaire (R^2)		
		NT	T	EXU
Hauteur de pluie	Ruissellement	0,85	0,33	0,73
Hauteur de pluie	Érosion	0,10	0,18	0,28
Ruissellement	Érosion	0,33	0,52	0,38
Intensite-max-1min	Érosion	0,66	0,57	0,30
Intensite-max-30min	Érosion	0,79	0,79	0,46
Qmax-1min	Érosion	0,79	0,71	0,85
Intensite-max-1min	Qmax-1min	0,87	0,67	0,31
Intensite-max-5min	Qmax-1min	0,89	0,67	0,36
Intensite-max-30min	Qmax-1min	0,61	0,72	0,53

CONCLUSION

La question des échelles de mesure est primordiale pour l'évaluation des transferts de sédiments dans l'environnement. Les résultats présentés ici sont en accord avec d'autres études qui indiquent un effet d'échelle important entre la parcelle et le bassin versant. Cet effet peut être expliqué en partie, par la variabilité spatiale et temporelle importante de la réponse érosive des unités spatiales élémentaires, et, surtout, par l'existence d'interactions spatiales et l'apparition de processus émergeants liés aux caractéristiques et à la continuité du réseau de circulation de l'eau entre ces unités, qui déterminent les processus de dépôt ou de transfert des sédiments vers l'aval. Ces résultats montrent la nécessité de décrire et de prendre en compte cette variabilité et l'ensemble de ces processus émergeants dans la modélisation de l'érosion à l'échelle du bassin versant.

Références bibliographiques

BLÖSCHL G., SIVAPALAN M., 1995. Scale issues in hydrological modelling. *Hydrol. Process*. 9: 251–290.

CAMMERAAT L. H., 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surf. Process. Landf.* 27, 11: 1201–1222.

CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., GOVERS G., LECOMTE V., VAN OOST K., COUTURIER A., KING C., DUBREUIL N., 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology*, 299, 4-14.

JOEL A., MESSING I., SEGUEL O., CASANOVA,M., 2002. Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes. *Hydrol. Process*. 16: 1467-1478.

KIRKBY M. J., 2001. From plot to continent: reconciling fine and coarse scale erosion models. In: STOTT D.E., MOHTAR R.H., STEINHARDT G.C. (eds.), 2001. *Sustaining the Global Farm*. 10th International Soil Conservation Organization meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 860–870.

LE BISSONNAIS Y., BENKHADRA H., CHAPLOT V., FOX D., KING D., DAROUSSIN J., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m2 to small catchments. *Soil Tillage Res.* 46: 69–80.

MATHIER L., ROY A.G., 1996. A study on the effect of spatial scale on the parameters of a sediment transport equation for sheetwash. *Catena* 26: 161-169.

GÉNÈSE DE L'ÉROSION EN MILIEU VITICOLE MÉDITERRANÉEN À SOLS BRUNS CALCAIRES : MODALITÉS, DÉTERMINANTS ET INDICATEURS POTENTIELS

D. BLAVET*, G. DE NONI*, Y. LE BISSONNAIS, M. LEONARD***, J.-Y. LAURENT*, J. ASSELINE** et E. ROOSE***

** UR IRD SeqBio, Institut de recherche pour le développement, Montpellier, France*
*** UMR INRA-IRD Lisah, Institut national de la recherche agronomique, Montpellier, France*
**** UMR CNRS-IEP/UPMF-UJF Pacte, Université Joseph Fourier, CERMOSEM, Le Pradel, France*

Abstract

The early stages of hydric erosion have been studied in several agricultural and experimental situations on calcic luvisol in the French mediterranean vineyard. Eight landuse practices were compared and submitted to simulated rainfalls of 60 mm/h (10 plots in all with 3 rainfalls/plot) : scrubland, fallow and six modes of vine growing including chemical and mechanical weeding of the inter-rows, grass covering, straw mulching, stone mulching and stone removal. The study revealed that scrubland was sensitive to runoff. We observed the higher runoff rates and soil losses under chemically weeded vineyards, and a fast protective effect against runoff and erosion in straw and stone mulched vineyards. The control of grass covering appeared to be more complex, but was promising for the sustainability of the agrosystem. Finally, we identified two indicators of soil erosion sensitivity : the soil cover which reduced significantly soil surface crusting and runoff and the soil aggregate stability, which was strongly related to SOC rate, and reduced the soil surface sealing and the surface water turbidity.

Keywords : *Southern France* ; *Erosion* ; *Vineyard* ; *Runoff Indicators* ; *Rainfall Simulation*.

INTRODUCTION

En milieu méditerranéen, l'évolution récente de l'espace viticole et des pratiques culturales et l'existence d'aléas météorologiques fortement érosifs (Le Bissonnais *et al.*, 2002), qui sont potentiellement aggravés par le réchauffement climatique, conduisent à l'augmentation des risques d'érosion des sols viticoles. Dans l'état actuel, l'avenir et la durabilité de la viticulture et de son environnement n'y sont donc pas garantis, et il apparaît de plus en plus nécessaire de se prémunir contre l'érosion depuis l'origine de ce processus plutôt que de lutter *a posteriori* contre ses conséquences en aval. On peut, pour cela, tenter de réduire la sensibilité des

sols à l'érosion par l'intermédiaire de techniques culturales adaptées. Ceci nécessite la recherche de données :

- sur les mécanismes qui président à la genèse de l'érosion et sur leurs effets (déterminants et modalités), en fonction des techniques culturales et des types de sol
- et sur des indicateurs de sensibilité à l'érosion facilitant la localisation spatio-temporelle des risques d'érosion.

Pour obtenir de telles données, nous avons mené une étude dans plusieurs situations sur un type de sol représentatif (Calcosol) afin d'analyser les modalités et déterminants des effets de phénomènes érosifs déclenchés sous différents modes d'occupation du sol, puis de rechercher certains indicateurs de sensibilité des sols face à l'érosion.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Deux situations principales ont été choisies entre 43° 30' N – 3° 20' E et 44° 36' N – 3° 55' E, dans le vignoble méditerranéen français. Elles sont localisées sur des versants représentatifs à substrat marno-calcaire et sols bruns calcaires (RPF : Calcosols ; FAO : Calcic Luvisol , USDA : Haploxeralf), à pente de 6 % à 12 %. Les précipitations sont de l'ordre de 1 000 mm/an et peuvent dépasser une intensité de 50 mm/h pendant plus d'une heure**.** La situation S1 correspond à trois stations agricoles localisées à Corconne (Gard), Saint-Mathieu (Hérault) et La Jasse (Hérault). Cette situation permet d'analyser l'effet sur la genèse de l'érosion de techniques culturales actuellement pratiquées par les viticulteurs, et basées sur le désherbage chimique total des inter rangs de vigne (Arshad *et al.*, 1999). Elle comporte une séquence de parcelles avec différents modes d'occupation du sol : parcelles en garrigue (G), parcelle en jachère (J) de 25 ans après culture traditionnelle de vigne (= témoins), parcelles de vignes âgées de 4 ans à 21 ans et désherbées chimiquement (DCT) par herbicide systémique. La situation S2 consiste en un essai agronomique en Ardèche sur des parcelles de vigne ayant subi un désherbage chimique des inter rangs durant 24 ans, et sur lesquelles cinq techniques culturales alternatives au DCT ont été mises en place dans les mois précédant cette étude (Léonard, 2003) :

- une couverture des interrangs par paillage avec 25 t/ha de paille fraîche ;
- un enherbement des interrangs constitué de 30 % de *ray-grass* anglais (*Lolium perenne*) et de 70 % de fétuque rouge (*Festuca rubra*) ;
- un travail du sol par sarclage mécanique conventionnel à 10 cm, qui produit une surface désherbée avec 40 % de cailloux, et correspond aux pratiques culturales utilisées antérieurement au désherbage chimique, avec deux variantes : sarclage avec épierrage manuel (30 % de cailloux en surface) qui s'apparente aux épierrages traditionnellement effectués en milieu méditerranéen, et sarclage avec empierrage manuel produisant une surface désherbée avec 80 % de cailloux, qui s'apparente aux *mulchs* de cailloux utilisés traditionnellement dans certains vignobles suisses (Nachtergaele *et al.*, 1998).

Les méthodes d'analyses sont fondées sur des pluies simulées de 60 mm/h qui ont été effectuées sur sol sec (fin de printemps) durant 60 mn (S1) et 90 mn (S2) sur des placettes de 1 m^2, à l'aide d'un mini-simulateur**.** L'état initial d'humidité du sol et l'intensité de ces pluies ont permis de reconstituer des conditions analogues à celles d'orages sur sol sec. Ces pluies ont été accompagnées de relevés des états de surface avant et après pluies et de prélèvements de sol. Au laboratoire, plusieurs opérations ont été effectuées à partir des relevés et prélèvements *in situ* : obtention de variables d'infiltration/ruissellement et de pertes en terre, déterminations sur la couche 0-5 cm de l'humidité anté- et post-pluie, de la densité apparente et de la stabilité des agrégats, et de paramètres associés (texture, carbone organique et inorganique sur sol tamisé à 0 mm-2 mm). Pour certaines parcelles en situation S1, la teneur en carbone organique de différentes fractions physiques du sol (Feller et Beare, 1997) et la granulométrie des sédiments ont également été déterminées.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau synthétique 1 présente quelques caractéristiques de la surface et de la couche 0 cm-5 cm du sol relevées sur sol sec avant les simulations de pluie pour l'ensemble des parcelles étudiées. Parmi les différences remarquables, on peut observer que dans les parcelles témoins sous garrigue et jachère, la teneur en carbone organique et la stabilité des agrégats (diamètre médian des agrégats stables et taux d'agrégats > 200 µm) sont significativement plus élevées que dans toutes les stations sous vigne. On note également que la teneur en argile et la densité apparente sont moindres sous garrigue et jachère que sous vigne désherbée. Par ailleurs, le taux de surface fermée, créée essentiellement par des croûtes de battance antérieures, est maximal sous vignes désherbées chimiquement. Ces différences de caractéristiques opposant garrigue et jachère, d'une part, et vignes désherbées chimiquement, d'autre part, peuvent s'accompagner d'une ablation complète des horizons A sous vigne, sans que celle-ci puisse être systématiquement imputable au ravinement.

En terme de modalités de ruissellement et de pertes en terre, il ressort des pluies simulées (tab. 2) que les parcelles sous garrigue et jachère subissent des pertes en terres insignifiantes, malgré l'existence de ruissellement sous garrigue. À l'opposé, des coefficients de ruissellement et des pertes en terre élevés sont relevés dans les parcelles de vignes désherbées chimiquement (S1 et S2) ainsi que dans la parcelle sarclo-dépierrée (S2), le maximum étant obtenu en milieu agricole dans la parcelle de vigne désherbée la plus récemment mise en culture (S1). On observe dans ces parcelles à fort ruissellement et pertes en terre une forte augmentation des surfaces fermées durant les pluies, due à la formation de croûtes de battance. Entre ces deux pôles de comportement, on peut noter une réduction significative du ruissellement et/ou des pertes en terre sous vigne en fonction de certaines techniques culturales : réduction sensible des pertes en terre en milieu agricole, lorsqu'il y a conservation des sarments de vigne sur la parcelle et très forte réduction du ruissellement et des pertes en terre en milieu expérimental, dès la première année de mise en œuvre des techniques de paillage et de sarclo-empierrage. Un classement global par notation semi-automatique (Blavet *et al.*, 2004)

Tab. 1. Caractéristiques de la surface et de la couche 0-5 cm du sol des parcelles avant les pluies (moyennes établies sur 3 répétitions pour les variables de surface et 5 répétitions pour les variables du sol)

Variables analysées	Parcelles S1 (milieu agricole)				Parcelles S2 (milieu expérimental)					
	Garrigue	Jachère	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne
		25 ans	DCT 21 ans sarments	DCT 4 ans	DCT 24 ans	Enherbée	Paillée	Sarclo-dépierrée	Sarclée	Sarclo- empierrée
Surface										
Pente (%)	9	5	7	5	12	15	17	10	14	10
Couv vég. (%) (*)	100	100	21	1	12	93	100	1	4	0
Cailloux (%)	24	15	33	7	49	3	0	27	33	84
Surface couverte (%) *	100	100	54	8	61	93	100	28	33	83
Surface fermée (%) (*)	24	15	42	56	70	43	< 10	8	7	39
Sol 0-5 cm										
$D_{app.\ (g/cm^3)}$	1,16	1,2	1,47	1,47	~ 1,4	~ 1,4	~ 1,4	~ 1,4	~ 1,4	~ 1,4
Humidité vol (g/cm^3)	0,23	0,22	0,06	0,06	0,07	0,05	0,09	0,12	0,1	0,14
$CaCO_{3\ (g/kg)}$	540	550	570	570	320	290	340	300	300	300
$C_{org\ (g/kg)}$	39	29	8	5	12	15	17	16	16	16
C/N	15	15	13	10	8	7	10	8	8	8
A (%)	24	24	34	34	35	34	33	35	35	35
S (%)	22	25	22	22	25	25	26	23	23	23
$MA_{200\ (\%)}$ **	84	90	33	36	42	43	45	54	54	54
MWD (µm) **	3148	3738	132	136	120	128	158	153	153	153

* La couverture végétale comprend la canopée, les adventices et la litière ; la surface couverte regroupe la couverture végétale et les cailloux à la surface du sol. La surface fermée est constituée des croûtes (de battance, de sédimentation et de tassement ainsi que des cailloux inclus dans la surface du sol).

** Indices de stabilité des agrégats stables à l'eau, selon Le Bissonnais (1998) : MA200 = taux d'agrégats > 200 µm ; MWD = diamètre médian (en µm) des agrégats.

Tab. 2. Ruissellement et pertes en terre issues des pluies simulées et classement des parcelles

Variables analysées		Parcelles S1 (milieu agricole)				Parcelles S2 (milieu expérimental)					
		Garrigue	Jachère	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne	Vigne
			25 ans	DCT 21 ans	DCT 4 ans	DCT 24 ans	Enherbée	Paillée	Sarclo-dépierrée	Sarclée	Sarclo-empierrée
Surface fermée (croûtes et cailloux inclus) (%)	av. pluie	24	15	42	56	70	43	< 10	8	7	39
	pdt. pluie	+ 0	+ 0	+ 58	+ 44	+ 29	+ 44	+ 0	+ 84	+ 69	+ 35
	apr. pluie	24	15	100	100	99	87	< 10	92	76	74
Pluie d'imbibition (mm)		23 ± 2,1	42 ± 0,0	9 ± 3,1	8 ± 1,0	10 ± 3,1	9 ± 4,2	53 ± 2,8	20 ± 4,8	24 ± 5,0	48 ± 15,7
Coefficient de ruissellement (%)	à 30 mn	11 ± 6,7	0 ± 0,0	25 ± 13,8	38 ± 9,1	26 ± 8,0	17 ± 9,0	0 ± 0,0	8 ± 6,9	2 ± 1,9	0 ± 0,4
	à 60 mn	49 ± 12,8	0 ± 0,0	56 ± 10,0	55 ± 11,0	48 ± 6,3	34 ± 8,1	1 ± 0,3	31 ± 11,4	9 ± 6,8	6 ± 8,8
	à 90 mn	—	—	—	—	60 ± 6,6	45 ± 8,8	9 ± 3,0	45 ± 12,0	17 ± 9,6	12 ± 13,0
Pertes en terre (g/m^2)	à 30 mn	0 ± 0,6	0 ± 0,0	29 ± 4,7	76 ± 45,2	45 ± 29,2	26 ± 13,2	0 ± 0,0	14 ± 12,8	2 ± 2,6	0 ± 0,0
	à 60 mn	3 ± 0,6	0 ± 0,0	89 ± 8,3	242 ± 132,0	111 ± 84,7	67 ± 11,9	0 ± 0,2	148 ± 54,8	42 ± 28,0	11 ± 1,0
	à 90 mn	—	—	—	—	207 ± 141,4	112 ± 16,0	2 ± 2,0	355 ± 87,2	113 ± 77,3	29 ± 8,9
		Classement des parcelles par notes d'appréciation (0 à 1)									
Imbibition et KR		0,33	1	0	0	0	0,28	1	0,44	0,72	0,89
Pertes en terre		1	1	0,38	0	0,25	0,5	1	0,5	0,75	0,88
Note globale		0,6	1	0,15	0	0,1	0,37	1	0,47	0,73	0,88

Données issues des simulations de pluies : les moyennes sont établies sur trois répétitions pour chaque variable.

Notes d'appréciation : 0 = très défavorable ; 1 = très favorable. Le calcul des notes d'appréciation porte uniquement sur la pluie d'imbibition et les paramètres de ruissellement et de pertes en terre à 30 et 60 mn qui sont disponibles sur l'ensemble des parcelles en S1 et S2. Ce calcul semi-automatique est fonction des groupes de valeurs déterminés à l'aide d'un test statistique de comparaison de moyennes (test de Newman-Keuls). Pour le détail du mode de calcul, *cf.* Blavet et al. (2004).

permet finalement d'opposer les parcelles de vigne qui ruissellent peu et présentent peu de pertes en terre (parcelles en jachère ou paillée ou sarclo-empierrées) et les parcelles désherbées chimiquement qui ruissellent beaucoup et présentent beaucoup de pertes en terre. En terme d'érosion, la parcelle sous garrigue rejoint toutefois les situations les plus favorables (pertes en terre insignifiantes). Le cas de l'enherbement en situation de classement intermédiaire peut sembler étonnant, mais ceci doit être relié au fait qu'il n'a pas été complètement maîtrisé durant l'année de sa mise en place.

On peut également observer une érosion accélérée du carbone organique sous vigne désherbée chimiquement. En effet, dans les stations de La Jasse et de Saint-Mathieu (situation S1), pour un sol contenant, en moyenne, 12 g $C_{org}.kg^{-1}$ dans la couche 0-5 cm, les sédiments issus de pluies simulées en contiennent 22 g $C_{org}.kg^{-1}$. Ceci peut s'expliquer par le fait que les fractions granulométriques < 20 µ (argile + limon fin) concentrent à elles seules les deux tiers du carbone organique (8 g $C_{org}.kg^{-1}$) et que le ruissellement exerce une exportation sélective de ces éléments fins, puisque, dans ce cas, les sédiments sont constitués de 95 % de ces éléments fins contre 58 % pour la couche 0 cm-5 cm du sol. On retrouve cette sélectivité dans la station de Corconne (S1) où les sédiments sous vigne présentent une granulométrie plus fine que le sol dont ils sont issus.

En matière de déterminants des différences de ruissellement et d'érosion, plusieurs éléments ressortent d'une analyse de corrélations entre, d'une part, les données de ruissellement et de pertes en terre (8 variables de ruissellement dont les coefficients de ruissellements et les lames ruisselées + 13 variables de pertes en terre dont pertes totales en terre et turbidité des eaux de ruissellement …) et, d'autre part, certaines caractéristiques *a priori* potentiellement déterminantes : caractéristiques de la surface du sol (12 variables dont la pente, le taux de couverture du sol, le taux de cailloux et le taux de fermeture de la porosité) et de la couche supérieure du sol (14 caractéristiques dont l'humidité initiale et la stabilité des agrégats). Pour cette analyse, notons que les données de simulation de pluie utilisées sont les moyennes obtenues à partir de trois simulations de pluies/parcelle :

- les variations de pente et d'humidité initiale de la couche 0cm-5 cm du sol ne sont pas corrélées aux variations de ruissellement et de pertes en terre ;
- des corrélations statistiquement significatives existent entre l'importance du ruissellement et l'importance des pertes en terre (par exemple : r = 0,95 pour n = 10 parcelles entre lame ruisselée et pertes en terre durant 30 mn) ;
- le ruissellement n'est pas directement lié au taux de couverture du sol mais à la fermeture de la porosité de surface par augmentation des croûtes de battance (par exemple : r = 0,74 pour n = 9 parcelles entre lame ruisselée durant 30 mn et taux de fermeture initial de la porosité de surface) et celles-ci sont d'autant plus abondantes que le sol est faiblement couvert, comme sous vigne désherbée ;
- la turbidité des eaux n'apparaît pas significativement liée aux variables de ruissellement, mais elle diminue avec l'augmentation de la couverture du sol (par exemple : r = - 0,88 pour n = 9 parcelles entre turbidité au temps

t = 60 mn et taux de surface couverte) et avec l'augmentation de la stabilité des agrégats (par exemple : r = - 0,85 pour n = 7 parcelles entre diamètre médian des agrégats et turbidité de l'eau à 30 mn). En outre, la stabilité des agrégats est d'autant plus faible que le taux de carbone organique est faible, tandis que celui-ci diminue avec la diminution de la couverture végétale ;

- *in fine*, l'augmentation des pertes en terre est statistiquement liée à la diminution du taux de couverture du sol (par exemple : r = - 0,84 pour n = 10 parcelles entre pertes en terre à 60 minutes et taux moyen de couverture du sol).

Ces données de ruissellement et d'érosion montrent l'effet positif du sarclo-empierrage car les cailloux posés à la surface du sol peuvent protéger la porosité sous-jacente, tout en brisant l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement. Il en est de même pour la paille ajoutée à la surface du sol. Cependant, il faut souligner que la distinction des effets des techniques culturales reste ici limitée puisque l'effet à plus long terme de la restitution de matière organique au sol par les techniques à base de couverture végétale (paillage et enherbement) n'a pu être pris en compte.

Enfin, plusieurs types d'indicateurs de la sensibilité des sols face aux pertes en terre sont suggérés par l'analyse des modalités et déterminants de la genèse du ruissellement et de l'érosion :

- le mode d'utilisation du sol (vigne désherbée, sarclée, empierrée, jachère, etc.) apparaît comme un bon indicateur synthétique de la sensibilité des sols face au ruissellement et à l'érosion.
- l'état de surface, caractérisé notamment par la couverture végétale et le taux de cailloux à la surface du sol, apparaît comme un indicateur potentiel particulièrement intéressant puisqu'il est possible de déterminer son évolution spatio-temporelle à partir d'images aériennes.
- les propriétés de la partie supérieure du sol et notamment des indices de stabilité structurale ($MA200_{LB}$, MWD_{LB}) apparaissent également intéressantes puisque directement liés à la détachabilité des agrégats et à la turbidité des eaux de ruissellement. Des études antérieures réalisées dans le même type d'environnement ont d'ailleurs montré qu'il existe des relations curvilinéaires avec des effets de seuils entre, d'une part, la teneur en carbone organique, la texture et la teneur en carbonate de calcium et, d'autre part, la stabilité des agrégats (De Noni *et al.* 2002).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude souligne tout d'abord la sensibilité à l'érosion hydrique des vignes désherbées chimiquement et l'intérêt de la protection des cultures de vigne par la couverture, végétale ou non, des sols. Les relations statistiques établies suggèrent l'existence de déterminants et indicateurs de la protection des sols contre l'érosion : en premier lieu, la couverture du sol (végétation, paillage ou empierrage) qui protègerait le sol du ruissellement en limitant la fermeture de la porosité de

surface induite par l'énergie des gouttes de pluie et, en second lieu, la stabilité des agrégats liée à la teneur en carbone organique qui protégerait le sol contre le détachement des particules et le colmatage de la porosité de surface. Ceci milite en faveur du développement de méthodes permettant d'appréhender les variations spatio-temporelles de tels indicateurs.

En pratique, parmi les pratiques culturales testées sous vigne, seules les techniques de paillage et de sarclo-empierrage semblent susceptibles de protéger à la fois rapidement et efficacement le sol contre le ruissellement et l'érosion. Cependant, l'effet protecteur de l'enherbement des inter-rangs de vigne n'est pas à négliger car il devrait pouvoir augmenter très sensiblement dans le temps avec l'augmentation de la teneur en matière organique du sol et l'augmentation concomitante de sa stabilité structurale. Enfin, cette étude montre également la sensibilité au ruissellement du milieu naturel (la garrigue), ce qui laisse présager des risques non négligeables d'érosion encourus en cas de défrichage de ce milieu.

Références bibliographiques

ARSHAD M. A., ASSELINE J., BLAVET D., DE NONI G., LAURENT J.Y. & LEPRUN J. C., 1999. Soil properties as affected by different land use practices in the Languedoc region of southern France. In: J. Bech (ed.), *Sixth intern. meeting on soils with Mediterranean type of climate*, 619-621. Univ. Barcelona.

BLAVET D., DE NONI G., ROOSE E., MAILLO L., LAURENT J.Y., ASSELINE J., 2004. Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche. *Sécheresse*, 15, 1: 111-20.

DE NONI G., BLAVET D., LAURENT J. Y., LE BISSONNAIS Y. & ASSELINE J., 2002. Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution. Paper 1783. Symposium 05. In: 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thaïland, 14-21 August 2002. 11 pp.

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

LE BISSONNAIS Y., MONTIER C., JAMAGNE M., DAROUSSIN J., KING D., 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46 : 207-220.

LÉONARD M., 2003. *L'érosion hydrique des sols cultivés : Analyse systémique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale*. Thèse de doctorat de géographie. Grenoble : université Joseph Fourier, 545 pp. + annexes.

NACHTERGAELE J., POESEN J., VAN WESEMAEL B., 1998. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil & Tillage Research* 46: 51-59.

CARTOGRAPHIE ET ÉVALUATION QUANTITATIVE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS UN ESPACE MONTAGNARD MAROCAIN : CAS DU SOUS-BASSIN VERSANT DE L'OUED TLETA (PRÉ-RIF ORIENTAL)

A. TRIBAK*, A. EL GAROUANI et M. ABAHROUR***

** Laboratoire d'analyse géo-environnementales et d'aménagement (LAGEA), faculté des lettres et sciences humaines, route d'Imouzzer, B.P. 59, Fès, Maroc ; tribakabdellatif@yahoo.fr*

*** Laboratoire de géosciences et environnement, faculté des sciences et techniques de Fès, route d'Imouzzer, B.P. 2202, Fès, Maroc, tél./fax (212) 55 60 82 14 ; el_garouani@yahoo.fr*

Abstract

This study is concerned by the Pré Rif (Northern Morocco),region which is very deeply eroded because of natural factors (marl, steep slopes, intensive rainstorms, complete destruction of natural bush vegÉtation) and human factors (annual crops on all the slopes, human density of 72 men/km², old occupation of these semi-arid lands). Using GIS and USLE model, this study showed that erosion risks are related on land uses, lithology and slopes: it allowed to spacialise erosion risks and to localise areas priority for future SWC managements.

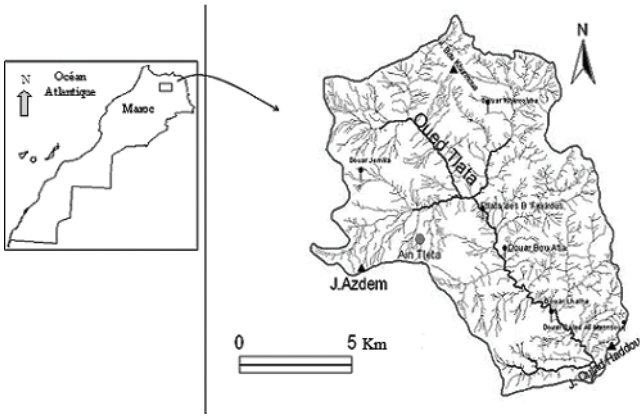
Keywords : *Morocco* ; *Pré Rif* ; *Erosion Survey* ; *SIG* ; *Land Uses* ; *Lithology* ; *Slopes*.

INTRODUCTION

Le sous-bassin de l'oued Tleta est sujet à une dynamique érosive intense, dont les modalités sont très variées. Les pertes en terre y sont énormes et alarmantes. Dans le présent travail, nous faisons appel aux systèmes d'information géographique (SIG) pour la cartographie et l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique, en utilisant l'équation universelle des pertes en sols sous sa version adaptée aux conditions marocaines. L'objectif principal est de spatialiser des modèles ponctuels d'évaluation de l'érosion et de localiser des zones prioritaires pour d'éventuelles interventions d'aménagement.

1. MILIEU

Le bassin versant de l'oued Tlata d'une superficie d'environ 123,15 km^2 est situé dans le Pré-Rif oriental au Nord du Maroc. De forme allongée et de direction nord-ouest/sud-est, il est caractérisé par une topographie accidentée dont les altitudes varient de 550 m au point le plus bas au niveau de l'exutoire à 1 373 m (J. Azdem)



au point le plus élevé. Le contexte géologique montre une nette prédominance des terrains marneux tertiaires dans une structure marquée par les charriages. Le climat local de la région est caractérisé par de forts contrastes saisonniers, avec des pluies brutales et concentrées. Les densités humaines y sont importantes (76 h/km^2) et la plupart des versants sont totalement dénudés et mis en culture.

2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie s'appuie sur le recueil, le traitement et l'analyse spatiale des données concernant les contraintes physiques des terrains, l'occupation du sol et la géomorphologie du bassin versant à travers l'exploitation d'un MNT et de données dérivées, telles que les pentes et les expositions. L'utilisation du logiciel du *SIG ArcView* a permis d'abord la numérisation de toutes couches d'informations requises, puis, par la suite, de prendre en compte chacun de ces facteurs et d'en déterminer leurs interactions. La tâche de la quantification de l'érosion hydrique est effectuée par le modèle *RUSLE*, intégré dans le logiciel *Idrisi* (version Kilimanjaro). Ce modèle nous a permis d'évaluer le taux annuel moyen d'érosion sur l'ensemble du bassin versant, en fonction de la distribution de l'agressivité des pluies, du l'érodibilité du sol, de la topographie, de l'occupation des sols et des pratiques de gestion des cultures.

3. LES FACTEURS DU MODÈLE USLE

3.1. Indice d'érosivité des pluies (R)

À partir des données climatiques disponibles (station Ain Boukellal, période 1977-1994, pour une pluie annuelle moyenne de 390 mm), l'indice R a été calculé en se basant sur la formule d'Arnoldus, qui tient compte des précipitations mensuelles et annuelles en mm. Ainsi l'agressivité des pluies est estimée à 56,3.

3.2. Indice d'érodibilité des sols (K)

Nous avons pu évaluer l'indice K des différents types de sols à l'aide du nomogramme de Wischmeier en utilisant la carte pédologique du bassin, les analyses de sols disponibles et les données d'infiltrabilité des sols obtenues par la méthode de simulation des pluies. Les valeurs du facteur K, situées entre 0,22 et 0,46 montrent une nette fragilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion.

3.3. Facteur topographique (LS)

Les calculs de facteur LS du bassin versant de l'oued Tlata, sont effectués à l'aide du logiciel *Idrisi*, version Kilimanjaro. Il utilise le MNT (Module numérique de terrain) dans les calculs de LS et autres paramètres (pente, orientation, longueur commutative de pente, etc.).

3.4. Facteur du couvert végétal (C)

La carte du facteur C pour le bassin versant de l'oued Tleta a été établie à partir de la carte d'occupation du sol. Cette dernière a été déterminée à partir de l'analyse des photographies aériennes, de l'exploitation d'une image satellitaire spot et des observations de terrain. Les valeurs affectées aux différents modes d'utilisation des sols se situent entre 0,08 et 0,55.

3.5. Pratiques antiérosives du sol (P)

Vu l'état des aménagements antiérosifs dans la région, la valeur 1 est affectée au facteur P.

4. RÈSULTATS ET DISCUSSION

La carte des pertes en sol a été établie en multipliant les différents paramètres (R, K, LS, C et P) qui constituent l'équation universelle de perte en sols de Wischmeier modifiée par Arnoldus. Cette opération est faite à l'aide du logiciel *Idrisi*, version Kilimanjaro. Cette carte montre à la fois l'ampleur des pertes en terre dans le bassin ainsi que leur grande variabilité d'un secteur à l'autre. La perte moyenne pondérée par la surface est de 61,42 t/ha/an, soit un total de 742674,35 t/an pour l'ensemble du bassin. D'après la carte des pertes en sols par type d'occupation, les pertes varient entre 34,65 t/ha/an comme valeur minimale mesurée dans les matorrals et 129,12 t/ha/an comme valeur maximale enregistrée au niveau des parcours. Ces derniers correspondent généralement à des régosols ou à des sols peu évolués d'érosion peu protégés et situés sur de fortes pentes. Les terrains réservés aux cultures annuelles et à l'arboriculture manifestent également une forte susceptibilité à l'érosion, avec des pertes annuelles respectives de 57,61 t/ha et 64,36 t/ha. La carte des pertes en sols atteste d'une grande fragilité des parties est et nord-est du bassin, taillées essentiellement dans les marnes et les marnes gréseuses miocènes où les valeurs supérieures à 35 t/ha/an sont dominantes.

Références bibliographiques

AL KARKOURI J., 2003. *Dégradation du milieu naturel dans le bassin de Beni Boufrah (Rif central-Maroc) : analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et modélisation spatiale*. Thèse doc., Univ. Mohamed V, faculté des lettres, Rabat, 392 pp.

ARNOLDUS H. M., 1977. Prédiction des pertes en terres par érosion en nappe et en griffe. Aménagement des bassins versants. *Cah. FAO : Conservation des sols* : 121-149.

ARNOLDUS H. M., 1980. Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Bull. FAO*, n° 34 : 39-48.

BONN F., 1998. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: Possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, 9, 3 : 185 -192.

DHMAN H., 1994. *Utilisation des SIG et des télédétections dans l'étude de l'érosion hydrique: application au bassin versant de Tléta*, mémoire de 3e cycle, ENFI.

DIALLO A., 2000. *Intégration du modèle USLE dans un SIG pour la cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Boufrah (Rif central),* mémoire de 3e cycle, ENFI, Salé, 90 pp.

KALMAN R., 1967. *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin versant du Sebou. Projet Sebou*, [rapp. Ronéo.], 40 pp.

LEBLANC D., 1979. *Étude géologique du Rif externe oriental au Nord de Taza (Maroc)*. N.M.S.G.M. n°281, Rabat, 159 pp.

TRIBAK A., 2000. *L'érosion hydrique en moyenne montagne du Pré-Rif oriental (Maroc). Étude des agents et des processus d'érosion dans une zone de marnes tertiaires.* Thèse doctorat d'État, Université Chouaib Doukkali. 351 pp.

TRIBAK A., 2002. Contraintes du milieu et fragilité d'un espace montagnard marocain : les montagnes du Pré-Rif oriental. *Annales de Géographie*, 625 : 227-245, Armand Colin, Paris.

COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES HORIZONS PEDOLOGIQUES SUPERFICIELS : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SOUS PLUIES SIMULÉES ET SOUS PLAN D'EAU

Djamel BOUDJEMLINE et Lakhdar BENAMARA

Département d'hydraulique, université des sciences et de la technologie d'Oran, B.P. 1505, El M'naouar, 31000 Oran, Algérie ; boudjemline@univ-usto.dz ; benamara@univ-usto.dz

Abstract

Infiltration measures were lead on young soil, known as red Mediterranean soil. The first series of measures were effected under simulated rain, followed by a second one effected under a plan of water using a monocylinder and a third one effected in laboratory. We have tested the influence of the surface's state of the soil (plain soil, plowed soil) on the capacity of infiltration. About seventy trials were realized and the obtained results were quite satisfactory. The experimentation have permitted to put in evidence the advantages and disadvantages of each approach. But both of them need to cover more territory and pedological situations if we want to integrate the whole of heterogeneities that we may meet in field or watershed.

Keywords : *Algeria* ; *Infiltration* ; *Rainfall Simulation* ; *Monocylinder*.

INTRODUCTION

Le sol est un milieu poreux triphasique constitué d'une phase solide, d'eau et d'air en proportions variables. Il constitue pour l'eau un milieu tampon entre les écoulements souterrains et superficiels. La circulation de l'eau est conditionnée par des considérations liées aux caractéristiques internes du sol (texture, structure et teneur en matière organique) et des caractéristiques externes (état de la surface du sol, régime de l'eau). Ce sont toutes ces considérations qui font que l'eau précipitée peut être drainée en profondeur pour alimenter la nappe profonde ou freinée dans son transit souterrain pour générer du ruissellement et, éventuellement, de l'érosion.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES :

Sous pluie simulée, les essais infiltrométriques ont été effectués à l'aide d'un simulateur de pluie de type Orstom à commande automatisée. Trois états de surface ont été testés, à savoir un sol nu, un sol couvert de végétation et un sol nu labouré sur une dizaine de centimètres. Pour chaque état de surface, cinq essais

ou répétitions ont été effectués. Au total, 20 essais ont été réalisés. Les résultats sont consignés dans le tableau 2.

L'intensité d'infiltration décroît avec le temps pour atteindre une valeur asymptotique proche de la conductivité hydraulique à saturation, où F représente l'intensité d'infiltration (mm/h) et P l'intensité de la pluie (mm/h).

Sous plan d'eau, les essais infiltrométriques ont été effectués à l'aide d'un monocylindre de dimensions connues. La démarche est inspirée de Roose *et al.* (1993). Pour tester l'influence d'un certain nombre de facteurs sur l'infiltrabilité et valider un tant soit peu les résultats, chaque essai a été répété cinq fois et le résultat retenu correspond à la valeur médiane.

Parmi les facteurs testés, on distingue des facteurs internes, inhérents au sol, tels que la nature de la texture et l'état de la surface du sol, et des facteurs externes, dont le climat représenté par les apports en eau. Ainsi, on a testé l'influence de l'augmentation de la charge d'eau (en composant avec trois charges différentes) et l'influence du labour (en retournant la surface du sol sur quelques centimètres).

Au total, 30 essais furent réalisés pendant une campagne de mesures qui a duré un mois. Les mesures observées sont corrigées par rapport à un coefficient dépendant de la forme de la tache mouillée ou front d'humectation (Roose *et al.*, 1993). Des mesures annexes ont été effectuées : il s'agit des densités apparente et réelle, du suivi des profils hydriques, ainsi que l'analyse granulométrique des échantillons.

Au laboratoire, les essais ont été réalisés sur des colonnes de sol remanié et trié. On a pu tester essentiellement l'influence du régime d'alimentation sur la capacité d'infiltration. 15 essais furent réalisés.

2. RÉSULTATS

2.1. Les paramètres hydrodynamiques

À la lecture des résultats apparaissent les points suivants :

- les paramètres hydrodynamiques varient d'un essai à l'autre et d'une variante à l'autre. Ce qui témoigne d'une très forte hétérogénéité du milieu étudié, confirmée par les fortes valeurs du coefficient de variation : 0,52 pour l'intensité d'infiltration minimale et 0,54 pour l'intensité d'infiltration moyenne ;
- l'intensité d'infiltration minimale varie de 19 mm/h à 65 mm/h sur sol nu et de 41 mm/h à 100 mm/h sur sol labouré ;
- l'intensité d'infiltration moyenne varie de 72 mm/h à 257 mm/h sur sol nu et de 250 mm/h à 780 mm/h sur sol labouré ;
- la profondeur du front d'humectation varie de 15 cm à 33 cm sur sol nu et de 14 m à 40 cm sur sol labouré.

- si la profondeur du front d'humectation semble homogène, quel que soit le type d'état de surface, le rôle du labour semble très significatif puisque l'infiltration est à chaque fois major.

2.2. Influence des facteurs internes et externes du sol sur l'infiltrabilité

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tab. 1 : Comparaison de l'infiltrabilité finale moyenne sous pluie simulée et sous plan d'eau.

Etat de surface	Infiltrabilité finale moyenne		
	Pluie simulée	Plan d'eau	
		Terrain	Laboratoire
Sol nu	12	46	66
Sol labouré	23	62	—

L'effet du labour est net puisqu'on passe de 46 mm/h à 62 mm/h sous plan d'eau et de 12 mm/h à 23 mm/h sous pluie simulée. En modifiant l'état structural du sol, en créant des vides supplémentaires donc une macro porosité plus importante, le labour favorise davantage l'infiltration de l'eau.

Tab. 2. Influence de la charge d'eau et de l'intensité de la pluie sur l'infiltrabilité finale

Charge H (cm)	Infiltrabilité finale (mm/h)			Intensité de la pluie (mm/h)
	Plan d'eau sur terrain	Plan d'eau sur colonne de sol en laboratoire	Pluie simulée	
4	46	65	18	30
6	25	83	15	50
8	23	76	16	60
10	—	126	16	70

La charge d'eau, tout comme l'intensité de la pluie, ne semble pas contrôler l'infiltrabilité finale essentiellement lorsqu'il s'agit d'essais *in situ*, que ce soit sous plan d'eau ou sous pluie simulée, comme le montre le tableau 2. L'augmentation de la charge hydraulique n'est pas accompagnée systématiquement d'une augmentation de l'infiltrabilité finale. Ceci peut être imputé à l'hétérogénéité du milieu et à la dégradation de l'état de surface du sol, sous pluie simulée. En laboratoire, sur colonnes de sol remanié et trié, il semble que l'infiltrabilité finale

augmente lorsque la charge d'eau augmente, ce qui est conforme avec la théorie de l'infiltration.

3. DISCUSSION

Les résultats obtenus confirment l'effet favorable du labour sur l'infiltration.

L'augmentation de l'intensité de la pluie (sous pluie simulée) ne s'accompagne pas systématiquement d'une augmentation de l'infiltrabilité finale, tout comme l'augmentation de la charge d'eau (sous plan d'eau) ne semble avoir aucun effet sur l'infiltrabilité finale. Cette dernière semble beaucoup plus dépendante des caractéristiques intrinsèques du sol et, notamment, de sa texture et de sa structure.

Dans tous les cas, les valeurs de l'infiltrabilité, mesurée aussi bien au simulateur que sous plan d'eau, sont du même ordre de grandeur (v. tab. 2). Par contre, les valeurs obtenues en laboratoire sur colonnes de sol remanié sont beaucoup plus élevées et s'expliquent par le fait qu'un sol remanié est beaucoup plus aéré. Cependant, le régime permanent est atteint beaucoup plus rapidement sous plan d'eau que sous pluie simulée, ce qui entraîne une consommation en eau plus importante sous pluie simulée. La durée de l'essai est de ce fait beaucoup plus courte sous plan d'eau.

CONCLUSION

Que ce soit sous pluies simulées ou sous plan d'eau, les résultats de l'infiltrabilité sont du même ordre de grandeur : ceux obtenus en laboratoire sur sol remanié et trié sont plus élevés et s'ajustent de façon excellente sur le modèle de Philip.

Les mesures sous plan d'eau sont beaucoup plus aisées, moins consommatrices en eau, moins coûteuses et nécessitant un personnel plus réduit par rapport à la simulation de pluies. Toutefois, la méthode ne prend pas en compte l'hétérogénéité du milieu puisque l'échelle de l'essai est trop petite (quelques cm² de terrain). La simulation de pluie dont l'échelle de mesure est relativement plus grande (1 m²) ne fait pas mieux, et il faudrait dans les deux cas répéter les mesures sur les différentes situations pédologiques pour pouvoir reconstituer l'infiltration à l'échelle du champ ou celui du bassin versant.

Références bibliographiques

BIELDERS C., VAN CLOOSTERS, 2003 : Hydrodynamique du sol. Doc. inéd., Univ. Louvain.

BOIVIN P., TOUMA J., ZANTE P., 1988. Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneaux. *Cah. ORSTOM. Pédol.*, 24, 1 : 17-25.

KHARROUBI K., HACHEMI N., 2007. *Modélisation de l'infiltration de l'eau dans les sols d'Oran*, mémoire d'ingénieur, USTO.

MAGHARBI S., BOUARICHA L., 1996. *Étude hydrodynamique d'un sol sablo-limoneux d'Oran*, mémoire d'ingénieur, USTO.

MERMOUD A, 2001. *Cours de physique du sol*. Doc. inéd., EPLF. Lausanne.

MUSY A., SOUTTER M., 1991. *Physique du sol*. Doc. inéd., EPLF. Lausanne.

NEMDILI M., RAI S., 2000. *Étude de l'infiltration et essai de modélisation (cas d'un sol sableux d'Oran)*, mémoire d'ingénieur, USTO.

ROOSE E., BLANCANEAUX P., LUIS DE FRETAS P., 1993. Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiel : méthode et exemples. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 413-419.

.

CARACTERISATION DES CONDUCTIVITÉS DE SURFACE DANS UN AMÉNAGEMENT EN BANQUETTES ANTIÉROSIVES PAR LA MÉTHODE DU SIMPLE ANNEAU

Y. AL ALI*, J. TOUMA*, M. B. LOUATI et J. ALBERGEL***

** IRD, UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France*

*** IRD, Al Manzah 5, Tunisie*

Abstract

The surface saturated conductivity is a key parameter in the analysis and hydrologic modelling in general. It is of particular importance in the spacing between contour ridges, since it delimits the contributing areas of runoff and consequent erosion. This study presents a simple, rapid and economic method to measure this parameter. It consists of simple small ring infiltration tests under negligible water head. Its small water consumption makes it particularly suited for arid and semi-arid zones. Moreover, the simplicity of the method allows its application on several points in the inter-ridge space in order to study the spatial variability of this parameter. The analysis of the experimental data takes account of the lateral flow, which can be significant, occuring at the periphery of the ring.

Keywords : *Tunisia* ; *Conductivity* ; *Simple Ring Method* ; *Lateral Flow*.

INTRODUCTION

La conductivité saturée du sol, K_s, est un des paramètres clés dans la modélisation hydrologique (p. ex. Seguis *et al.*, 2002). Dans un espace inter-banquettes, la connaissance de sa distribution spatiale dans la couche superficielle du sol permet d'appréhender les zones contributives du ruissellement et de l'érosion conséquente. Sa mesure par les méthodes classiques est cependant assez longue, laborieuse et coûteuse. Ceci rend l'étude de sa variabilité spatiale assez difficile. On présente ici une méthode simple, rapide et de faible coût pour mesurer la conductivité saturée de la couche superficielle du sol (Roose *et al.*, 1996). Ces avantages permettent de l'utiliser à grande échelle à des fins de modélisation hydrologique du fonctionnement d'un aménagement en banquettes antiérosives.

1. MÉTHODE ET MATÉRIEL

Le site expérimental se trouve dans le petit bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (18,1 km²), dans le gouvernorat de Kairouan, au centre de la Tunisie. Dans la partie aval du bassin, où se trouve le site d'étude, les sols sont alluviaux

profonds sablo-argileux. La parcelle d'étude d'environ 2 900 m² de superficie est une jachère depuis une dizaine d'années. Elle est délimitée en amont et à l'aval par des banquettes antiérosives et suivie depuis 2004 pour quantifier l'érosion. Le climat y est type méditerranéen semi-aride, avec une pluie annuelle moyenne de 390 mm.

La méthode utilisée pour déterminer la conductivité saturée est l'infiltrométrie simple anneau sous faible charge positive, qui consiste à mesurer la lame infiltrée en fonction du temps, I_{3D}, dans un anneau d'environ 15 cm de diamètre, suite à des apports successifs d'un volume d'eau constant. Chaque essai est complété par prélèvements de trois échantillons de sol : un premier au centre de l'anneau immédiatement à la fin de l'essai, un second à proximité de l'anneau, en dehors du bulbe d'humectation, et un troisième de volume connu. Les deux premiers servent à déterminer les humidités pondérales finale et initiale, alors que le troisième permet de déterminer la masse volumique apparente du sol et convertir ainsi les humidités pondérales en humidités volumiques. Ce type d'essai est bien adapté aux milieux semi-arides, vu sa simplicité, sa rapidité et son faible coût. Son analyse doit tenir compte de l'écoulement latéral qui peut être prépondérant en raison du faible diamètre de l'anneau. Elle est faite selon l'approche de Smettem *et al.* (1994), qui ont montré que la différence entre la lame infiltrée dans l'anneau, I_{3D}, et celle d'un écoulement vertical, I_{1D}, est linéaire dans le temps. Le coefficient de linéarité dépend de la sorptivité du sol (paramètre qui caractérise l'aptitude du sol à absorber l'eau par capillarité), de la différence entre ses humidités volumiques finale et initiale et du rayon de l'anneau. Or il existe plusieurs modèles dans la littérature qui relient I_{1D} à la sorptivité du sol et sa conductivité saturée, K_s, ce qui rend possible l'estimation de ce dernier paramètre à partir de ce type d'essai. Une récente étude de Touma *et al.* (2006) qui ont testé sept modèles I_{1D} sur des sols de propriétés connues a montré que le modèle de Brutsaert (1977) donne les meilleurs résultats.

Afin d'étudier la variabilité spatiale de K_s, la parcelle a été quadrillée selon une grille régulière d'environ (5 x 10) m². Une première analyse statistique a permis de préciser sa loi de distribution statistique, laquelle a servi à effectuer une étude géostatistique. Celle-ci a consisté d'abord à calculer un variogramme expérimental sur les distances d'auto-corrélation. L'ajustement d'un modèle théorique sur le variogramme expérimental a permis de dresser la carte de distribution spatiale de ce paramètre dans la parcelle.

2. RÉSULTATS

Le plan d'échantillonnage des essais est représenté par les croix sur la figure 1. Un seul essai a été effectué par point. Pour chaque essai, les valeurs mesurées des humidités initiale et finale ainsi que le rayon connu de l'anneau permettent d'optimiser la sorptivité et la conductivité saturée du modèle I_{1D} en minimisant la somme des carrés des écarts entre les valeurs mesurées et modélisées. La figure 2 présente un exemple type des résultats obtenus. La mesure est représentée par les points alors que la courbe continue représente l'ajustement avec les valeurs optimisées de la sorptivité et de la conductivité saturée. On notera que la durée de l'essai est inférieure à 1 h et que le volume d'eau utilisé est

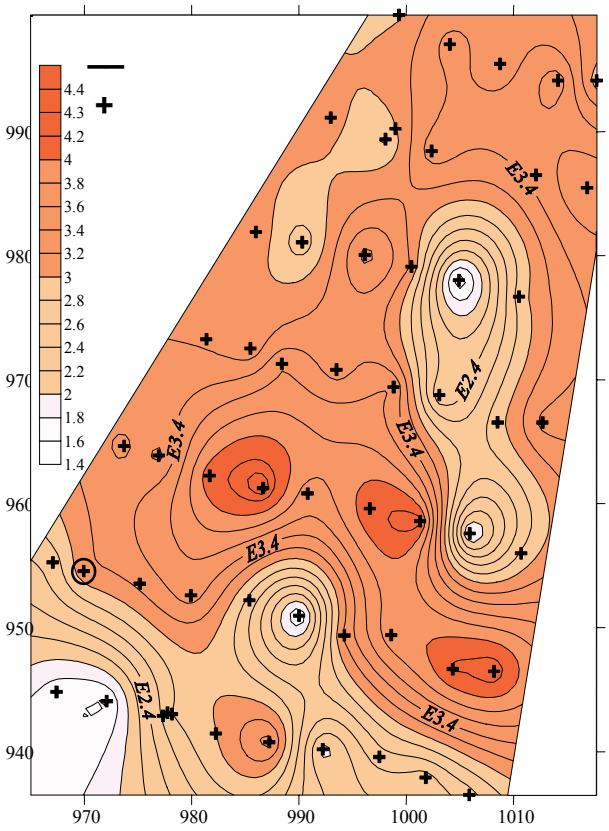


Fig. 1. Plan d'échantillonnage des essais effectués (croix) et valeurs estimées de ln K_s (courbes d'isovaleurs)

inférieur à 1,5 l. Ces résultats correspondent à l'essai entouré d'un trait gras sur la deuxième ligne du bas à gauche de la figure 1. Bien que l'intensité stabilisée de l'infiltration soit d'environ 115 mm/h, la valeur ajustée de K_s pour cet essai est d'environ 25 mm/h, soit un rapport qui avoisine 5:1.

Le tableau 1 et les figures 3a et 3b résument les résultats de l'étude statistique sur K_s et ln(K_s) qui montrent que ce paramètre est distribué selon une loi log-normale, comme cela a souvent été constaté pour ce paramètre (p. ex. White et Sully, 1991). La figure 3c montre le variogramme expérimental (points) et le modèle (sphérique) qui a été ajusté sur ces points (courbe continue). Les nombres à côté des points représentent le nombre de couples pris en compte pour le calcul du variogramme expérimental.

Le modèle ajusté sur le variogramme expérimental a servi à dresser la carte d'isovaleurs de ln(Ks) par krigeage qui sont montrées sur la figure 1.

Tab. 1. Paramètres statistiques de K_s et ln(K_s)

	Médiane	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum	Coef. de variation	Coef. d'asymétrie
Ks (mm/h)	23,23	27,64	357,58	4,21	81,42	0,68	1,18
Ln Ks	3,14	3,07	0,54	1,44	4,4	0,24	- 0,4

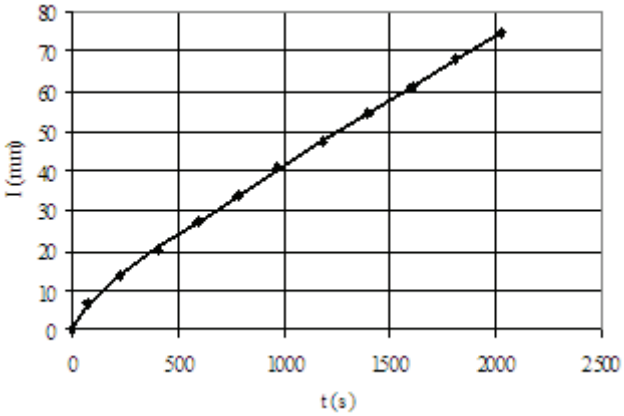


Fig. 2. Lame infiltrée (points) et optimisée (courbe continue). L'essai est le point entouré dans la figure 1.

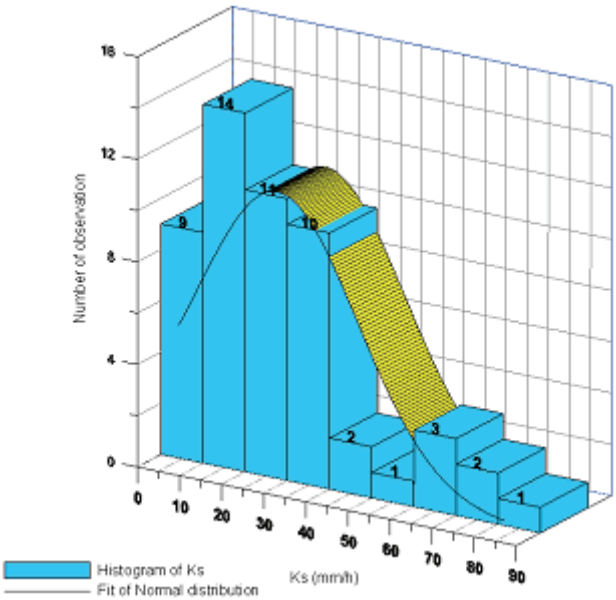


Fig. 3a. Histogramme de distribution statistique de K_s

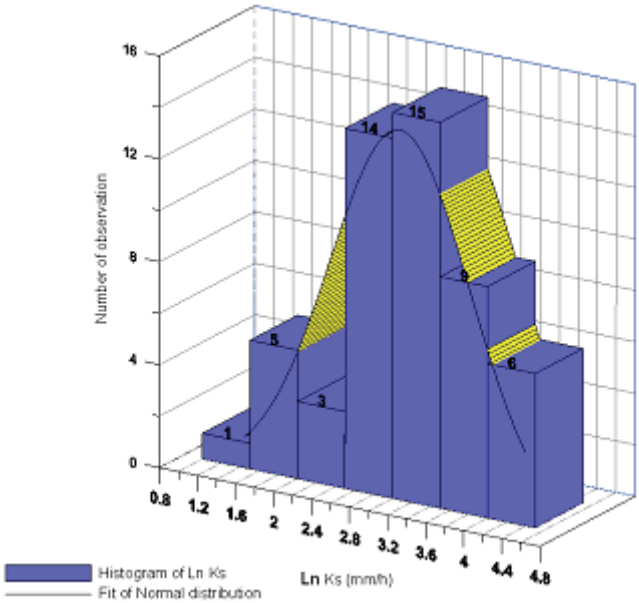


Fig. 3b. Histogramme de distribution statistique de ln (K_s)

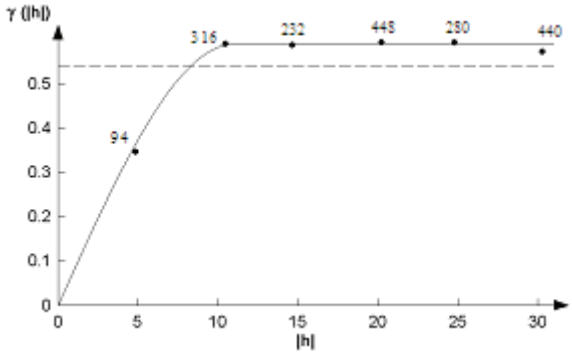


Fig. 3c. Variogramme expérimental (points) et théorique (courbe continue) de ln (K_s)

CONCLUSION

La connaissance de la conductivité saturée de la couche superficielle du sol est nécessaire pour l'analyse et la modélisation du fonctionnement hydrologique d'un espace inter-banquettes. L'infiltrométrie simple anneau sous faible charge positive présentée dans cette communication permet de mesurer ce paramètre ainsi que la sorptivité du sol de façon simple, rapide et économique. Sa faible consommation en eau la rend bien adaptée aux milieux arides et semi-arides. En outre, la simplicité de sa mise en œuvre permet la multiplication des essais sur l'espace inter-banquettes, afin d'en étudier la variabilité spatiale et de mieux définir ainsi les zones contributives du ruissellement et l'érosion conséquente. Par ailleurs, une meilleure connaissance de ce paramètre et de sa variabilité spatiale permettrait d'améliorer les résultats d'un modèle hydrologique de fonctionnement de l'espace inter-banquettes en termes de prédiction et d'examen de scénarios d'aménagement.

Références bibliographiques

BRUTSAERT W., 1977. Vertical infiltration in dry soil. *Water Resources Research*, 13 : 363-368.

ROOSE E., BLANCANNEAUX P., FREITAS P., 1996. Un test simple pour observer l'infiltration et la dynamique de l'eau dans les horizons du sol. Méthode et exemples sur un sol argileux du Brésil et sur un sol sableux du Cameroun. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 413-420.

SEGUIS L., CAPPELAERE B., PEUGEOT C., VIEUX B., 2002. Impact on sahelian runoff of stochastic and elevation-induced spatial distribution of soil parameters. *Hydrological Processes*, 16: 313-323.

SMETTEM K. R. J., PARLANGE J.Y., ROSS J. P., HAVERKAMP R., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. *Water Resources Research*, 30 : 2925-2929.

TOUMA J., VOLTZ M., ALBERGEL J., 2006. Determining soil saturated hydraulic conductivity and sorptivity from single ring infiltration tests. Soumis à publication dans *European Journal of Soil Science.*

WHITE I., SULLY J., 1992. On the variability and use of the hydraulic conductivity alpha parameter in stochastic treatments of unsaturated flow. *Water Resources Research,* 28 : 209-213.

COMPORTEMENT HYDRIQUE D'UN NITISOL CULTIVÉ SOUS SIMULATIONS DE PLUIES EXTRÊMES CAS DES SYSTÈMES INTENSIFS DE PRODUCTION BANANIÈRE EN MARTINIQUE

Bounmanh KHAMSOUK[*], Eric ROOSE[**], Éric BLANCHART[**], Marc DOREL[***], Luc RANGON[****], Joëlle LOURI[**]

[*]*BANALLIANCE, Centre d'affaires le Baobab, rue Léon-Gontran Damas, 97 232 Lamentin (Martinque) ; kamsouk@wanadoo.fr*

[**]*IRD Montpellier, Avenue Agropolis, B.P. 64501, 34 000 Montpellier (France) ; roose@mpl.ird.fr ; blanchart@mpl.ird.fr*

[***]*CIRAD-FLHOR, Neuf châteaux, 97 130 Capesterre-Belle-Eau (Guadeloupe) ; marc.dorel@cirad.fr*

[****]*IRD Martinique – Caraïbes (PRAM), Petit-Morne, 97 232 Lamentin (Martinique) ; luc.rangon@ird.fr*

Abstract

Because of cultural practices, numerous pesticides, steep slopes cropped, strong & long storms, banana plantations in Martinique Islands present a high risk of erosion and pollution of running waters. Recent studies on runoff plots 100m² have shown that if the soil remains covered by cropping residues, erosion is very limited, but what happen when tropical rainstorms of more than 200 to 400 mm can bite the soil surface? This paper concerns 19 cyclonic rainstorms simulated (100mm/h during 3 hours on 1m²) on a Nitosol in order to better understand what happen when the soil is so humid: what are the main factors determining maximal runoff & erosion rate in situ. The processes and parameters were the same than on 100 m² plots with natural rains. Residue mulches absorbed completely the drop energy and erosion risks if the soil surface is well covered, even after 180 mm in 3 hours. But ridges produced very high runoff and erosion after 40 mm. Remarkable results were underlined : i/ the stability of aggregates even on bare spots where the disaggregation was only partial with a special crust formed with these degraded aggregates ; ii/ a decreasing runoff rates when the slope steepness is increasing (10-25-40%) because the runoff energy is increasing keeping open the macropores, iii/ the important influence of topsoil density. This is very important in that island which is devoted to tourism which is consuming a high volume of drinkable water.

Key words : *Martinic Island ; Cyclonic rainstorm ; Residue cover ; Erosion ; Nitosols ; runoff parameters.*

Résumé

Principale production végétale sur 9 000 ha en Martinique, la culture bananière d'exportation *Cavendish* peut présenter un risque de dégradation pour l'environnement (érosion, pollutions aquatiques) en raison de ses pratiques culturales, du relief accidenté des zones de production et de fortes pluies. Récemment, une étude en parcelles expérimentales (200 m²) sur un nitisol volcanique a démontré que les systèmes intensifs bananiers à gestion en surface des résidus de culture protégeaient le sol de l'érosion hydrique à l'opposé de la culture traditionnelle d'ananas billonné, entrant en rotation avec les bananeraies. Devant la nécessité d'approfondir ces premiers résultats, une campagne de simulations 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 donc été réalisée *in situ* avec pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement hydrique du sol et de rechercher les facteurs explicatifs du ruissellement, principal vecteur de l'érosion du sol.

Les résultats des pluies simulées sont bien conformes aux mesures et relations remarquables observées en parcelles d'érosion sous pluies naturelles, notamment à travers les hydrogrammes des différents traitements et les paramètres de ruissellement. Le paillis protège efficacement le sol du ruissellement (et de l'érosion) en infiltrant la totalité de la pluie artificielle déversée, même après 180 mm de pluie en trois heures car celui-ci couvre bien la surface du sol et augmente la rugosité superficielle. À l'inverse, les billons concentrent un ruissellement abondant après 40 minutes d'application. 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)* - une diminution du ruissellement sur les plus fortes pentes (25 % et 40 %), provoquée par le maintien de l'ouverture des macro-pores superficielles due à l'énergie décapante du ruissellement ; *(iii)* – l'influence de la densité apparente (porosité du sol) sur les processus de ruissellement/infiltration. Les résultats des pluies simulées sur 1m² ont donc bien permis de préciser le fonctionnement hydrique du nitisol cultivé et de définir les déterminants les processus du ruissellement (et de l'érosion hydrique). Cette étude pourrait être plus tard étendue sur d'autres types de sols cultivés de l'île afin de déterminer leur fonctionnement hydrique, d'adapter les bonnes pratiques agricoles, voire de définir une cartographie de l'érosion et dégradation environnementale. Elle a toute son importance car les ressources en eau potable de l'île dépendent entièrement de la qualité du réseau hydrographique où l'érosion et les pratiques agricoles peuvent être un risque important de pollution.

Mots clés : Martinique, simulations de pluies cycloniques, culture bananière, systèmes intensifs, nitisol, parcelles d'érosion, paramètres de ruissellement/infiltration.

1. INTRODUCTION

Principale production végétale d'exportation sur 9 000 ha en Martinique, île volcanique des Antilles françaises (14-16° N ; 60-62° W ; 1 080 km²), la culture bananière *Cavendish* peut présenter un risque de dégradation pour

l'environnement en raison de ses pratiques culturales (grande consommation d'intrants, lourdes préparation de sol), du relief accidenté des zones agricoles et de la forte pluviosité 300-5 000 mm/an (tempêtes tropicales). Récemment, une étude en parcelles expérimentales sur un nitisol volcanique a démontré qu'en matière de dégradation du sol, les systèmes intensifs bananiers à gestion de paillis protégeaient le sol de l'érosion hydrique (E = 600 kg/ha/an) à l'opposé de la culture d'ananas billonné (E = 17 t/ha/an), entrant en rotation avec les bananeraies (Khamsouk et Roose, 2003). Devant la nécessité d'approfondir ces premiers résultats, une campagne de simulations de pluies cycloniques a donc été réalisée *in situ* avec pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement hydrique du sol et de rechercher les facteurs explicatifs du ruissellement, principal vecteur de l'érosion du sol (Lafforgue, 1977 ; Roose et Asseline, 1978 ; Collinet et Valentin, 1979). Le présent article va traiter des résultats obtenus par cette campagne de simulations de pluies cycloniques.

2. SITE, MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le site d'étude est la station expérimentale Rivière Lézarde (110 ha), situé en région centrale de l'île avec une pluviosité de 2 000 mm/an –2 500 mm/an et caractérisé par un nitisol volcanique cultivé en systèmes bananiers. Six parcelles d'érosion (100 m²-200 m²) sur différentes pentes 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* (100 m² ; sol dénudé, travaillé sur 20 cm) : traitement standard ou témoin sur trois pentes 11 %-25 %-40 %, 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* (200 m² ; 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 *Ba11* (200 m² ; 36 pieds) : traitement situé sur une pente à 11 %, préconisée pour lutter contre l'érosion ;
- l'*ananas mécanisé et billonné An7* (200 m² ; 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 et billonnage en descendant la pente.*

Sur ces traitements, 19 simulations de pluies cycloniques (intensité : 100 $mm.h^{-1}$) ont été appliquées sur des micro-parcelles (1m²) durant trois heures. 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 ; Collinet et Valentin, 1979) : la *pluie d'imbibition Pi* (mm) ou hauteur d'eau de pluie minimale et 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 de ruissellement Kr60' et Kr180'* (%) ou rapport des hauteurs d'eau

ruissellement/pluie après 60 et 180 minutes ; le *palier de ruissellement Rx* (mm.h^{-1}) ou intensité maximale et constante d'écoulement d'eau durant le régime permanent du ruissellement.

Tableau 1. Caractéristiques mesurées des six parcelles d'érosion installées sur le nitisol volcanique.

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	Cram (%)	7,1	5,2	4,3	2,8	0,5	11,4
	Crmax (%)	45	32	28	27	6	51
Erosion	E (t/ha/an)	85,8	127,5	147,4	0,5	0,1	17,2

À chaque simulation, les conditions initiales et finales 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 Hpi* (%) et *finale Hpf* (%) par prélèvement du sol sur 10 cm ; *la rugosité de surface Rg* par la méthode de la chaînette (rapport de longueurs chaîne/mètre linéaire) ; la *densité apparente* du sol *Dapp* (g.cm^{-3}) avec les cylindres (1 000 cm³); *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 lisses et fermées *SF* (%) ou croûte.

Afin de déterminer des relations remarquables et 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.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Conditions initiales et finales des micro-parcelles

Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 2 : au départ, le sol est sec et peu dense. Les états de surface reflètent bien les caractéristiques des traitements testés : un fort taux de surface couverte sur les essais cannier et bananier paillés et un fort taux de surface ouverte sur les sols nus. Après l'arrêt des pluies cycloniques, la saturation du sol n'est jamais atteinte (Hpf < 58 %) : la forte capacité d'infiltration du nitisol 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 sols nus, la réorganisation superficielle du sol après les pluies artificielles diffère du comportement battant des sols sableux et limoneux : pas d'encroûtement lisse en surface et présence d'agrégats émoussés reposant sur une croûte interne et continue formée par le dépôt des particules fines désagrégées.

Tableau 2. Conditions initiales et finales des 19 micro-parcelles (1 m²) testées sous pluies artificielles.

Traitement	Parcelle	Moyenne *écart-type*	Paramètres d'états du sol					Etat de surfaces sur 1 m²		
			Pente (%)	Hpi (%)	Hpf (%)	Dapp (g/cm3)	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 nu	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

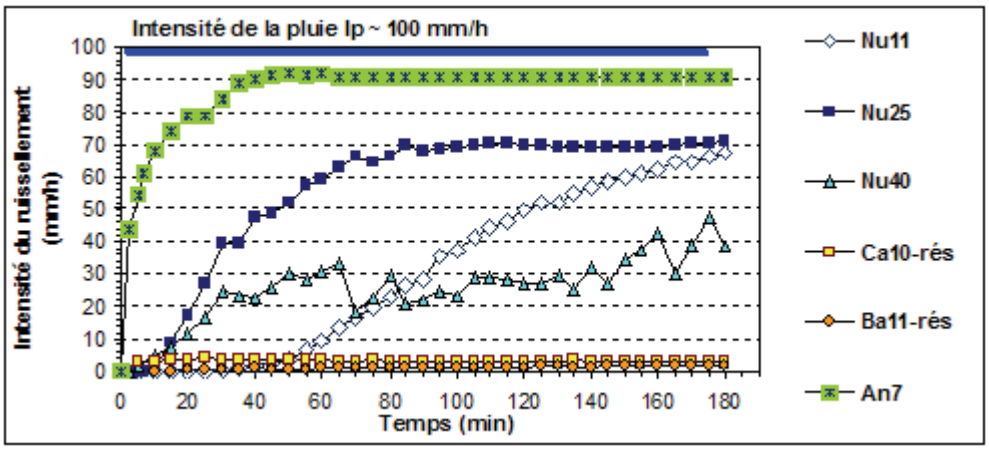


Figure 1. Hydrogrammes moyens du ruissellement issus des traitements testés sous pluies simulées.

Tableau 3. Paramètres hydrodynamiques des 19 simulations de pluies appliquées sur les 6 traitements.

Traitement	Parcelle	Moyenne *écart-types*	Pluie Ip (mm/h)	Ruissellement Pi (mm)	LR60' (mm)	LR180' (mm)	Kr60' (%)	Kr180' (%)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)
Sol nu	Nu11	Moy	100,22	66,67	7,76	161,12	7,76	53,71	74,34	25,66
		écart-types	*0,38*	*16,67*	*8,41*	*42,27*	*8,41*	*14,09*	*9,57*	*9,57*
	Nu25	Moy	100,74	18,48	58,95	212,40	58,50	70,24	69,48	31,25
		écart-types	*1,59*	*6,10*	*2,99*	*14,44*	*2,86*	*4,18*	*7,99*	*6,98*
	Nu40	Moy	99,07	14,29	30,78	173,61	30,87	58,50	48,28	50,78
		écart-types	*2,19*	*2,34*	*14,10*	*32,20*	*13,66*	*9,12*	*10,36*	*8,31*
Bananeraie établie Interligne paillée	Ba11-rés	Moy	101,21	100,00	1,00	4,50	0,97	1,47	0,00	100,00
		écart-types	*ND*	*ND*	*ND*	*ND*	*ND*	*ND*	*ND*	*ND*
Canne à sucre paillée	Ca10-rés	Moy	100,06	100,00	3,45	0,00	3,38	2,78	0,00	100,00
		écart-types	*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
		écart-types	*2,47*	*2,30*	*9,08*	*28,22*	*7,42*	*7,60*	*9,42*	*7,56*

3.2. Hydrogrammes et paramètres hydrodynamiques des pluies simulées

D'après la figure 1, les hydrogrammes de ruissellement reflètent le comportement spécifique des traitements, avec la distinction entre parcelle très infiltrant (systèmes paillés) et celles très ruisselant. Ces comportements sous pluies cycloniques simulées sont bien conformes aux résultats de ruissellement observés en parcelles d'érosion.

Au niveau des paramètres hydrodynamiques, les résultats sont également conformes aux mesures réalisées sur les parcelles d'érosion (tableau 3) : *(i)* - pas de ruissellement observé sous traitements paillés, très couvert et très rugueux, et une infiltration totale comme dans d'autres études références (Mannering *et al*., 1966 ; Roose, 1977 ; Helming *et al.*, 1998) ; *(ii)* - effet des sillons concentrant et évacuant le ruissellement, vecteur de la forte érosion et bien souligné dans des études expérimentales sur andosols et ferrisols (Roose et Asseline, 1978 ; El-Swaify *et al*., 1982 ; Winschester Chromec *et al*., 1989) ; *(iii)* - 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 ; Poesen, 1986 ; Valentin, 1989 ; Roose *et al*., 1993 ; Sabir *et al*., 2004). Parmi les paramètres de ruissellement, deux principaux (Pi et LR60') sont très représentatifs du comportement hydrique des parcelles testées tandis que d'autres travaux analogues font référence au ruissellement maximal Rx, souvent obtenus après 60 minutes de pluies (Roose et Asseline, 1978 ; Collinet et Valentin, 1979 ; Le Bissonnais *et al*., 1989).

3.3. Relations remarquables

Les corrélations significatives établis entre conditions initiales et paramètres hydrodynamiques soulignent bien le rôle antagoniste du paillage dans l'installation du ruissellement (r^2=-0,538 pour SC et LR60' ; r^2=-0,695 pour Rg et LR60'). Par

ailleurs, la porosité du sol (exprimée à travers la densité apparente) et le ruissellement sont étroitement et négativement liés, d'après les coefficients de corrélation (r^2=0,893 pour Dapp et LR60' ; r^2=-0,641 pour Dapp et Pi). La corrélation significative entre ruissellements mesurés en parcelles d'érosion (pluies naturelles) et en micro-parcelles (pluies cycloniques artificielles) confirme bien la similitude du fonctionnement hydrique du nitisol cultivé sur les deux surfaces d'investigation 200 m² et 1 m² (r^2=0,794 pour Cram et Rx).

4. CONCLUSION

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 nitisol cultivé et de déterminer les facteurs explicatifs intervenant dans l'installation du ruissellement, principal vecteur de l'érosion hydrique. Dans les productions végétales intensives, limiter le ruissellement par une amélioration de la macro-porosité du sol ou par le paillage bien couvrant et rugueux reste donc une bonne pratique agricole de lutte anti-érosive. Cette étude pourrait être étendue sur d'autres types de sols cultivés de l'île afin de déterminer leur fonctionnement hydrique, d'adapter les bonnes pratiques agricoles au contexte spécifique, voir de définir une cartographie des zones sensibles à l'érosion et à une dégradation environnementale. Cette approche est primordiale en Martinique car sur cette petite île volcanique, car les ressources en eau potable dépendent entièrement de la qualité du réseau hydrographique où l'érosion et les pratiques agricoles peuvent être une menace importante de pollution.

Références bibliographiques

ASSELINE J., VALENTIN C., 1978 – Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion., *Cahiers ORSTOM Hydrol.*, 15, 4 : 321-347.

CASENAVE C., VALENTIN C., 1989 – Les états de surfaces de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration., ORSTOM, Paris, 229 pp.

EL-SWAIFY S. A., DANGLER E. W, ARMSTRONG C. L., 1982 – Soil erosion by water in the tropics., HITAHR, Research extension series n°24, Hawaii, 173 pp.

HELMING K., RÖMKENS M. J. M., 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.

KHAMSOUK B., ROOSE E., 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 E., 2003 – Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique, *Cahier Agricultures* n°12 : 145-151.

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. *Cahiers ORSTOM Hydrologie*, 14, 4 : 299-344.

LE BISSONNAIS Y., BRUAND A., JAMAGNE M., 1989 – Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apports à la notion d'érodibilité des sols., *Cahiers ORSTOM Pédologie*, 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 Sciences, 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* Assessment of soil surface sealing and crusting, Ed. F. Callebaut, D. Gabriels and M. De Boodt, Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, Belgium, 354-362.

ROOSE E., 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, *Cahiers ORSTOM Pédologie,* 16, 1 : 43-72.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993 – Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et infiltration de la production agricole pour la GCES. Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cahiers ORSTOM Pédologie* 28, 2 : 289-308.

SABIR M., BARTHÈS B., ROOSE E., 2004. Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéenne du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse* 15, 1 : 105-110.

VALENTIN C., 1989 – Surface crusting, runoff and erosion on steeplands and coarse material., in The establishment of soil management experiments on sloping lands, IBSRAM Technologic Notes n°3, Bangkok, 285-312.

WINSCHESTER CHROMEC F., EL-SWAIFY S. A., LO A. K. F., 1989 – Erosion Problems and Research in Hawaii., Topic in applied resource management n°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* n°282, 58 pages.

ÉTATS DE SURFACE ET INFILTRABILITÉ DES SOLS EN MILIEU MÉDITERRANÉEN CULTIVÉ

Patrick ANDRIEUX
UMR LISAH ENSA.M-INRA-IRD, 2 place P. Viala, 34060 Montpellier CEDEX 1, France
patrick.andrieux@supagro.inra.fr

Abstract

Studies conducted in semiarid and arid areas indicated that the runoff generation mechanisms in these areas correspond mainly to infiltration-excess overland flow, which is caused by large rainfall intensities but also by unfavourable soil surface characteristics. The purpose of this paper is to present relevant field criteria for classifying soil surface characteristics according to their infiltration properties. The description of soil surface characteristics was based on criteria that can be observed at the field scale. For each observed soil surface characteristic, steady state infiltration rate was measured using a rainfall simulator on a m² scale. Analysis of variance was used to seek which field criteria enable to explain the most of the spatial variation of the infiltration rates. The results showed that more than 55% of the total variance of observed infiltration rates can be explained by a few criteria, which lead to propose a classification approach of soil surface features in Mediterranean conditions.

Keywords : *Infiltration* ; *Runoff* ; *Rainfall Simulator* ; *Soil Surface Characteristics* ; *Classification*.

PROBLÉMATIQUE

De nombreux travaux ont montré l'influence des états de surface (EdS) du sol sur l'infiltration, le ruissellement et l'érosion. Dans les zones climatiques semi-arides ou tropicales, la majorité des études ont porté essentiellement sur les milieux naturels (p. ex. Descroix *et al.*, 2001), sur des milieux combinant des zones naturelles et cultivées (p. ex. Casenave et Valentin, 1992), ou plus rarement sur des sols cultivés (p. ex. Gicheru *et al.*, 2004 ; Roth, 2004). À ce jour, les travaux conduits en milieu cultivé méditerranéen sont beaucoup plus rares (p. ex. Léonard et Andrieux, 1998 ; Robinson et Phillips, 2001). En milieu cultivé, les pratiques culturales vont générer différents types d'EdS. Principalement sous l'effet combiné des pluies et de la succession des opérations culturales, ces EdS vont évoluer dans l'espace et au cours du temps. Depuis quelques années, des tentatives de prise en compte des EdS dans des modèles hydrologiques et d'érosion ont commencé à se développer (p. ex. Cerdan *et al.*, 2002 ; Moussa *et al.*, 2002). Différentes méthodes permettant de classer les EdS sont utilisées. Elles reposent sur une classification *a posteriori* des EdS (Malet *et al.*, 2003) ou sur une classification *a priori* et indirecte,

basée sur la combinaison de paramètres observés sur le terrain (Le Bissonnais *et al.*, 2005). L'objet de ce travail est de proposer une méthode de classification des EdS *a priori* et directe, une typologie fonctionnelle des états de surface, permettant de décrire les états de surface et de prédire l'infiltrabilité des sols cultivés en milieu méditerranéen.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce travail repose sur 75 sites de description des états de surface et de mesure de l'infiltrabilité par simulation de pluie. Les descriptions et les mesures ont été réalisées sur des parcelles de vigne localisées dans le département de l'Hérault (Sud de la France), sur les sites expérimentaux de Roujan (43° 30' N et 3° 19' E) et de Puisserguier (43° 22' N et 3° 3' E). Le climat de la région est de type méditerranéen sub-humide avec une longue saison sèche (pluviométrie moyenne annuelle d'environ 650 à 670 mm). Les sols sont, suivant la classification WRB-FAO (1988), de type gleyic cambisol, calcisol, calcaric cambisol, chromic luvisol et calcaric leptosol. Les teneurs en argile sont comprises entre 13 % et 35 %. La teneur moyenne en matière organique de surface (0 cm-5 cm) est toujours inférieure à 2 %. Toutes les parcelles étudiées sont cultivées en vigne. Les principales pratiques culturales observées sur l'ensemble des parcelles sont le désherbage chimique, l'enherbement naturel maîtrisé par un travail du sol superficiel mécanique (sur 10 cm à 12 cm) et l'enherbement semé.

Ces différentes pratiques d'entretien des sols mais aussi les spécificités des différents sols font que la surface des parcelles de vigne peut être à un moment donné caractérisée par du sol nu ou par une couverture plus ou moins importante de cailloux, d'herbe, de litière (mélange de sarments et/ou débris végétaux). Les pratiques de désherbage avec un travail du sol ont tendance à homogénéiser la couverture du sol surtout juste après un travail du sol. Les EdS des parcelles désherbées chimiquement sont souvent hétérogènes, surtout lorsque leur topographie est marquée. En ce qui nous concerne, tous les sites de 1 m² choisis pour réaliser nos observations et mesures d'infiltration du sol sont homogènes et représentatifs de l'état de surface que nous avons cherché à caractériser. Les EdS sont définis à partir de quatre ensembles de descripteurs des EdS : les variables de couverture (éléments grossiers, végétation herbacée et litière), les caractéristiques porales de la surface du sol (niveau de fermeture/ouverture du sol et type de croûtes de surface), la rugosité (aléatoire) et des caractéristiques morphologiques et de la structure des douze premiers centimètres de sol (type de sol, texture et pente). Pour chaque variable, des classes prédéfinies permettent de caractériser chaque type d'EdS.

Les mesures d'infiltrabilité sont réalisées sur des placettes avec un simulateur de pluie (Asseline et Valentin, 1978). La pluie est appliquée sur une surface d'environ 10 m² et la mesure est effectuée au centre de cette zone et à l'intérieur d'un cadre métallique enfoncé dans le sol d'une superficie de 1 m². L'intensité de pluie appliquée, 35 mm/h pendant une heure, est représentative des pluies moyennes observées dans la région d'étude. L'infiltrabilité calculée correspond à la différence entre la pluie appliquée et la valeur de ruissellement mesurée en régime permanent. Une analyse de variance mono factorielle ANOVA a été appliquée sur

le jeu de données obtenu à partir de 75 sites de mesure et d'observation afin de mettre en évidence les variables expliquant le mieux la variance de l'infiltrabilité.

2. RÉSULTATS

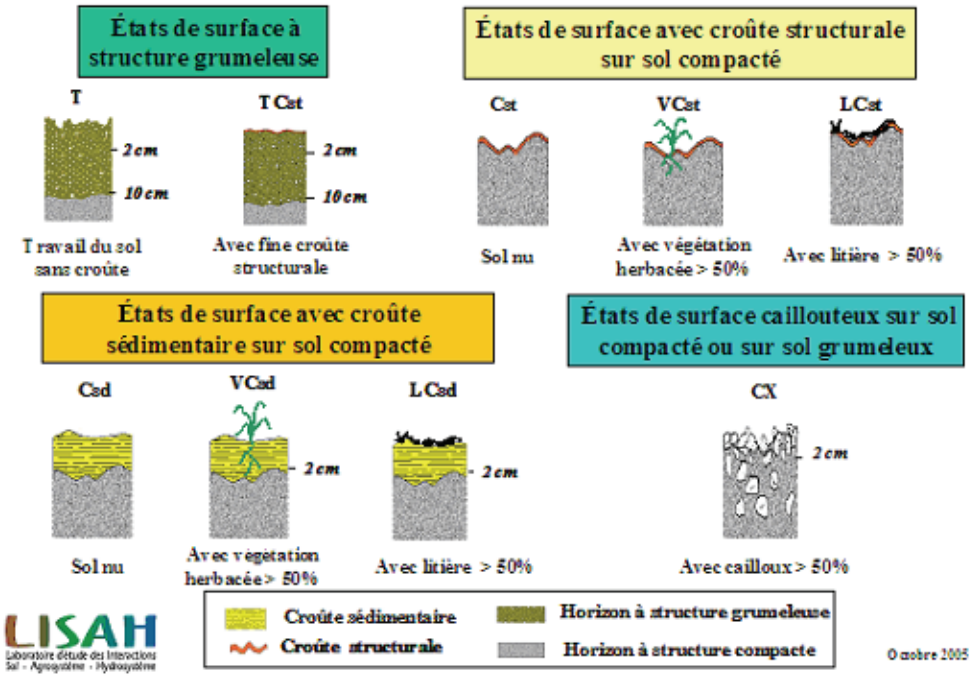
Les observations conduites sur l'ensemble des sites nous ont amenés à proposer une classification reposant sur 9 types d'EdS différents. Cette typologie est illustrée par la figure (v. page suivante). Deux EdS permettent de caractériser les sols travaillés, *T* lorsque le sol vient d'être travaillé avec une surface du sol ouverte et sans croûte apparente et *TCst* lorsqu'une croûte structurale plus ou moins fine s'est développée après une ou plusieurs pluies. Lorsque la surface du sol est nue et qu'aucun travail du sol récent n'est observé, on distingue deux EdS : *Cst* lorsqu'une croûte structurale plus ou moins épaisse est observée et *Csd* lorsqu'il s'agit d'une croûte sédimentaire. Pour les sols avec un recouvrement de végétation herbacée supérieur à 50 %, lorsque les zones de sol nu associées sont recouvertes d'une croûte structurale, l'EdS correspondant est dénommé *VCst* et lorsque les zones de sol nu associées sont recouvertes par une croûte sédimentaire l'EdS est appelé *VCsd*. De la même façon, pour les sols recouverts par plus de 50 % de litière, deux EdS sont identifiés *LCst* lorsque la croûte associée est de type structurale et *LCsd* lorsqu'elle est de type sédimentaire. Enfin, un dernier EdS, *Cx* caractérise les sols avec un recouvrement supérieur à 50 % en éléments grossiers.

Les résultats des analyses de variance avec les infiltrations mesurées en régime permanent montrent que trois groupes de variables explicatives peuvent être distingués, suivant leur pouvoir explicatif et le niveau de significativité. Un premier groupe avec la rugosité, la pente, la couverture herbacée et la litière, ne permet d'expliquer qu'une faible part de la variance totale. Un second groupe constitué notamment par la teneur en argile et la charge en éléments grossiers permet d'expliquer environ 10 % de la variance totale. Les EdS expliquent entre 55 % et 70 % de la variance totale suivant les types d'EdS pris en compte.

3. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Nous avons montré dans cette étude qu'il était possible de proposer une classification des EdS, construite partir de variables de terrain simples à observer, permettant de décrire la variabilité des EdS des sols cultivés en milieu viticole méditerranéen. Les types d'EdS identifiés sont étroitement reliés aux pratiques d'entretien des sols et sont fortement influencés par les caractéristiques des évènements pluvieux. Cette typologie permet de réaliser une cartographie des EdS à l'échelle d'un bassin versant cultivé et de déterminer des zones ayant une infiltrabilité homogène.

Typologie des états de surface



La classification des EdS est en cours de test sur plusieurs bassins versants de la dorsale tunisienne et doit permettre à terme de proposer une classification des EdS adaptée aux sols cultivés méditerranéens.

Références bibliographiques

ASSELINE J., VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, série Pédologie*, 1, 4 : 321-349.

CASENAVE A., VALENTIN C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.*, 130: 231-249.

CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., COUTURIER A., SABY N., 2002. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*, 16: 3215-3226.

DESCROIX L., VIRAMONTES D., VAUCLIN M., GONZALEZ BARRIOS J.L., ESTEVES M., 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 43: 115-135.

GICHERU P., GACHENE C., MBUVI J., MARE E., 2004. Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil & Tillage Research*, 75: 173-184.

LE BISSONNAIS Y., CERDAN O., LECOMTE V., BENKHADRA H., SOUCHERE V., MARTIN P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62: 111-124.

LÉONARD J., ANDRIEUX P., 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32: 209-223.

MALET J.-P., AUZET A.-V., MAQUAIRE O., AMBROISE B., DESCROIX L., ESTEVES M., VANDERVAERE J.P., TRUCHET E., 2003. Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: appplication to the Super-Sauze earthflow (Southern Alps, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 547-564.

MOUSSA R., VOLTZ M., ANDRIEUX P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16: 393-412.

ROBINSON D. A., PHILLIPS C.P., 2001. Crust development in relation to vegetation and agricultural practice on erosion susceptible, dispersive clay soils from central and southern Italy. *Soil & Tillage Research*, 60: 1-9.

ROTH C. H., 2004. A framework relating soil surface condition to infiltration and sediment and nutrient mobilization in grazed rangelands of northeastern Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1093-1104.

PRÉDÉTERMINATION DES APPORTS LIQUIDES ET SOLIDES DANS LES LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE

J.-M. LAMACHERE*, M. BOUFAROUA, L. GUERMAZI*** et H. HABAIEB*****

** Mission IRD, B.P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunis ; jean-marie.lamachere@ird.fr*
*** Ministère de l'Agriculture, DG ACTA, D CES, 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis ; mboufaroua@yahoo.fr, aly_deba@yahoo.fr*
**** Institut national agronomique de Tunisie, INAT ; Hbaieb.hamadi@inat.agrinet.tn*

Abstract

In the Central Tunisia area, since 1994, a hydrological pilot network was created with 24 little artificial lakes. These lakes have been equipped with electronics recorders to measure the water stages of the lakes and the rainfall intensities. Observers have been recruited to measure daily water stages of the lakes, daily depths of rainfall and evaporation and to note the releases. With bathymetrical and topographical measures, it was possible to draw up the filling curves, which have changed with the silting up in the pools from one year to another.

On a yearly scale, water supplies in the little artificial lakes, represented by the runoff depth (Lr stated by mm) can be calculated from the rainfall depth (P stated by mm) with a linear relation in that form: Lr = A (P-P0), where A is the coefficient of runoff growth in ratio to rainfall depth and P0 a position parameter which sets the annual water retention of the soils and of the antierosive improvements of the basin.

With the physical (topography, lithology) and anthropogenic (cultivated areas, anti-erosive improvements) analysis of the catchments, it is possible to show that the catchments from which the runoff coefficients are the greatest (A > 0.30) correspond to catchments with steep or average slopes, on marls and clays, extremely cultivated but no equipped with antierosive laying out. The catchments from which the runoff coefficients are lowest (A < 0.05) correspond to catchments with average and low slopes, partly on hard rocks (limestone or sandstone) with reforestation. The value of the position parameter (P0) depends both on the area covered by the contour ridges constructions and on the type of clays forming the soils of the catchments. The shrinking soils contribute strongly to the growth of the position parameter up to 300 and 350 mm.

The analysis of the relations between the sediments volumes settled in the pools and the runoff volumes from the catchments, corresponding to these sediments volumes, has pointed out the existence of five groups of catchments with average wash loads varying from 6 g/l to 110 g/l (with an average sediments density taken

equal to 1.3). The average slope of the catchments and the location of the crumbly rocks on the steep or average slopes are the two deciding criteria to determine the wash load of the runoff volumes.

Keywords : *Water and Sediments Supplies* ; *Little Artificial Lakes* ; *Tunisian Mountains Range*.

INTRODUCTION

Un lac collinaire est une retenue artificielle d'un volume variant de quelques dizaines de milliers à un million de mètres cubes, pour des bassins versants d'une superficie allant de quelques centaines à deux milliers d'hectares (Boufaroua *et al.*, 2000). Il est créé par la construction d'un petit barrage en terre d'une dizaine de mètres de hauteur, dont la longueur varie de 100 m à 300 m.

Afin de dimensionner ces ouvrages, en tenant compte à la fois du ruissellement et de l'érosion des sols, nous présentons dans cet article une méthode permettant d'évaluer les apports liquides et solides des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon à partir des informations collectées par la DG ACTA et l'IRD (D CES-ORSTOM 1994-1999 ; DG ACTA-IRD 2000-2003) sur le réseau pilote des lacs collinaires de ces deux régions et d'une connaissance sommaire des caractéristiques physiques et anthropiques des bassins versants, basée sur l'utilisation de documents cartographiques (topographie et géologie), photographiques (occupation des sols et aménagements antiérosifs en banquettes ou forêts).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Détermination des apports liquides

En période de crue, le bilan hydrologique d'un lac collinaire prend la forme suivante :

$$\Delta V = (Vr + Vp) - (Vd + Vvid)$$

Cette simplification du bilan hydrologique d'un lac collinaire suppose qu'en période de crue l'infiltration, les apports souterrains, l'évaporation et les usages de l'eau sont négligeables devant les autres termes du bilan. Pour un lac collinaire situé à l'exutoire d'un petit bassin-versant, cette hypothèse se vérifie parfaitement.

2.2. Détermination des apports solides

Les mesures bathymétriques et topographiques d'un lac collinaire permettent d'établir périodiquement les variations de la surface du plan d'eau et du volume d'eau stocké en fonction de la hauteur d'eau (cote aux échelles limnimétriques). Elles permettent également de déterminer le volume de vase stocké dans la retenue depuis sa construction.

Au cours de l'année 1998-1999, le tonnage apporté par l'oued El Gameh au barrage de Kamech a été estimé à 10 000 tonnes, alors que le tonnage exporté par le déversoir et la vanne de fond à 10 tonnes. On peut donc considérer, par

analogie aux observations effectuées sur le barrage de Kamech, que, lorsque le barrage n'est pas trop envasé, le tonnage exporté par déversement ou vidange peut être négligé devant le tonnage sédimenté dans la retenue.

2.3. Relations entre les lames ruisselées et les pluies annuelles

Pour mettre en relation les lames ruisselées entrant dans les lacs collinaires et les pluies annuelles tombées sur les bassins versants, nous avons supposé que cette relation était linéaire, de la forme : $Lr = A\,(P - P0)$, où Lr est la lame d'eau ruisselée annuellement sur le bassin versant, A est un coefficient de croissance de la lame ruisselée en fonction de la pluie, P est la pluie annuelle tombée sur le bassin versant et P0 un paramètre de position. Dans cette relation, A exprime l'aptitude annuelle moyenne des sols au ruissellement et P0 l'aptitude du bassin versant à la rétention.

2.4. Relations entre les volumes sédimentés et les volumes ruisselés

Sur un ensemble comprenant 25 lacs collinaires, nous avons pu déterminer 20 relations directes entre volumes sédimentés et volumes ruisselés. Ces relations sont du type : $Vséd = B \cdot Vr$, où *Vséd* est le volume des sédiments déposés dans la retenue sur un intervalle de temps variant généralement de deux à trois ans et, parfois, de quelques mois, *Vr* le volume ruisselé sur le même intervalle de temps, *B* étant un coefficient sans dimension qui représente la teneur moyenne en sédiments des eaux ruisselées et qui, multiplié par 1 300 (en supposant que la densité des vases est de l'ordre de 1,3), s'exprime en grammes par litre.

2.5. Caractéristiques biophysiques et anthropiques des bassins versants

La caractérisation topographique des bassins versants a été réalisée en utilisant les cartes au 1/50 000, disponibles sur la plupart des sites. Nous avons utilisé comme critère principal l'indice global de pente, exprimé en $m.km^{-1}$, égal au rapport de la dénivelée entre les altitudes qui laissent 5 % au-dessus et au-dessous d'elles et la longueur du rectangle équivalent, rectangle de même superficie et de même périmètre que le bassin versant.

La caractérisation géologique des bassins versants a été faite en utilisant les cartes géologiques de Tunisie au 1/50 000 ou au 1/200 000. Sur chaque carte géologique, ont été relevées les superficies occupées par chaque formation, en leur attribuant une dominante dure lorsque la formation était calcaire ou gréseuse et une dominante tendre lorsque la formation était sableuse, marneuse, marno-calcaire ou argileuse.

Nous avons déterminé, sur chaque bassin-versant, les pourcentages de la superficie du bassin versant recouverte par les cultures, les parcours, les aménagements en banquettes et les forêts. Parmi les ouvrages hydrauliques de CES, les aménagements les plus répandus dans la Dorsale tunisienne sont les banquettes à rétention totale ou partielle. Ces ouvrages sont nettement visibles sur les photographies aériennes et jouent un rôle important sur les volumes ruisselés et, par conséquent, sur les transports solides à l'échelle des petits bassins versants. Les reboisements sont, eux aussi, bien identifiés sur les photographies

aériennes et jouent un rôle important, réduisant considérablement le ruissellement et l'érosion.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des caractéristiques physiques et anthropiques des bassins versants permet de classer les bassins versants (Ksibi, 2002) en :

- 4 classes de relief dans l'ordre décroisant de leur pente moyenne (P1, P2, P3, P4) ;
- 4 classes lithologiques dans l'ordre croissant d'importance des argiles et des marnes sur le bassin versant (L1, L2, L3, L4) ;
- 4 classes de mise en culture dans l'ordre croissant d'importance des cultures sur le bassin-versant (C1, C2, C3, C4) ;
- 4 classes d'aménagement antiérosif (banquettes et forêts) dans l'ordre croissant d'importance des aménagements (A1, A2, A3, A4).

Le croisement de ces classifications avec celle du paramètre de rétention (P0) du bassin versant montre que :

- 100 mm < P0 < 150 mm correspond à des bassins versants sans banquettes ni réservoirs amont, où les roches dures couvrent une partie notable du bassin versant (plus de 20 % de la superficie) ;
- 150 mm < P0 < 200 mm correspond à des bassins versants sans banquettes ou peu de banquettes (couverture inférieure à 20 %) sur pentes fortes et sols argileux ou marneux peu affectés par les phénomènes de retrait et gonflement ;
- 200 mm < P0 < 250 mm correspond à des bassins versants avec banquettes sur pentes moyennes à faibles ou à des bassins versants sans banquettes sur sols argileux ou marneux moyennement affectés par le retrait (couverture inférieure à 20 %) ;
- 250 mm < P0 < 300 mm correspond à des bassins versants sur sols à argiles gonflantes couvrant 20 % à 40 % de la superficie du bassin-versant ;
- P0 > 300 m correspond à des bassins versants cultivés à plus de 75 % sur sols à argiles gonflantes (plus de 40 % de la superficie du bassin versant).

Le croisement des classifications physiques et anthropiques avec celle du coefficient de croissance du ruissellement (A) en fonction de la pluie montre que :

- A < 0,05 correspond à des bassins versants à pente moyenne à faible, moyennement à peu cultivés, où les roches dures couvrent une partie assez notable du bassin versant (plus de 20 % de la superficie) ;
- 0,06 < A < 0,10 correspond à des bassins versants à moyenne à forte, où les sols, cultivés sur plus de 50 % de la superficie du bassin, possèdent une bonne capacité d'infiltration (teneur en argiles modérée pour les sols bruns calcaires) ;

- 0,11 < A < 0,15 correspond à des bassins versants à forte pente, où les sols possèdent une assez bonne capacité d'infiltration, soit en raison de la bonne couverture végétale (forêts, garrigue dense), soit en raison d'une teneur en argiles modérée (sols bruns calcaires) ;
- 0,16 < A < 0,30 correspond à des bassins à pente moyenne à forte sur marnes et argiles (plus de 60 % de la superficie du bassin), peu cultivés ou moyennement cultivés ;
- A > 0,30 correspond à des bassins versants à pente moyenne à forte, très cultivés (plus de 75 % de la superficie du bassin versant) sur argiles ou marnes (plus de 60 % de la superficie du bassin).

Le croisement des classifications physiques et anthropiques avec celle du coefficient B de turbidité moyenne des volumes ruisselés fournit les résultats suivants :

- B < 0,008 (10 g/l) correspond à des bassins versants à pente moyenne à faible, couverts dans une proportion notable de roches dures (plus de 20 % de la superficie du bassin), aménagés sur plus de 40 % de leurs superficies (banquettes ou forêts) ;
- 0,009 < B < 0,017 (11 g/l à 20 g/l) correspond à des bassins versants à pente moyenne, couverts dans une proportion notable de roches dures (plus de 20 % de la superficie du bassin), peu ou pas aménagés ;
- 0,018 < B < 0,033 (21 g/l à 40 g/l) correspond à des bassins à pente forte, couverts dans une proportion notable de roches dures (plus de 20 % de la superficie du bassin), peu ou pas aménagés ;
- 0,034 < B < 0,067 (41 g/l à 80 g/l) correspond à des bassins à pente forte, sur marnes et argiles (plus de 70 % d la superficie du bassin-versant) ;
- 0,068 < B < 0,10 (81 g/l à 120 g/l) correspond à des bassins à forte pente, sur marnes et argiles (plus de 70 % d la superficie du bassin-versant) et très cultivés (plus de 75 % de leurs superficies).

CONCLUSION

La prédétermination des apports liquides et solides aux lacs collinaires est donc possible à partir des seules caractéristiques pluviométriques (pluie annuelle médiane), physiques (pente moyenne, lithologie) et anthropiques (mise en culture, aménagements forestiers, banquettes) des bassins versants. Cette prédétermination, malgré son imprécision, peut permettre aux projeteurs de fixer l'ordre de grandeur des apports liquides et solides d'un petit bassin de la Dorsale tunisienne ou du Cap Bon, et ainsi de déterminer le volume initial d'un réservoir, compte tenu non seulement des apports liquides prévisibles mais également des risques d'envasement de la retenue.

Il est possible d'améliorer la précision de ces estimations en réalisant des cartographies plus précises de la lithologie des bassins versants, de leurs aménagements en banquettes et des sols nus et, en augmentant le nombre des

critères, par l'analyse de la structure des formations géologiques relativement à la pente et aux axes de drainage, par la cartographie des ravines.

Références bibliographiques

BOUFAROUA M., ALBERGEL J., PEPIN Y., 2000. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne. Vth International Conference on the geology of the Arab World (GAW-5), Le Caire, 21 au 24 février 2000.

D CES-ORSTOM (1996, 1997), D CES-IRD (1999, 2000), DG ACTA-IRD (2001, 2002). *Annuaires hydrologiques des lacs collinaires. Réseau pilote de surveillance hydrologique*. Année 1994-1995, mars 1996, 140 pp. ; Année 1995-1996, février 1997, 184 pp. ; Année 1996-1997, décembre 1997, 200 pp. ; Année 1997-1998, mars 1999, 208 pp. ; Année 1998-1999, février 2000, 202 pp. ; Année 1999-2000, mars 2001, 201 pp. ; Année 2000-2001, avril 2002, 175 pp.

KSIBI F., 2002. *Étude quantitative de l'envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne*. Projet de fin d'étude du cycle ingénieur de l'ESIER. Medjez El Bab, 71 pp.

PRÉDÉTERMINATION DE L'ENVASEMENT DES LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE

M. BOUFAROUA*, J.-M. LAMACHERE, F. KSIBI*** et A. DEBABRIA***

** Ministère de l'Agriculture, DG ACTA, D CES, 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis ; mboufaroua@yahoo.fr, aly_deba@yahoo.fr*

*** Mission IRD, B.P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunis, jean-marie.lamachere@ird.fr*

**** École supérieure des ingénieurs de l'équipement rural de Medjez El Bab (ESIER)*

Abstract

In Central Tunisia, during ten years, from 1994 to 2004, hydrological and bathymetric observations were conducted on an experimental network consists of 24 little artificial lakes set up at the outlets of little mountainous catchments (areas from 1.6 to 18 km²). In order to improve for irrigation the use of the water stored behind these little dams, it appears now necessary to choose the sites and to determine the initial volume of water according to the erosion sensibility on the uphill catchments. To predetermine the erosion on these little catchments, the first criterion to consider is the topography: the average slope of the catchments, overall slope index Ig, stated in m.km-1. The second criterion is the lithology with the cover of marls and clays on the catchments, stated in percent. The two others criteria are anthropogenic: first, the ratio of the area covered by cultivated soils to the area of the catchments, and, in secondary position, the ratio of the area covered by antierosive improvements (reforestations, contour ridges, drystone half-moon banks). The criteria must be combined to give a rough estimate of the soil erosion.

Keywords : *Silting Up* ; *Little Artificial Lakes* ; *Tunisian Mountain Range*.

INTRODUCTION

Un lac collinaire est une retenue artificielle d'un volume variant de quelques dizaines de milliers à un million de mètres cubes, pour des bassins versants d'une superficie allant de quelques centaines à deux milliers d'hectares (Boufaroua *et al.* 2000). Il est créé par la construction d'un petit barrage en terre d'une dizaine de mètres de hauteur, dont la longueur varie de 100 à 300 m. Or la durée de vie d'un lac collinaire dépend de l'érosion des sols de son bassin-versant et de la capacité initiale de stockage du barrage. Pour améliorer le choix des capacités initiales de stockage, nous présentons dans le présent article une méthode permettant d'évaluer la capacité à l'érosion des sols des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon, à partir des informations collectées par la DG ACTA et l'IRD (D CES-ORSTOM 1994-1999 ; DG ACTA-IRD 2000-2003) sur le réseau

pilote des lacs collinaires de ces deux régions et d'une connaissance sommaire des caractéristiques physiques et anthropiques des bassins versants.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

1.1. Bathymétrie, topographie

Les mesures bathymétriques et topographiques d'un lac collinaire permettent d'établir périodiquement les variations de la surface du plan d'eau et du volume d'eau stocké en fonction de la cote aux échelles limnimétriques. Elles permettent également de déterminer le volume de vase stocké dans la retenue depuis sa construction.

La bathymétrie des lacs a été effectuée périodiquement. Les mesures de profondeur des plans d'eau ont été réalisées par sondages des retenues à l'aide d'une mire graduée ou, pour les profondeurs supérieures à 4 m, d'un décamètre lesté. Le sondeur était porté par une embarcation pneumatique déplacée manuellement en travers du plan d'eau sur des lignes espacées de 20 m, matérialisées par des cordes tendues au ras de l'eau.

1.2. Transports solides évacués par le déversoir et par la vidange de fond

Au cours de l'année 1998-1999, le tonnage apporté par l'oued El Gameh au barrage de Kamech a été estimé à 11 000 tonnes, alors que le tonnage exporté par le déversoir et la vanne de fond a été estimé à 10 tonnes. On peut donc considérer que dans la majorité des cas, lorsque le barrage n'est pas complètement envasé, les transports solides évacués par le déversoir et par la vanne de fond peuvent être négligés devant les transports solides déposés dans la retenue.

1.3. Caractéristiques biophysiques et anthropiques des bassins versants

La caractérisation topographique des bassins versants a été réalisée en utilisant les cartes au 1/50 000, disponibles sur la plupart des sites. Nous avons utilisé comme critère principal l'indice global de pente, exprimé en $m.km^{-1}$, égal au rapport de la dénivelée entre les altitudes qui laissent 5 % au-dessus et au-dessous d'elles et la longueur du rectangle équivalent, rectangle de même superficie et de même périmètre que le bassin versant.

La caractérisation géologique des bassins versants a été faite en utilisant les cartes géologiques de Tunisie au 1/50 000 ou au 1/200 000. Sur chaque carte géologique, ont été relevées les superficies occupées par chaque formation en leur attribuant une dominante dure lorsque la formation était calcaire ou gréseuse, et une dominante tendre lorsque la formation était sableuse, marneuse, marno-calcaire ou argileuse.

Parmi les ouvrages hydrauliques de CES, les aménagements les plus répandus dans la Dorsale tunisienne sont les banquettes à rétention totale ou partielle. Ces ouvrages sont nettement visibles sur les photographies aériennes et jouent un rôle

important sur les volumes ruisselés et, par conséquent, sur les transports solides à l'échelle des petits bassins versants. Les reboisements sont, eux aussi, parfaitement bien identifiés sur les photographies aériennes et jouent un rôle important, réduisant considérablement le ruissellement et l'érosion lorsque la végétation est dense. Nous avons déterminé, sur chaque bassin-versant, les pourcentages de la superficie du bassin versant recouverte par les cultures, les parcours, les aménagements en banquettes et les forêts.

2. RÉSULTATS, ET DISCUSSION

L'analyse des caractéristiques physiques et anthropiques des bassins versants permet de classer les bassins versants (Ksibi, 2002) en 4 classes de relief, 4 classes lithologiques, 4 classes de mise en culture, 4 classes d'aménagement anti-érosif (banquettes et forêts). Le croisement de ces classifications avec celle de l'envasement annuel moyen des lacs collinaires permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- les bassins versants où l'ablation est la plus forte (groupes IV et V), supérieure à 20 t/ha/an (15 m^3/an/ha), sont des bassins à pente moyenne à forte (P3-P2), couverts à plus de 80 % par des marnes ou des argiles (L4), cultivés à plus de 50 % (C3-C4) et non aménagés en banquettes ou en reboisements (A1) ;
- les bassins versants où l'ablation est moyenne (groupe III), comprise entre 13 t/ha/an et 20 t/ha/an (10 m^3/ha/an à 15 m^3/ha/an), sont des bassins versants à pente moyenne à très forte (P3-P2-P1), couverts à plus de 60 % par des marnes ou des argiles (L3-L4), sans aménagements antiérosifs (A1) ou avec des aménagements en banquettes ou des forêts sur fortes pentes et terrains argileux où ils perdent beaucoup de leur efficacité (Sbaihia, Arara) ;
- les bassins versants où l'ablation est faible (groupe II), comprise entre 6,5 t/ha/an et 13 t/ha/an (5 m^3/ha/an à 10 m^3/ha/an), sont le plus souvent des bassins versants à pente moyenne à forte (P3-P2), sur lesquels la couverture lithologique comporte une part notable de roches dures (L1-L2-L3), peu aménagés (A1-A2) ou avec des aménagements en banquettes ou des forêts sur fortes pentes et terrains argileux (Brahim Zaer, Es Sénéga) ;
- les bassins versants où l'ablation est très faible (groupe I), inférieure à 6,5 t/ha/an (5 m^3/ha/an), sont des bassins à pente moyenne à faible (P3-P4), sur lesquels la couverture lithologique comporte une part notable de roches dures (L2-L3), très aménagés (A4) ou peu aménagés (A1).

Tab. 1. Envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon

Nom	Année de création	Durée des observations	Vitesse		Durée de vie	Groupes d'érosion
			m^3/an/ha	t/an/ha		
Sadine 1	1989	10	10	13	9	II-III
Sadine 2	1990	10	12	15	11	III
Fidh Ben Naceur	1990	9	9,8	13	28	II-III
Fidh Ali	1991	9	23	30	24	V
M'Richet	1992	7	8,7	11	31	II
El Gouazine	1990	10	0,92	1,2	143	I
Hadada	1992	4	8,2	11	23	II
Jannet	1992	6	19	25	10	IV
El H'Nach	1992	4	13	17	15	III
Abdessadock	1990	8	11	14	27	III
Dékikira	1991	5	15	19	49	III-IV
Es Sénéga	1991	7	8,8	12	25	II
Echar	1993	3	2,1	2,7	100	I
Abdeladim	1992	7	1,5	1,9	182	I
Arara	1992	6	14	18	9	III
Sbaihia	1993	12	11	14	37	III
Saadine	1992	5	22	29	6	V
Es Séghir	1990	6	0,8	1	614	I
El Melah	1990	9	6,5	8,4	37	II
Kamech	1991	13	11	14	53	III
Brahim Zaher	1992	7	9,8	13	19	II-III
Baouejer	1991	7	1,9	2,4	69	I
M'Rira	1991	5	4	5,4	54	I
El Amadi	1992	10	5,2	6,8	49	II

CONCLUSION

La prédétermination de l'érosion des sols des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon est donc possible en ne prenant en compte que les principales caractéristiques physiques (topographie, lithologie) et anthropiques (mise en culture, aménagements anti-érosifs) des bassins versants. C'est la combinaison des critères physiques et anthropiques qui permet une prédétermination de l'ablation des sols des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon. Cette prédétermination reste grossière, mais elle peut être affinée en améliorant, d'une part, la connaissance lithologique et géologique structurale des bassins versants du réseau pilote d'observation hydrologique et,

d'autre part, la connaissance des aménagements antiérosifs, principalement en ce qui concerne les banquettes.

Références bibliographiques

BOUFAROUA M., ALBERGEL J., PÉPIN Y., 2000. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne. Vth International Conference on the geology of the Arab World (GAW-5) Le Caire, 21 au 24 février 2000.

D CES-ORSTOM (1996, 1997), D CES-IRD (1999, 2000), DG ACTA-IRD (2001, 2002). *Annuaires hydrologiques des lacs collinaires. Réseau pilote de surveillance hydrologique*. Année 1994-1995, mars 1996, 140 pp. ; Année 1995-1996, février 1997, 184 pp. ; Année 1996-1997, décembre 1997, 200 pp. ; Année 1997-1998, mars 1999, 208 pp. ; Année 1998-1999, février 2000, 202 pp. ; Année 1999-2000, mars 2001, 201 pp. ; Année 2000-2001, avril 2002, 175 pp.

KSIBI F., 2002. *Étude quantitative de l'envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne*. Projet de fin d'étude du cycle ingénieur de l'ESIER. Medjez El Bab, 71 pp.

RAVINEMENT ET BILAN HYDRO-SÉDIMENTAIRE DES LACS DE RETENUES COLLINAIRES AU MAGHREB

Jean ALBERGEL*, Patrick ZANTE*,
Jean COLLINET, Rafla ATTIA*** et Abdelaziz MERZOUK******
** IRD, UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier ; Jean.Albergel@ird.fr*
*** IRD, 5 route de Bitche 67110 Niederbronn-les-Bains*
****Direction des sols, 17 Rue Hédi Karray Ariana Tunis*
*****IFAD, PN Rome*

Abstract

In Tunisia, more than 50 000 km², which is 31% of the territory, are threatened or already degraded by gully erosion. On small catchments, from 50 to 500 ha, the density of ravines networks reaches at present 40 to 150 m/ha and it doubled in 27 years. This paper has two objectives: to measure the evolution of ravines degrading farmlands in semi-arid Tunisia; to present the principles of gully erosion modelling onto hillsides. This modelling considers simultaneously the dynamics of catchment areas and ravines, to be able to identify functional links allowing interconnecting the both dynamics: sheet and gully erosion.

Keywords : *Tunisia* ; *Gully Erosion* ; *Modelling* ; *Hillslopes Dynamics*.

INTRODUCTION

De nombreuses retenues collinaires ont été construites dans les régions semi-arides, particulièrement en domaine méditerranéen. Généralement, dans les pertes en terre du bassin, la part prise par la seule érosion aréolaire reste à un niveau modeste, n'excédant pas les 15 t/ha/an pour ses formes les plus sévères sur matériaux très peu cohérents (Hamed *et al*., 2002). L'érosion par ravinement des bassins versants est la cause principale des comblements plus ou moins rapides de ces retenues (Abdellaoui *et al*., 2002 ; Poesen *et al*., 2003). Ce ravinement est particulièrement préoccupant sur les sols différenciés aux dépens de marnes et argilites sédimentaires affleurant en de nombreux pays autour de la Méditerranée (Poesen et Hooke, 1997). Verstraeten *et al*. (2003) montrent en outre que la topographie (pente), la couverture végétale, la forme du bassin versant, la lithologie et la présence de ravines à proximité du réservoir sont les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion spécifique annuelle pour 60 bassins versants étudiés en Espagne. En Tunisie, Sfar *et al.* (1999) ont constaté que sur des bassins de 50 ha à 500 ha, la densité des réseaux de ravins atteignait actuellement 40 m/ha à 150 m/ha et qu'elle avait parfois doublé en vingt-sept ans. D'autre part, ces auteurs ont noté que plus de 50 000 km², soit 31 % du territoire tunisien, sont menacés ou déjà dégradés par l'érosion linéaire.

Le premier objectif de cette étude est la mesure de l'évolution des ravins dégradant les terres cultivées dans le domaine semi-aride tunisien afin de prévoir la diminution de capacité de retenues collinaires. Le second objectif est une contribution à la modélisation du ravinement sur les versants. Pour ce faire, on considère simultanément les dynamiques des *impluviums* et des ravins, afin de pouvoir identifier des liens fonctionnels permettant d'interconnecter ces dynamiques (Bull et Kirkby, 2002).

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Deux sites ont été retenus dans deux bassins versants de la Dorsale tunisienne. L'un est situé dans le bassin versant de Kamech (245 ha), dans la péninsule du Cap Bon : il s'inscrit dans une surface d'aplanissement recoupant un anticlinal gréseux et marneux du Miocène moyen. Avec 500 mm à 1 000 mm de pluies (Gounot et Le Houerou, 1967), il est situé en limite des bioclimats méditerranéens sub-humides inférieurs et semi-arides supérieurs. Ce bassin versant est cultivé à 75 % en céréales, légumineuses ; les plus fortes pentes sont réservées aux parcours. L'autre est dans le bassin versant de Fidh Ali (212 ha), il occupe la voûte érodée d'un anticlinal, constitué de calcaires à lumachelles d'âge tertiaire, surmontant des argilites gypseuses avec de minces bancs de calcaires gréseux intercalés qui constituent un long glacis localement fortement entaillé en *badlands*. Avec 200 mm à 600 mm de précipitations, la région se trouve à la limite des climats semi-aride inférieur et aride supérieur. Le bassin versant est occupé en quasi-totalité par de la céréaliculture extensive alternant avec la jachère. La dynamique structurale saisonnière forte est liée aux smectites et illites issues de l'altération des roches. Elle s'exprime sur les deux sites par une fissuration importante en saison sèche et à Fidh Ali. La dissolution du gypse en profondeur provoque des effondrements structuraux préparant au *piping*.

Sachant que la dynamique des ravins est influencée par celle des *impluviums* situés à l'amont (Bull et Kirkby, 2002), la méthode consiste à prendre en compte le fonctionnement de l'*impluvium*, le fonctionnement de la ravine et les connexions entre les deux dynamiques. La prévision des écoulements et les premiers stades d'érosion sur *impluvium* sont déduits des essais de simulation de pluies qui permettent une prévision des périodicités, des intensités du ruissellement et des charges solides qui parviennent à la ravine. Les données expérimentales obtenues sont reportées (modèle MOBIL) dans les hyètogrammes des pluies naturelles et permettent de prévoir les zones génératrices de ruissellement et les charges solides des flux engendrés selon les caractéristiques hydrodynamiques des différentes zones de l '*impluvium* (fig. 1).

La dynamique des ravins est étudiée en recherchant les relations entre les bilans abrasion/dépôt et la caractéristique d'état des versants. Les bilans abrasion/dépôts sont obtenus par comparaison de MNT issus des levés de terrain au théodolite laser ; ils sont complétés localement par un dispositif permettant de restituer des profils en travers à partir de mesures effectuées au distance-mètre laser. Les points sont choisis en fonction des irrégularités du relief, le long de lignes perpendiculaires aux ravins et matérialisées par une corde posée au sol. Des points complémentaires sont levés pour rendre compte des ruptures de pentes.

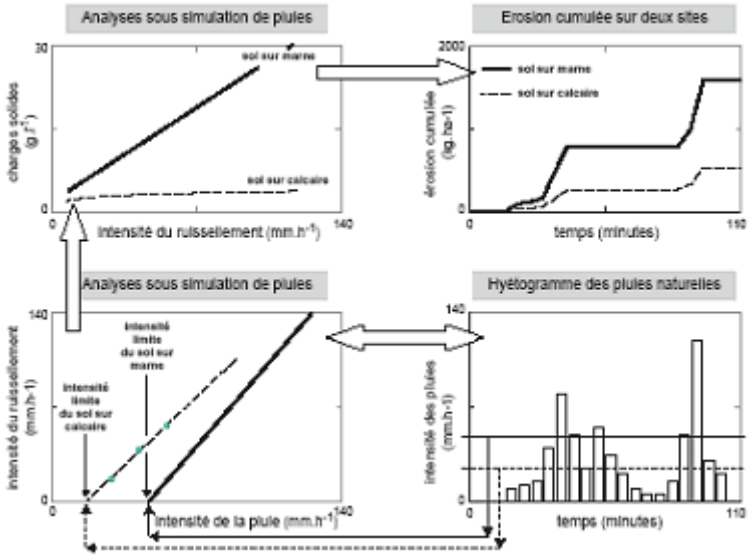


Fig. 1. Prévision des écoulements et de l'érosion avec le modèle MOBIL

Les MNT sont élaborés avec SURFER 8.0 en choisissant une grille de 0,05 m ; les courbes de niveau sont obtenues par triangulation avec interpolation linéaire ; les volumes sont calculés par la méthode des trapèzes et le ravin *stricto sensu* est délimité par un masque qui suit la rupture de pente. Les variations de volume sont obtenues par différence entre deux MNT limités par le même masque. L'incertitude sur la cote moyenne du MNT est de 0,0128 m (P = 0,01) et les incertitudes de calage sur borne (P = 0,01) sont de 0,0319 m sur X, 0,0204 m sur Y et 0,009 m sur Z. Ces résultats permettent le calcul des volumes par différence des MNT en 1999, 2001 et 2003 pour les conditions de tolérance les plus sévères (P = 0,01). Cette méthode est appliquée une fois par an ou après un événement érosif important. Les zones d'isocaractéristiques d'états des ravines sont définies par les types d'occupation (Vif 1 : 0 %-25 % de végétation ; Vif 2 : 25 %-50 % ; Enherbé1 : 75 %-100 % ; Enherbé2 : 50 %-75 %) et sont caractérisées par des variables de géométrie (largeur et profondeur de ravine, pente des berges et du lit, distance à la tête, exposition…), de substrat (sol ou roche mère). Elles sont tracées sur le MNT après leur identification sur le terrain et constituent autant de masques permettant d'établir leur bilan volumique par comparaison entre deux MNT, et de rechercher des relations bi-variées et des corrélations entre les variables et les bilans volumiques.

2. RÉSULTATS

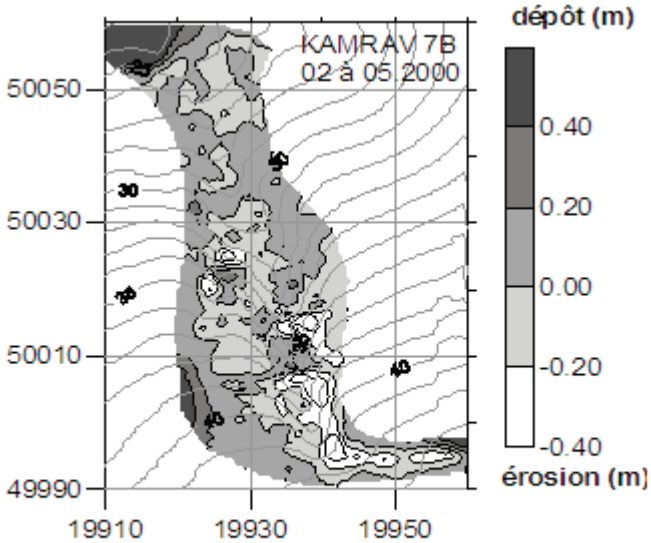
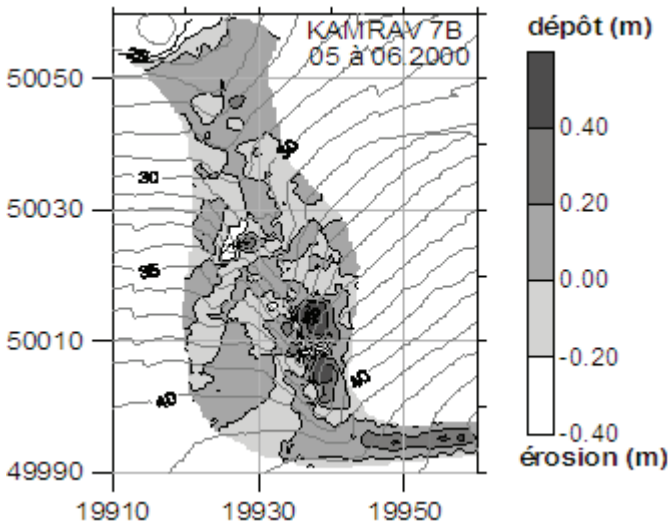


Fig. 2. Iso-volumes des remaniements sur la ravine 7b de Kamech (Tunisie)



Deux catégories d'informations sont disponibles. La première donne les bilans volumiques portant sur des surfaces développées de ravins allant de 1 500 m^2 à 6 000 m^2. La seconde catégorie se rapporte aux études sur des mailles plus fines pour prévoir des fonctionnements. Les bilans volumiques globaux sont traduits par des cartes qui représentent des surfaces d'isoremaniements (fig. 2). Sur l'ensemble des ravins étudiés dans les deux bassins versants, on constate que la position des aires contributives des apports et des départs de matériaux n'est pas stable d'une période à la suivante. Par exemple, sur le ravin Kamech 7B, aux phases d'érosion du lit à l'amont en début d'année (février à mai 2000) succèdent des phases de dépôts (mai à juin 2000), tandis que les sédiments du large lit à l'aval sont totalement déblayés à l'issue des averses de juin 2000. On passe d'un bilan positif avec + 0,032 m^3/m^2 à un bilan légèrement érosif avec - 0,009 m^3/m^2 . Sur ces ravins, on repère une nette influence des flux provenant des champs de l'amont avec des effets souvent divergents sur différents secteurs des ravins. Les remaniements dans les ravins résultent d'une juxtaposition de processus d'ablation par des flux intenses et peu chargés, donc à forte capacité abrasive, et de processus de sédimentation liés à des flux moins intenses mais très chargés. Le

tableau ci-dessous résume les bilans volumiques des trois ravins étudiés durant trois à cinq ans. Les ablations y apparaissent très dispersées, entre 9 dm^3 et 76 dm^3 de terre par m² de surface développée, les comblements sont plus regroupés, entre 29 m^3/m^2 et 35 m^3/m^2. Il s'agit donc d'un système complexe nécessitant la connaissance des connexions entre les dynamiques d'*impluvium* et celles des ravins.

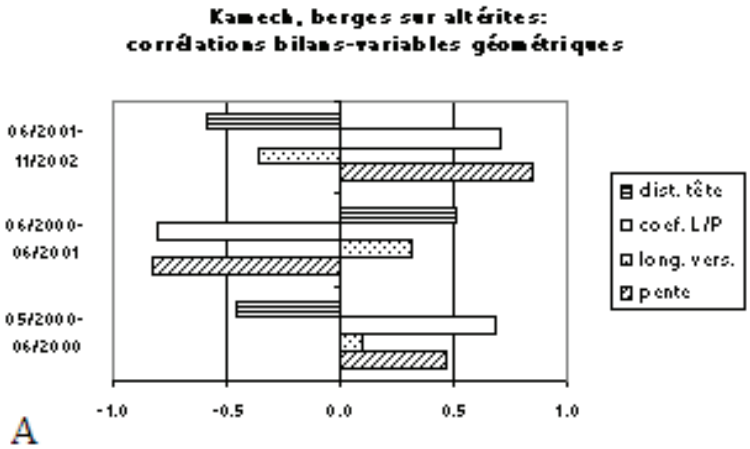
Tab. 1. Bilan spécifique de l'érosion ravinaire sur les sites étudiés à Kamech et Fidh Ali

Sites (superficie développée, m^2)	Date	Durée (mois)	Pluies cumulées (mm)	Érosivités cumulées (MJ.mm/ha.h)	Bilan spécifique /superficie (m^3/m^2)	Bilan spécifique /pluie (m3/mm)
Kamech 7b (1440)	02/2000 05/2000	4	155	20	0,032	0,206
	05/2000 06/2000	1,4	83	7	- 0,009	- 0,110
	06/2000 06/2001	12	628	163	- 0,076	- 0,120
	06/2001 11/2002	17	642	99	- 0,038	- 0,060
Kamech 2F (1725)	05/2000 06/2000	1,4	83	7	- 0,064	- 0,700
	06/2001 11/2002	17	642	99	- 0,012	- 0,020
Fidh'Ali (5680)	08/1999 12/2001	28	532	112	0,035	0,070
	12/2001 10/2003	23	484	83	0,029	0,060

La recherche de relations explicatives du fonctionnement des ravines s'est faite à partir d'environ 130 masques présentant des situations simples d'occupation et de géométrie. L'analyse bi-variée sur ces masques a montré que pour un état donné du versant (surface nue sur sol ou sur altérite, surface plus ou moins végétalisée), il existe des relations fonctionnelles entre les berges et les lits et les bilans volumiques spécifiques. Les variables géométriques qui semblent les plus efficientes sont : la pente des berges et des lits, la longueur des versants et des lits, un coefficient de forme donnant une indication sur le stade d'activité du ravin (largeur/profondeur), la distance à la tête du ravin. Des matrices de corrélations ont ensuite été dressées entre les bilans et ces variables géométriques pour chaque état donné du versant. Elles montrent (v. page suivante, fig. 3a et 3b) que les comportements divergent selon les périodes et que, selon les périodes, les meilleures corrélations s'établissent sur des variables différentes. Ceci pourrait être dû à l'influence du comportement différent des *impluviums*. Une analyse

multivariée des données permet de mettre en évidence que, par exemple, dans le bassin versant de Kamech, le fonctionnement des lits de ravine creusés dans les altérites est lié au rapport L/P (largeur/profondeur) de la ravine, alors qu'un lit creusé dans les sédiments a un fonctionnement plutôt dépendant de la distance à la tête de ravine. L'évolution des berges végétalisées est, elle, en relation avec la longueur du versant et la pente.

3a



3b

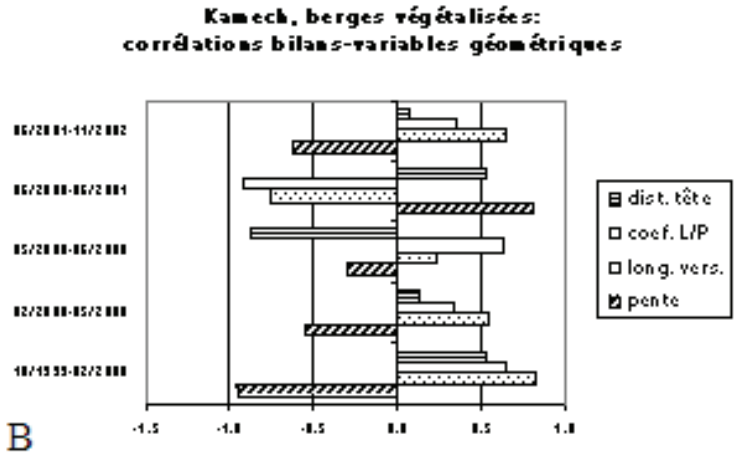


Fig. 3. Bassin versant de Kamech, corrélations bilans volumiques - variables géométriques

CONCLUSION

Les comparaisons diachroniques de MNT produits à partir de levés topographiques effectués sur des ravines des bassins versants de Kamech et Fidh Ali ont montré un taux d'érosion annuel sur les versants ravinés allant de 15 à 60 m^3/ha selon les ravins, en tenant compte de la surface de leur *impluvium* respectif. Ces valeurs sont cohérentes avec celles qui sont fournies par les mesures de sédimentation (via la bathymétrie), effectuées dans une vingtaine de retenues âgées d'environ 10 ans (J. Albergel *et al*., 2001). Pour un état donné du versant (surface nue sur sol ou sur altérite, surface plus ou moins végétalisée), les variables géométriques explicatives sont les pentes des berges et des lits, leur longueur, un coefficient de forme donnant une indication sur le stade d'activité du ravin (largeur/profondeur) et, enfin, la distance jusqu'aux têtes des ravins. Les matrices de corrélations établies pour chaque état donné du versant entre les bilans et ces variables géométriques ont des coefficients entre 0,7 et 0,96 dans 30 % des cas à Fidh-Ali et dans 60 % des cas à Kamech, mais elles indiquent aussi que les fonctionnements peuvent diverger d'une époque à la suivante. C'est ainsi que, par exemple, l'augmentation de pente d'une berge dénudée peut entraîner soit une augmentation de l'ablation, soit sa diminution, selon la saison. Il apparaît ici que les fréquences des écoulements provenant des *impluviums* de l'amont, les variations de leurs débits et, surtout, de leurs charges solides, en relation avec les façons culturales en période de forte agressivité des pluies, sont des éléments particulièrement importants pour expliquer les modifications des bilans volumiques les mieux corrélés dans les ravins.

Références bibliographiques

ABDELHAOUI B., MERZOUK A., ABERKAN M., ALBERGEL J., 2002. Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc), *Revue des sciences de l'eau*, vol. 15 : 737-748.

ALBERGEL J., NASRI S., BOUFAROUA M., PÉPIN Y., 2001. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la dorsale tunisienne. PHI-V, UNESCO (édit.). *In* : Séminaire International Montpellier 2000 « Hydrologie des régions méditerranéennes ». *Documents techniques en hydrologie* 51, 63-70.

BULL L.J., KIRKBY M.J., 2002. Channel Heads and Channel Extension. *In* : Bull L. J., Kirkby M. J. (édit.), *Dryland Rivers, Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. John Wiley & Sons, 263-298.

HAMED Y., ALBERGEL J., PÉPIN Y., ASSELINE J., NASRI S., ZANTE P., BERNDTSSON R., EL-NIAZY M., BALAH M. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena*, 50 : 1-16.

POESEN J., HOOKE J.M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean Environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21 (2) 157-199.

POESEN J., NACHTERGAELE J., VERSTRAETEN G., VALENTIN C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50 : 91-133.

SFAR F. M., SNANE M. H., MLAOUHI A., MEGDICHE M.F. 1999. Importance du facteur lithologique sur le développement des ravins du bassin versant de l'oued Maiez en Tunisie centrale. *Bull. Eng. Geol. Env*. 57: 285-293.

VERSTRAETEN G., POESEN J., DE VENTE J., KONINCKX X., 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiqualitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50: 327-348.

MESURE ET MODÉLISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS AGRICOLES AU MAROC ET AU QUÉBEC

Marc DUCHEMIN*, Moncef BENMANSOUR, Asmae NOUIRA** et Jacques GALLICHAND*****

** Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 2700 rue Einstein Sainte-Foy, Québec, Canada, G1P 3W8 ; Marc.Duchemin@irda.qc.ca*

*** Centre national de l'énergie, des sciences et des techniques nucléaires (CNESTEN), Rabat, Maroc, B.P. 1382 R.P. 10001 ; benmansour@cnesten.org.ma ; nouira@cnesten.org.ma*

**** Université Laval, département des sols et de génie agroalimentaire Pavillion Comtois, Québec, Canada, G1K 7P4 ; Jacques.Gallichand@sga.ulaval.ca*

Abstract

Soil degradation due to water erosion affects most of agricultural lands in Morocco and Quebec (Canada). This phenomenon causes a progressive reduction of soil natural fertility, sedimentation of water reservoirs and decline in water quality. Reliable information about soil erosion is essential in order to evaluate the severity of the problem and to optimize strategies for soil conservation and sustainable crop production. The aim of this project is to study water erosion in agricultural soils through two pilots sites in Morocco and Quebec, by considering the aspects related to the erosion estimation methodologies and those of soil conservation techniques.

Keywords : *Morocco* ; *Quebec* ; *Erosion Modelling* ; *Césium137* ; *Beryllium7* ; *Conservation Tillage*.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique constitue un processus de dégradation des sols qui affecte une grande partie des terres agricoles du Maroc et du Québec (Canada). Les pertes de sols peuvent engendrer une réduction progressive de la fertilité du sol et du rendement agricole, l'envasement des cours d'eau et une diminution de la qualité des eaux. Au Maroc, une vingtaine de bassins versants localisés en amont des principaux barrages sont jugés prioritaires et les zones à haut risque d'érosion représentent environ 11 millions d'hectares. Au Québec, les sols à bon potentiel agricole couvrent moins de 2 millions d'hectares et l'érosion hydrique affecte 10 % des terres agricoles en monoculture. Le gouvernement du Québec a identifié 33 cours d'eau dont la qualité est fortement dégradée par les activités agricoles des bassins versants. Le besoin d'assembler des renseignements fiables sur les pertes de sol est essentiel afin d'évaluer l'ampleur du problème d'érosion et d'optimiser les stratégies d'aménagement des bassins versants qui permettront d'assurer un développement agricole durable. Ce projet vise à étudier l'érosion

hydrique des sols en milieu agricole en s'intéressant aux aspects de conservation des sols et des eaux.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1 Techniques de diagnostique de l'érosion

1.1.1 Radioéléments

Le Césium-137 et le Bérylium-7, radioéléments d'origines artificielle (essais nucléaires) et naturelle respectivement, déposés à la surface du sol par les précipitations, ont été utilisés dans cette étude comme marqueurs des particules fines du sol. L'estimation des taux d'érosion ou de déposition de sol peut être déterminée par la mesure de la perte ou du gain des inventaires des radioéléments (en $Bq.m^{-2}$) par rapport à la valeur d'une référence locale établie dans un champ stable non perturbé (exemples : prairie, forêt). Alors que les taux d'érosion estimés à partir du ^{137}Cs sont associés à des épisodes d'érosion relativement longs (demi-vie de 30 ans), ceux estimés à partir du ^{7}Be offrent la possibilité de suivre l'évolution à court terme (demi-vie de 53 jours) des mouvements de sol, suite à un changement des pratiques agricoles. Au Maroc, le potentiel d'application de la technique de ^{137}Cs a été démontré par Benmansour *et al.* (2000), Bouhlassa *et al.* (2000) et Nouira *et al.* (2003). Cette technique a aussi été utilisée au Québec pour estimer les pertes de sol à l'échelle du champ et du bassin versant (p. ex. Bernard et Laverdière, 1992 ; Mabit *et al.*, 2004).

1.1.2. Modélisation

Les modèles informatiques permettent de simuler l'impact des activités agricoles et des mesures de conservation sur la qualité de l'eau et des sols. L'emploi particulier des modèles d'érosion tels que l'équation universelle de perte de sol révisée RUSLE (Renard *et al.*, 1997) permet d'estimer les taux d'érosion annuelle à partir de paramètres locaux (pluie, sol, topographie, culture). Afin de rendre la gestion des données plus conviviale, les spécialistes de l'érosion ont élaboré des systèmes informatiques adaptés aux besoins des utilisateurs ; le logiciel RUSLE2 en est un exemple. La plupart des modèles mathématiques proposés pour relier l'érosion hydrique aux pertes de ^{137}Cs supposent que les pertes de sol sont proportionnelles aux réductions de l'activité spécifique en ^{137}Cs d'un sol labouré. Puisque la modélisation de l'érosion par le ^{137}Cs témoigne de l'ensemble des mouvements de sol à long terme, elle a été envisagée pour valider les modèles d'érosion et de transport sédimentaire (p. ex. Montgomery *et al.*, 1997 ; Duchemin *et al.*, 2002).

1.1.3. Mesures aux champs

En ce qui concerne la quantification *in situ* des taux d'érosion, les méthodes généralement utilisées reposent sur l'aménagement de parcelles expérimentales dotées de systèmes de mesure des flux d'eau et de collecte des sédiments transportés par le ruissellement. Suite aux précipitations, les eaux de ruissellement s'écoulent vers l'aval des parcelles où elles sont captées par des collecteurs et dirigées vers un dispositif de mesure et d'échantillonnage. Les paramètres mesurés suite aux précipitations sont les volumes d'eau de pluie et de

ruissellement et les concentrations de matières en suspension (MES). Cette technique permet d'étudier l'influence des systèmes de gestion agricole sur les processus d'érosion.

2.2. Sites expérimentaux

2.2.1. Site du Maroc

L'étude marocaine s'est déroulée dans un champ agricole appartenant au domaine de Marchouch de l'INRA, localisé à environ 70 km au sud-est de Rabat. Occupant une pente de 17 %, le site est constitué de parcelles de 4 m de largeur par 22 m de longueur, où le labour des céréales (blé et lentilles) en semi-direct est comparé au labour conventionnel. Le sol présente une texture argileuse. La précipitation moyenne annuelle est de 405 mm. Pour la méthode des radioéléments, l'échantillonnage repose sur l'approche transect, où les échantillons de sol sont collectés le long de la pente (100 m) du champ. Dans le cas du ^{7}Be, les prélèvements sont effectués à l'intérieur des parcelles. Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide de tubes cylindriques en acier, qui sont introduits jusqu'à 30 cm de profondeur pour la détermination du ^{137}Cs et 5 cm pour le ^{7}Be. Des champs de référence stables localisés non loin du site d'étude ont été identifiés. La modélisation avec RUSLE permet de comparer les taux d'érosion aux points des transects.

2.2.2. Site du Québec

Le dispositif expérimental québécois a été aménagé à la ferme expérimentale de l'IRDA, située à Saint-Lambert-de-Lauzon, à environ 30 km au sud de Québec. Il se compose de six parcelles de 3 m de largeur par 32 m de longueur, sur un sol limoneux dont la pente est de 4,5 %. Une culture de maïs-grain (*Zea mays L.*) a été établie sur les parcelles. La précipitation moyenne annuelle est de 1 000 mm. Les traitements utilisés consistent en différentes techniques de travail de sol (labour, chisel et semis-direct). Chaque parcelle est munie d'un capteur d'eau de ruissellement de 3 m de largeur, installé en aval des parcelles. Un système de canalisation constitué de tubes en PVC de 5 cm de diamètre relie les capteurs aux équipements de mesure (auget basculeur) et d'échantillonnage (réservoir). Ces mesures, combinées aux caractéristiques topographiques et pédologiques des parcelles, servent à alimenter le modèle d'érosion RUSLE. La procédure utilisée pour échantillonner les sols destinés aux analyses des radioéléments (^{137}Cs et ^{7}Be) est similaire à celle utilisée au Maroc.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Estimation des taux d'érosion pour le site du Maroc

L'activité moyenne en ^{137}Cs des champs de référence est de 1 440 Bq.m^{-2} alors que la zone d'érosion (activités < 1 440 Bq.m^{-2}) représente environ 70 % de la superficie du site. Le taux d'érosion moyen obtenu par le modèle de conversion *Mass balance 2* (Walling et He, 1999) est de 18 t.ha^{-1}.an^{-1} alors que l'érosion nette correspond à une valeur de 11 t.ha^{-1}.an^{-1}. La détermination du taux d'érosion en appliquant le modèle RUSLE aux points des transects conduit à une valeur

moyenne de 20 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, similaire à celle obtenue avec le ^{137}Cs. Les valeurs en ^{7}Be du champ de référence pour 2004 et 2005 sont de 120 et 101 $Bq.m^{-2}$ respectivement. Les activités en ^{7}Be du champ étudié sont comprises entre 50 et 180 $Bq.m^{-2}$. Les valeurs moyennes des taux d'érosion correspondant à l'événement de mars 2004 (précipitation de 48 mm) sont de 10 $t.ha^{-1}$ pour le semis direct et de 16 $t.ha^{-1}$ pour le labour conventionnel, alors qu'en mars 2005 (précipitation de 34 mm), les taux moyens sont estimés à 6 $t.ha^{-1}$ et 8 $t.ha^{-1}$. Ces premiers résultats suggèrent une réduction des taux d'érosion pour les sols soumis aux pratiques de conservation en semis direct.

3.2. Estimation des taux d'érosion pour le site du Québec

Un premier essai de mesures aux champs a été effectué d'avril à novembre 2003 sur des parcelles en culture d'orge. Les résultats obtenus indiquent des taux d'érosion moyens de 0,147 $t.ha^{-1}$ pour le labour conventionnel, comparativement à 0,018 $t.ha^{-1}$ pour le semis direct. Un mauvais fonctionnement du système de mesure des volumes d'eau serait à l'origine des ces faibles taux d'érosion. Des simulations effectuées avec le modèle RUSLE pour les parcelles d'orge ont conduit à des pertes annuelles de sol de 5,8 $t.ha^{-1}$ pour le labour conventionnel et de 1,5 $t.ha^{-1}$ pour le semis direct. Une application de la technique de traçage des sédiments avec ^{137}Cs indique que l'activité moyenne des champs de référence était de 2442 $Bq.m^{-2}$ alors qu'elle atteignait 1773 $Bq.m^{-2}$ pour les sols agricoles. Le taux d'érosion moyen obtenu par le modèle de conversion *Mass balance 2* était de 5,3 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Pour l'application de la technique de ^{7}Be, le nombre d'échantillons prélevés jusqu'à présent ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur les valeurs des taux d'érosion.

CONCLUSION

Les premiers résultats de ce projet ont permis de quantifier l'érosion hydrique des sols agricoles au Québec et au Maroc par différentes techniques, et d'évaluer l'efficacité des méthodes de conservation des sols. Pour le site du Maroc, les mesures d'érosion par l'emploi du ^{7}Be ont montré qu'un sol soumis à un labour conventionnel accusait un taux d'érosion plus élevé qu'un sol soumis au semis direct. Par ailleurs, les taux d'érosion estimés par le modèle RUSLE conduisaient à des valeurs proches de celles estimées par le ^{137}Cs. Pour le site du Québec, les premières mesures aux champs ont permis de confirmer que le labour conventionnel engendrait une érosion plus élevée que le travail en semis direct. Le traçage des sédiments au ^{137}Cs a fourni une première indication du taux annuel moyen d'érosion à long terme pour le site de Saint-Lambert-de-Lauzon. L'emploi du modèle RUSLE a permis d'estimer l'impact environnemental de différents systèmes de gestion agricole à un moindre coût.

Références bibliographiques

BENMANSOUR M., IBN MAJAH M., MARAH H., MARFAK T., WALLING D.E., 2000. Use of the ^{137}Cs technique in soil erosion in Morocco - Case study of the Zitouna basin in the north. *Proceeding of an International Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrients, Water and Soil management*. IAEA/FAO, 308-315.

BERNARD C., LAVERDIÈRE M. R., PESANT A. R., 1992. Variabilité de la relation entre les pertes de césium et de sol par érosion hydrique. *Geoderma,* 52 : 265-277.

BOUHLASSA S., MOUKHCHANE M., AIACHI A., 2000. Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using ^{137}Cs technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica*, 35:239-249.

DUCHEMIN M., MABIT L., LACHANCE M., BERNARD C., MORIN G., LAGACE R, LAVERDIERE M. R. (2002). Évaluation du bilan sédimentaire d'un petit bassin versant agricole à l'aide de CEQÉROSS et des mesures au césium-137. *Agrosol* 13, 1:23-34.

MABIT L., M. DUCHEMIN, M. R. LAVERDIERE et C. BERNARD (2004). Quantification de l'érosion hydrique et étude de l'origine des sédiments colmatant la frayère de la rivière Boyer (Québec). *Vecteur Environnement* 37, 2 :80-89.

MONTGOMERY J. A., BUSACCA A. J., FRAZIER B. E., MCCOOL D.K., 1997. Evaluating soil movement using cesium-137 and the revised universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal* , 61:571-579.

NOUIRA A., SAYOUTY E. H., BENMANSOUR M., 2003. Use of ^{137}Cs technique for soil erosion study at (Casablanca region) agricultural land in Morocco. *Journal of Environmental Radioactivity*, 68:11-26.

RENARD K. G., FOSTER G.R., WEESIES G. A., MCCOOL D. K., YODER D. C., 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook 703, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington D. C., 404 pp.

WALLING D.E., HE Q., 1999. Improved models for deriving estimates of soil redistribution rates from ^{137}Cs measurements. *J. Environ. Qual.*, 28 : 611-622.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel technique du CNESTEN et de l'IRDA pour leur implication lors des échantillonnages et des analyses de radioéléments. Ce projet a été rendu possible grâce à la participation financière de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) et du réseau Érosion et GCES. Les auteurs expriment également leur gratitude à M. Claude Bernard (IAEA) pour ses précieux conseils.

UTILISATION DU ^{137}CS POUR ESTIMER LA PRODUCTION DE SÉDIMENTS D'ORIGINE AGRICOLE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT QUÉBEC (CANADA)

C. BERNARD*, L. MABIT et M.-R. LAVERDIÈRE*****

** Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada ; claude.bernard@mapaq.gouv.qc.ca*

*** Soil Science Unit, FAO/IAEA Agriculture and Biotechnology Laboratory, Seibersdorf, Autriche ; l.mabit@iaea.org*

**** Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec, Canada ; marc.laverdiere@irda.qc.ca*

Abstract

The Boyer River watershed (Québec, Canada) covers a territory of 217 km^2. Some 60% of it is under cultivation. The last two kilometers of the river bed were once used as a spawning area for an important Rainbow Smelt (Osmerus mordax) population. Following intensification of agricultural activities, the fish population gradually declined and almost completely disappeared at the beginning of the 1980's. Eutrophication, linked to increasing concentrations of nutrients, and transport of fine sediments from the basin are directly associated with this disappearance. Runoff and water erosion are thus seen as two major causes of the water quality degradation and non-point pollution problem.

The objectives of this study were to quantify the potential of soil and sediment loss from agricultural fields and to identify the areas at risk, from ^{137}Cs measurements. Using a Geographical Information Systems (GIS), the watershed was subdivided into six isosectors presenting specific soil/slope combinations. Representative fields from each isosector were sampled for ^{137}Cs. Using the GIS, the data for individual fields were extrapolated to isosectors and to the whole cultivated area of the watershed. Based in this approach, it was estimated that around 30% of the arable lands of the watershed experience erosion rates higher than 6 t ha^{-1} yr^{-1}, which is considered as a tolerable level for Canadian soils, and that 45% of the residual area presents an erosion rate close to that limit. The average sediment production at the edge of fields was estimated at 2.8 t ha^{-1} yr^{-1}, for an annual production of more than 60 000 t of material. Loamy soils with a slope higher than 2% were estimated to generate the highest sediment rate (6.9 t ha^{-1} yr^{-1}) and nearly 40% of the global sediment production. The screening of sensitive areas opens the door to corrective actions that are targeted and hopefully, more efficient in terms of environmental rehabilitation of the river ecosystem.

Keywords : *Quebec* ; *Spatialization* ; *Césium 137* ; *SIG* ; *Sensitive Areas*.

INTRODUCTION

La présente étude porte sur le bassin de la rivière Boyer, aux prises avec la quasi-disparition de l'importante population d'éperlans arc-en-ciel (*Osmerus mordax*) que la rivière supportait autrefois. Des études ont identifié une sédimentation excessive dans la frayère de l'éperlan comme la principale cause de la disparition de ce poisson. La question de l'érosion des sols et du transfert des sédiments érodés est donc au cœur de la problématique agro-environnementale du bassin (Laflamme *et al.*, 1997).

L'évaluation de la problématique de l'érosion et de la production de sédiments, à l'échelle du bassin versant, pose cependant de sérieux défis. Il est d'abord important de pouvoir estimer des taux d'érosion et d'émission de sédiments qui soient représentatifs des tendances à moyen et long terme, afin d'établir l'importance réelle du problème. D'autre part, dans l'optique de pouvoir identifier des pistes de solution à la problématique agro-environnementale, il est insuffisant de prédire un taux net d'exportation de sédiments à l'exutoire du bassin versant, sans pouvoir identifier les secteurs du bassin les plus susceptibles de générer ces charges. Dans ce contexte, le recours à des techniques conventionnelles de mesure d'érosion et d'exportation de sédiments s'avère un exercice long et coûteux (Walling, 1994).

La mesure de la redistribution spatiale du ^{137}Cs offre une approche intéressante, rapide et économiquement abordable pour de telles études. Les retombées de ^{137}Cs, provenant des essais atomiques en haute atmosphère, ont culminé en 1963 et ont touché l'ensemble de la surface terrestre. L'accident de Tchernobyl, en 1986, a introduit de nouvelles quantités de radiocésium, mais de façon plus localisée (Anspaugh *et al.*, 1988). Étant fortement retenu par le sol, la redistribution spatiale de ce radioisotope nous renseigne de façon fiable sur les mouvements de sol en cours depuis 1963 (Ritchie et McHenry, 1990). Les mesures de ^{137}Cs permettent en outre de quantifier les taux d'érosion, de redéposition et d'exportation nette et de localiser les superficies en cause, rendant ainsi possible des bilans massiques portant sur plus de 40 ans (Mabit *et al.*, 2002).

Jusqu'ici, les études basées sur la mesure du ^{137}Cs ont concerné des superficies ne dépassant guère quelques hectares. Dans ce contexte, une stratégie d'échantillonnage des sols basée sur une grille plus ou moins régulière convient parfaitement (Pennock et Appleby, 2002). L'étude d'un bassin tel que celui de la rivière Boyer (217 km^2) nécessite une approche différente. Il convient alors de subdiviser le bassin en classes présentant une combinaison unique de facteurs prédisposant à l'érosion (sols, topographie, utilisation et gestion des sols), puis de sélectionner aléatoirement des unités (champs) à l'intérieur de ces classes et de les échantillonner de façon classique. Les résultats obtenus pour ces unités peuvent alors être extrapolées aux classes entières. Poursuivant l'agrégation des résultats, on en vient à une estimation pour l'ensemble du bassin (Mabit *et al.*, 2007).

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La rivière Boyer draine un territoire de 217 km^2, sur la rive droite du Saint-Laurent. Son embouchure avec le Saint-Laurent se situe à environ 30 km à l'Est de Québec (fig. 1 ci-dessous). Le bassin se subdivise en quatre sous-bassins principaux : Boyer (74 km^2), Portage (21 km^2), Boyer-Nord (55 km^2) et Boyer-Sud (67 km^2). Le climat est de type continental humide, avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 1 100 mm et une saison de croissance de 120 à 150 jours. La topographie du bassin est complexe et la dénivelée totale atteint 300 m. La texture des sols varie de limon argileux à limon sableux. L'agriculture occupe environ 60 % de la superficie totale du basin versant. La production laitière, caractérisée par la présence de pâturages, et la production d'herbages dominent dans la moitié aval du bassin. La partie amont présente, au contraire, une agriculture plus intensive, faisant une plus large place aux cultures annuelles (céréales, maïs).

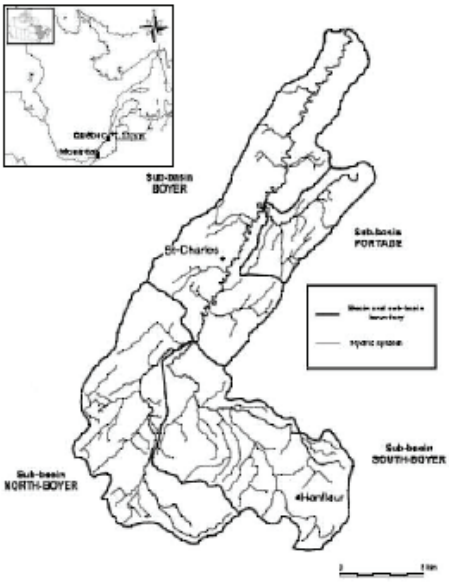


Fig. 1. Bassin de la rivière Boyer

L'intégration de divers éléments d'information dans un système d'information géographique a conduit à la division du bassin versant en isosecteurs présentant des caractéristiques différentes. Six isosecteurs ont été définis (fig. 2), soit cinq isosecteurs en zone cultivée et présentant une combinaison sol-pente spécifique et un isosecteur sous couvert forestier. On a retenu un isosecteur forestier pour deux raisons principales :

- les forêts couvrent quelque 40 % de la superficie du bassin versant ;
- il a été assumé que l'érosion des sols et la production nette de sédiments en provenance des zones forestières sont nulles ou non significatives ;

cette assomption constitue d'ailleurs une hypothèse de base de l'utilisation du ^{137}Cs comme indicateur de mouvement de sol.

Quatorze sites sous couvert forestier et répartis sur l'ensemble du basin versant ont été échantillonnés, afin d'établir le niveau résiduel des retombées de ^{137}Cs (fig. 2). Cette valeur sert de point de comparaison pour identifier les zones d'érosion ou de redéposition et pour quantifier ces deux processus.

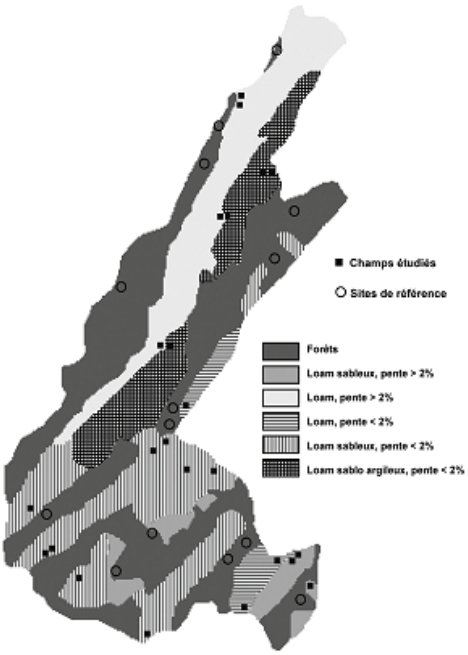


Fig. 2. Isosecteurs et localisation des sites échantillonnés

Dans chacun des cinq isosecteurs sous production agricole, un minimum de trois champs représentatifs ont été sélectionnés aléatoirement. Chacun de ces champs fut échantillonné suivant une grille à maille variable, adaptée à la microtopographie, afin d'y établir un bilan de ^{137}Cs. 24 champs ont ainsi été étudiés de façon détaillée, nécessitant l'échantillonnage de plus de 410 points de prélèvement.

L'activité du sol en ^{137}Cs a été mesurée selon la procédure établie par de Jong *et al.* (1982). L'activité spécifique (Bq m^{-2}) des sols en production agricole a été comparée à celle des sites forestiers, afin d'identifier les secteurs de perte nette et ceux ayant subi une accumulation nette de sol. L'interprétation des variations des inventaires de ^{137}Cs en termes de mouvements de sol a été faite en utilisant le modèle *Simplified Mass Balance* de Walling *et al.* (2002). À l'aide du logiciel *SURFER 8* (Golden Software, 2002), les données ponctuelles ont été spatialisées sur la surface totale des champs. Un bilan des déplacements de sol (érosion brute, déposition, perte nette de sédiments) a pu ainsi être calculé pour chacun des 24 champs étudiés de façon détaillée.

2. RÉSULTATS

L'activité en ^{137}Cs des 14 sites forestiers a varié de 1 620 à 3 700 Bq m^{-2}, pour une valeur moyenne de 2 780 ± 300 Bq m^{-2} (moyenne ± intervalle de confiance à 95 %) et un coefficient de variation de 21 %.

Des 412 points d'échantillonnage en zone cultivée, 302 se sont avérés avoir subi une perte nette de sol, de 9 t ha^{-1} an^{-1} en moyenne. Les 110 autres points ont subi un dépot net de sol, à un taux moyen de 6,4 t ha^{-1} an^{-1}.

Un bilan de sédiments a été calculé pour chacun des 24 champs étudiés. La production nette de sédiments, estimée à partir des mesures de ^{137}Cs, a varié de 0,1 t ha^{-1} an^{-1} à 12,9 t ha^{-1} an^{-1} pour une valeur moyenne de 5,2 t ha^{-1} an^{-1} (Mabit *et al.* 2007).

L'intensité du système de production a eu une influence majeure sur les pertes de sol et la production de sédiments, comme le démontrent les résultats du tableau 1. Sous les systèmes intensifs, comportant de courtes rotations et un retour fréquent des cultures annuelles, l'érosion des sols est plus fréquente et plus intense, se traduisant par une production de sédiments plus importante. À l'inverse, sous les systèmes moins intensifs, caractérisés par de longues rotations basées sur les herbages, les pertes de sol sont largement compensées par une redéposition importante du matériel érodé. La production nette de sédiments est alors fortement réduite (tab. 1).

Tab. 1. Impact de la texture du sol et du système cultural sur la production de sédiments à l'échelle du champ

Facteur		Production de sédiments (t ha^{-1} an^{-1})
Texture	Système cultural	
Limon sableux	Non intensif	2,7
Limon sableux	Intensif	6,1
Limon	Non intensif	2,8
Limon	Intensif	6,4
Limon sablo-argileux	Non intensif	1,1
Limon sablo-argileux	Intensif	11,9

L'intégration des résultats par isosecteur a révélé que les sols limoneux, avec une pente supérieure à 2 %, ont généré les plus forts taux de production nette de sédiments avec 6,9 t ha^{-1} an^{-1}. Les plus faibles taux ont été enregistrés pour les sols sablo-argileux, avec 2,7 t ha^{-1} an^{-1} en moyenne (tab. 2, ci-dessous). Près de 40 % de la production de sédiments des champs agricoles est estimée provenir du premier groupe, en raison du taux élevé de perte nette de sol et la fraction importante de la superficie du bassin versant occupée par cet isosecteur. Les limons sableux sur pente supérieure à 2 % ont affiché le deuxième taux de

production de sédiments le plus élevé. Cependant, en raison de sa faible superficie, cet isosecteur n'a contribué qu'à 9 % de la production de sédiments en provenance des champs cultivés (tab. 2).

Tab. 2. Production nette de sédiments des champs, par isosecteur

Texture	Pente (%)	Superficie de l'isosecteur (ha)	Sédiments produits par les champs échantillonnés (t ha^{-1} an^{-1})	Sédiments produits par isosecteur	
				t an^{-1}	%
Limon sableux	> 2	1070	5,5	5 489	9,0
Limon sableux	< 2	4 610	5,0	22 245	36,6
Limon	> 2	3 310	6,9	23 508	38,7
Limon	< 2	700	3,6	2 498	4,1
Limon sablo-argileux	< 2	2 580	2,7	7 031	11,6
Total		12 270		60 771	100

À l'aide du SIG, une production moyenne de sédiments a pu être calculée pour chacun des quatre sous-bassins de la rivière Boyer. Le sous-bassin Boyer a présenté le plus fort taux avec 3,6 t ha^{-1} an^{-1}, et le sous-bassin Portage, le plus faible, avec moins de 1 t ha^{-1} an^{-1}. Les résultats du tableau 3 (ci-dessous) montrent qu'une relation étroite existe entre l'intensité de l'usage du sol et la production nette moyenne de sédiments, à l'échelle du sous-bassin. L'intégration des données à l'ensemble du bassin versant de la rivière Boyer conduit à une production estimée de près de 61 000 tonnes de sédiments à la bordure des champs (tab. 2). Cette valeur représente une production moyenne de 2,8 t ha^{-1} an^{-1} en moyenne (Mabit *et al.*, 2004).

Tab. 3. Variation par sous-bassin de la production nette de sédiments des champs

	Sous-bassin			
	Boyer	Portage	Boyer Nord	Boyer Sud
Production nette de sédiments (t ha^{-1} an^{-1})	3,6	0,8	2,3	2,2
Indice de vulnérabilité[¶]	0,20	0,03	0,15	0,19

[¶]% cultures érosives / (% herbages + % forêts)

Malheureusement, la teneur de l'eau en matières en suspension n'est pas suivie sur une base routinière dans le basin de la rivière Boyer, ce qui permettrait une comparaison entre les estimations de cette étude et les charges réelles. Cependant, Gangbazo *et al.* (2002) ont rapporté des mesures pour le sous-bassin

Boyer-Nord. En 1998 et 1999, ils ont mesuré des exportations de matières en suspension de 0,6 et 0,5 t ha^{-1} an^{-1} respectivement. Dans la cadre de cette étude, nous avons estimé une production moyenne de 2,3 t ha^{-1} an^{-1} à la limite des champs (tab. 3). Ces deux valeurs sont compatibles, considérant que :

- elles couvrent des échelles de temps différentes, soit deux ans pour les mesures réelles et plus de quarante ans pour les estimations basées sur les mesures de ^{137}Cs ;
- en 1998 et 1999, les précipitations des mois d'avril et de mai ont été très inférieures à la normale ; or, comme ces mois sont généralement très actifs du point de vue hydrologique, on peut supposer que les exportations de matières en suspension ont aussi été inférieures à la normale au cours de ces deux années ;
- il est vraisemblable que la production nette de sédiments à l'exutoire du sous-bassin soit inférieure à la production totale, une fraction des sédiments redéposant en cours de route.

D'autre part, ces 61 000 tonnes de matériaux érodés n'atteignent manifestement pas intégralement la frayère d'éperlans arc-en-ciel. De nombreuses occasions de déposition et de stockage plus ou moins permanent existent tout au long du réseau hydrographique ainsi que dans les plaines de débordement. De plus, certains champs ne possèdent pas de connexion hydrologique directe avec le réseau hydrographique. La contribution de tels champs au bilan sédimentaire global est donc nulle.

Enfin, des sources autres que les champs contribuent à la production de sédiments dans la rivière. Une étude préliminaire, comparant la composition de sédiments de la frayère à celle de diverses sources potentielles, avait ainsi permis d'estimer qu'environ 75 % des sédiments déposés dans la frayère proviennent des champs cultivés, et 25 % de l'érosion des berges des cours d'eau (Bernard et Laverdière 2000).

CONCLUSION

Cette étude démontre qu'il est possible, avec une stratégie d'échantillonnage élaborée à l'aide d'un SIG, d'utiliser des mesures de ^{137}Cs pour l'étude d'une problématique agroenvironnementale complexe à l'échelle d'un bassin versant couvrant plus de 200 km^2. À partir de bilans établis à l'échelle de champs cultivés représentatifs, une estimation de la production nette de sédiments a pu être réalisée par secteur, par sous-bassin et, enfin, pour le bassin complet de la rivière Boyer. Les mesures à l'échelle du champ ont fait ressortir l'impact de certains facteurs (texture du sol, pente, intensité de l'utilisation agricole) sur les taux d'érosion brute et nette.

Les résultats de cette étude aideront les gestionnaires du territoire à identifier plus précisément les sources de sédiments colmatant la frayère d'éperlans arc-en-ciel de la rivière Boyer. Il leur sera ainsi plus aisé de préciser là où des mesures de conservation doivent être mises en place, ainsi que la nature de ces mesures, afin de réduire cette problématique agro-environnementale.

Références bibliographiques

ANSPAUGH L. R., CATLIN R. J., GOLDMAN M., 1988. The global impact of the Chernobyl reactor accident. *Science*: 1513-1519.

BERNARD C., LAVERDIÈRE M. R., 2000. Using ^{137}Cs as a tool for the assessment and the management of erosion/sedimentation risks in view of the restoration of the Rainbow Smelt (*Osmerus mordax*) fish population in the Boyer River basin (Québec). *Acta Geol. Hispan.* 35, 3-4 : 321-327.

DE JONG E., VILLARD H., BETTANY J. R., 1982. Preliminary investigations on the use of ^{137}Cs to estimate erosion in Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci*. 62:673-683.

GANGBAZO G., CLUIS D., BUON E., 2002. Transport des sédiments en suspension et du phosphore dans un bassin versant agricole. *Vecteur Environnement* 35 : 44-53.

Golden Software. 2002. Surfer 8. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. User's Guide. Golden Software, Inc. 640 pp.

LAFLAMME D., PICHÉ I., MICHAUD A., BÉDARD, Y., TRENCIA, G., LAROCHE, R., CHAMPAGNE L., GOUIN J.-M., 1997. *Situation environnementale du bassin de la rivière Boyer*. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture, Saint-Laurent Vison 2000, Groupe d'intervention de la rivière Boyer, Québec.

MABIT L., BERNARD C., LAVERDIERE M. R., 2007. Assessment of erosion in the Boyer River watershed (Canada) using a GIS oriented sampling strategy and ^{137}Cs measurements. *Catena* 71:242-249.

MABIT L., DUCHEMIN M., LAVERDIERE M. R., BERNARD C., 2004. Quantification de l'érosion hydrique et étude de l'origine des sédiments colmatant la frayère de la rivière Boyer (Québec). *Vecteur environnement*, 37:80-89.

MABIT L., BERNARD C., LAVERDIÈRE M. R., 2002. Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data. *Can. J. Soil Sci.* 82:423-431.

PENNOCK D.J., APPLEBY P.G., 2002. Site selection and sampling design. 15-40, in: F. Zapata (ed). *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, Netherlands.

RITCHIE J. C., MCHENRY J. R., 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: *A review. J. Environ. Qual.* 19:215-233.

WALLING D. E., 1994. Measuring sediment yield from river basins, pp. 39-80 in R. Lal (ed). Soil erosion research methods. *Soil and Water Conservation Society*, Ankeny, Iowa.

WALLING D. E., HE Q., APPLEBY P. G., 2002. Conversion models for use in soil-erosion, soil redistribution and sedimentation investigations. 111-164 in: F. Zapata (ed). *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, Netherlands.

LES MOUVEMENTS DE MASSE ET LEUR SIGNIFICATION GÉOMORPHOLOGIQUE AU TIGRÉ, ÉTHIOPIE

J. MOEYERSONS*, J. NYSSEN/***, J. POESEN****, J. DECKERS***, M. HAILE**, J. VAN DE WAUW*** et J. HOFMEISTER*****

** Musée royal de l'Afrique centrale, B-3080 Tervuren, Belgique ; jan.moeyersons@africamuseum.be*
*** Mekele University, PO Box 231, Mekele ; Ethiopia jan@ethionet.et*
**** Institute for Land and Water Management, K.U. Leuven, Celestijnenlaan 200 E – B-3001 Heverlee, Belgium ; Seppe.Deckers@biw.kuleuven.be*
***** Physical and Regional Geography Research Group, K.U. Leuven, Celestijnenlaan 200 E – B-3001 Heverlee, Belgium ; Jean.Poesen@geo.kuleuven.be*
****** University of Marburg, Germany, Dept. of Geographie ; Kontakt@johof.de*

Abstract

Geomorphological mapping of the 400 km² region of Hagere Selam (Tigray, Ethiopia) shows the presence of a high number of Late-Pleistocene to present-day landslides and other mass movements. The following processes can be distinguished: the sandstone cliffs on the edge of the table mountains retreat at a rate of 3.7 cm/century as a result of rockfall, rock slide and rock flow; the deposits of swelling clays on the plateau undergo accelerated creep rates of more than 20 cm/year in the vicinity of a free face; these swelling clays did also undergo in the past rapid surges and sled, rolled and tumbled over the cliffs to form extensive flow lobes in the escarpment valleys or in the piedmont plains; some landslides have also been mapped on the lower slopes on limestones. Mass movements occur at impervious levels with shale inclusions. Landslide lobes occupy about 10% of the total surface of the study area and the swelling clays are more fertile than the soils on limestone. All land use changes which improve the water infiltration capacity of dormant landslides, should be followed up.

Keywords : *Ethiopia* ; *Mass Movements* ; *Creeping* ; *Remote Sensing*.

INTRODUCTION

Des recherches géomorphologiques montrent que 10 % de la surface de la région étudiée est occupée par des glissements de terrain, dormants ou actifs. La région étudiée consiste en un rectangle de 400 km², centré sur le village de Hagere Selam, 40 km à l'ouest de Mekelle, Tigré. La région comprend les montagnes tabulaires de Hagere Selam, Damaryam, Mikaël Abiy, Guyeha, Tsili, Medayk, ainsi que la montagne de Imba Degoa, un *dyke*, essentiellement composé de dolérites, qui s'élèvent dans la zone de partage des eaux entre les bassins de la Geba et de la Werei, dans la partie occidentale du plateau de Mekelle. La géologie comprend

une succession de strates subhorizontales, assez intensément fracturées, de calcaires d'Antalo. Ces calcaires, d'âge jurassique, ont une puissance de ± 450 m dans la région et sont tronqués au sommet par une surface d'aplanissement érosive, surmonté du grès de Amba Aradam. Deux séries de roches basaltiques, séparées par des inclusions lacustres silicifiées, tous datant du Tertiaire, recouvrent la succession.

La partie inférieure des montagnes tabulaires est composée des calcaires d'Antalo. La corniche des reliefs tabulaires est généralement constituée des grès d'Amba Aradam, sur lesquels reposent les assises tertiaires.

Depuis le Miocène, la région a connu un soulèvement tectonique, qui se fait chiffrer dans la région de Hagere Selam de l'ordre de 2000 m. Ceci a pour conséquence une forte incision des rivières avec formation de vallées du type canyon. Cette incision a certainement engendré les mouvements de masse et les glissements de terrain en particulier

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. La région étudiée

La région se situe à une altitude qui varie entre 2600 m et 1800 m et jouit d'un climat d'altitude, avec des températures moyennes modérées autour des 20° C sur les plateaux. La précipitation annuelle à long terme est de 770 m. Les pluies se concentrent essentiellement dans les mois juin à septembre, le reste de l'année étant quasiment sec.

Les basaltes portent des toposéquences de (luvisol-) regosol-cambisol-vertisol, et les altérations des calcaires ont mené au développement de calcaric regosols, cambisols et calcisols.

1.2. Méthodes de travail

La cartographie géomorphologique est basée sur des observations de terrain, complétées par un examen stéréoscopique de photos aériennes et d'interprétations d'images satellitaires ETM. La cartographie est faite dans l'environnement SIG de Mapinfo Professional 8.5.

En laboratoire, des essais de rupture d'échantillons ont été faits dans un appareil de cisaillement mono-axial, complétés d'analyses granulométriques.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Types de mouvements de masse

Les observations de terrain dans la région de Hagere Selam montrent l'existence de quatre types de mouvements de masse :

- les déplacements de masses rocheuses à partir des flancs raides des collines. Les chutes de pierres, éboulis, éboulements sont parmi les plus fréquents. Des mesures sur le terrain montrent que ce type de transport de

masse, qui affecte surtout aussi les corniches, intervient pour un recul de ces dernières de 3,7 cm par siècle (Nyssen *et al.*, 2006) ;

- des mouvements lents et des reptations accélérées, affectant les argiles gonflantes, produit d'altération des basaltes. Ces mouvements se restreignent dans la plupart des cas aux mouvements sur les plateaux et les cols. La reptation par argilloturbation a été mesurée à proximité d'une nouvelle ravine près d'Enda Maryam. Dans ce cas, le mouvement en direction de la ravine est de plus de 20 cm an^{-1} (Moeyersons *et al.*, 2006) ;

Photo 1. Glissement *May Ntebteb'*

- les grands écoulements de débris : il s'agit d'avancées soudaines de grandes masses d'argiles gonflantes qui mènent à un débordement du plateau. Parfois, les débordements sont restreints aux vallées existantes sur les escarpements. Ces vallées sont alors occupées par une langue ou lobe allongé. Un exemple est le *May Ntebteb*, écoulement de débris (photo 1, page précédente). Il s'est probablement installé il y a 75 ans (Nyssen *et al.*, 2002), mais il connaît encore actuellement des reptations de l'ordre de plusieurs centimètres par an. Parfois aussi, on rencontre des avancées qui étaient tellement volumineuses et/ou tellement soudaines qu'une grande masse d'argiles et de débris se sont déplacés en avant sur un front très large et sont passés au-dessus de la corniche en cascade, pour continuer à couler vers la plaine (photo 2, ci-dessous). Dans certains cas, ces coulées énormes ont emporté des parties de corniche ;

- les écoulements de débris qui reposent sur des intercalations imperméables de schistes et marnes à l'intérieur des calcaires de la série d'Antalo.

Photo 2. Écoulement de débris, Medayk

2.2. La prévention de glissements et d'écoulements

La plupart des grandes loupes de glissements sont composées d'argiles gonflantes, qui sont plus fertiles que les calcaires sur lesquels elles reposent. Or les actions de GCES qui se réalisent actuellement sur le terrain, notamment les murets, les seuils empierrées, la mise en défens, les réservoirs, entraînent une hausse de la nappe aquifère. Or on connaît deux cas où une remobilisation partielle d'un ancien glissement s'est produite quelques ans après la mise en défens du terrain (Nyssen *et al.*, 2002). On craint également des remobilisations dans les loupes d'argiles gonflantes une fois que le terrain est aménagé en murets. Il faut donc être vigilant : une surveillance des conditions de saturation du sol en profondeur s'impose en cas de GCES sur des surfaces étendues. Une bonne mesure à mentionner est l'introduction de *horroyos*, des petits réservoirs à fond imperméabilisé.

CONCLUSIONS

Les mouvements de masse, décrits ici sont actifs depuis le Pléistocène tardif jusqu'à nos jours (Nyssen *et al.*, 2002). La cartographie montre leur densité et leur grand nombre. Les mouvements de masse sont donc considérés comme un facteur géomorphologique important.

Étant donné que les glissements de terrain d'aujourd'hui sont très souvent des réactivations partielles de mouvements anciens, une carte qui donne la distribution de ces anciens lobes de glissement est, en quelque sorte, une carte du risque de glissement. Il est à craindre que ce risque devienne encore plus grand dans l'avenir. Dans le cadre du changement climatique global, les prévisions pour l'Éthiopie (Hulme *et al.*, 2001) sont telles que l'on peut s'attendre à une augmentation en intensité et fréquence des instabilités de terrain.

Références bibliographiques

HULME M., DOHERTY R., NGARA T., NEW M., LISTER D., 2001. African climate change: 1900-2100. *Climate Research*, 17:145-168

MOEYERSONS J., NYSSEN J., POESEN J., DECKERS J., MITIKU HAILE, 2006. On the origin of rock fragment mulches on Vertisols: a case study from the Ethiopian Highlands. *Geomorphology*, 76, 3-4: 411-429.

NYSSEN J., MOEYERSONS J., POESEN J., DECKERS J., MITIKU HAILE, 2002. The environmental significance of the remobilization of ancient mass movements in the Atbara-Tekeze headwaters, Northern Ethiopia. *Geomorphology*, 49, 3-4 : 303-322.

NYSSEN J., POESEN J., MOEYERSONS J., DECKERS J., MITIKU HAILE, 2006. Processes and rates of rock fragment displacement on cliffs and scree slopes in an *amba* landscape, Ethiopia. *Geomorphology*, 81: 265-275.

La problématique de l'érosion et de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols est importante depuis des siècles en milieux semi-arides, et plus encore de nos jours où la population n'a jamais été aussi dense et où on commence à observer l'influence du réchauffement climatique. Suite au défrichement du milieu naturel, les systèmes de culture ou d'élevage ont entrainé la disparition de l'humus, la dégradation de la capacité d'infiltration et de stockage des eaux de pluie entrainant la diminution de la productivité des sols, l'augmentation du ruissellement, l'inondation des plaines, le dessèchement rapide des nappes et des rivières et l'envasement des barrages. Nombreux sont déjà les pays semi-arides qui manquent d'eau pour le développement de l'irrigation et des industries et même pour les besoins des populations. La question se pose donc d'évaluer l'efficacité des aménagements très importants consentis depuis un demi-siècle pour lutter contre l'érosion et améliorer la gestion des ressources en eau, en biomasse et en sol fertile. Pourquoi malgré des centaines de programmes de lutte antiérosive (LAE) la dégradation des sols et des systèmes hydriques s'accélère tandis que les eaux font défaut de plus en plus tôt après la fin de la saison des pluies ?

Ce document réunit une sélection de 55 communications présentées au congrès ISCO qui s'est tenu à Marrakech du 15 au 19 mai 2006 et en particulier la session du 17 mai organisée par le réseau E-GCES de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) avec la coopération de l'IRD, des ambassades de France et de Belgique et divers organismes marocains.

Ce volume contient d'abord 5 articles de synthèse sur l'évolution des techniques de lutte antiérosive, les facteurs de spatialisation au Maroc et les aspects économiques de la lutte antiérosive (LAE). Le chapitre 2 est consacré à l'impact des aménagements hydrauliques sur la gestion des eaux de surface sur les versants et petits bassins versants (7 communications). Le chapitre 3 présente 12 communications sur l'usage de la biomasse pour assurer la restauration de la fertilité des sols. Le chapitre 4 présente les relations entre les techniques de LAE traditionnelles ou modernes (15 communications) et la gestion de l'eau et des sols. Enfin le chapitre 5 (16 communications) aborde les divers processus d'érosion et le choix d'indicateurs pour évaluer leur importance dans l'espace. Des mesures de terrain restent indispensables pour valider les modèles en présence.

Ce document intéressera les chercheurs, enseignants, étudiants et techniciens des disciplines concernant l'environnement ainsi que les ingénieurs et ONG responsables du développement rural durable.

---

*Dr **Eric Roose**, agropédologue, directeur de recherche émérite de l'IRD, membre fondateur du directoire de l'ISCO. Il est coordonnateur du réseau Érosion et GCES de l'AUF.*

*Dr **Jean Albergel**, hydrologue, directeur de recherche et représentant de l'IRD au Kenya. Il est animateur du thème qualité des eaux du réseau E-GCES de l'AUF.*

*Dr **Georges De Noni**, géographe physicien, directeur de recherche et directeur du centre IRD d'Île-de-France, à Bondy. Il est secrétaire scientifique du réseau E-GCES de l'AUF.*

*Prof. **Abdellah Laouina**, géographe, chercheur en géomorphologie, titulaire de la chaire Unesco-GN de l'université Mohammed V de Rabat. Il est le correspondant régional pour l'Afrique du Nord du réseau E-GCES de l'AUF.*

*Dr **Mohamed Sabir**, ingénieur forestier, professeur et directeur de l'École nationale forestière d'ingénieurs de Salé/Rabat, Maroc. Il a organisé le congrès ISCO en tant que président de l'ISCO et du réseau national GCES-Maroc*

Prix public : 48 euros

Prix préférentiel AUF - pays en développement : 20 euros HT

ISBN : 978-2-914610-76-6

9 782914 610766

éditions des archives contemporaines

AGENCE UNIVERSITAIRE DE LA FRANCOPHONIE