

Actes des Journées scientifiques
du réseau de chercheurs
Érosion et GCES

**ÉROSION ET
GESTION
CONSERVATOIRE DE
L'EAU ET DE LA
FERTILITÉ DES SOLS**

Sous la direction de :

**Simone Ratsivalaka
Georges Serpantié
Georges De Noni
Éric Roose**



Éditions scientifiques GB

as

actualité scientifique



Agence universitaire de la Francophonie

**ÉROSION
ET GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU
ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS**



Université d'Antananarivo



Agence universitaire de la Francophonie

ÉROSION ET GESTION CONSERVATOIRE DE L' EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS

ACTES
DES JOURNEES SCIENTIFIQUES
DU RÉSEAU ÉROSION ET GCES DE L'AUF
ANTANANARIVO (MADAGASCAR) , DU 25 AU 27 OCTOBRE 2005

Sous la direction de

Simone RATSIVALAKA
Georges SERPANTIÉ
Georges DE NONI
Éric ROOSE

Copyright© 2006 Contemporary Publishing International (C.P.I). Publié sous licence par les Éditions scientifiques GB 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 scientifiques GB
41, rue Barrault
75013 Paris
France

ISBN : 2-84703-032-8

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, a été souvent conservée.

Le réseau Érosion francophone

1. 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 terminé une première carte de la 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 irréversible 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 sahéniennes et méditerranéennes vont manquer d'eau pour faire face aux besoins élémentaires d'une population en pleine croissance.

2. Le réseau Érosion francophone a vingt ans.

Devant l'urgence des problèmes de durabilité des systèmes de production en milieu tropical et tempéré, l'IRD (ex-ORSTOM), avec l'aide de la Coopération française et de quelques partenaires (CTA, OSS, GTZ, ENFI) 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 à 600 pages, 3 *Cahiers ORSTOM Pédologie* et un *ORSTOM Actualités*, participé à diverses revues dont *Sécheresse* (numéro spécial *Érosion*, 2004, vol. XV, n° 1) et *Agricultures*. L'ensemble de cette base documentaire francophone est maintenant disponible sur le site internet de l'IRD (www.bondy.ird.fr/pleins_textes/index.htm).

3. Le nouveau réseau Érosion et 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 des quatre continents :

- * Méthodologie : estimer à l'aide d'indicateurs les risques des divers *processus* d'érosion dans l'espace ;

- * Aspects socioéconomiques des problèmes d'érosion et de gestion durable des ressources ;

- *Amélioration des stratégies traditionnelles ou modernes de gestion durable des terres en pente ;
- *Amélioration de la gestion des eaux et de leur qualité ;
- *Restauration de la productivité des terres et de la biodiversité.

Le nouveau réseau a repris les objectifs du réseau Érosion 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) ;

- *Favoriser la coopération entre les laboratoires universitaires et les centres de recherche francophones ;

- *Diffuser les résultats originaux au travers de 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 *Agricultures*.

Le réseau Érosion et GCES organise des journées scientifiques tous les deux ans (les premières ont eu lieu à Antananarivo (Madagascar) du 24 au 28 octobre 2005 et les suivantes, à Marrakech (Maroc), en mai 2006 durant le congrès ISCO), publiera un bulletin avec comité de lecture, participera activement aux revues existantes au sein de l'AUF. Il préparera des ouvrages sur l'état de l'art des problèmes abordés dans ce réseau et participera à la sélection des meilleurs chercheurs qui bénéficieront de bourses de stages de courte durée pour la rédaction d'articles. Le nouveau réseau bénéficiera largement de l'expérience du réseau antérieur. Une nouvelle structure et une dynamique vont se développer avec les moyens et l'esprit de l'AUF et un fort souci d'échange d'experts francophones ouverts sur les problèmes internationaux.

Pour plus d'informations contacter :

Éric Roose, coordonnateur du réseau
 ou Georges De Noni, secrétaire scientifique du réseau
 Centre IRD
 BP 64501
 34394 Montpellier Cedex 5
 Tél. : 33.(0)4 67 41 62 65
 Fax : 33 (0)4 67 41 62 94
 Courriel : roose@mpl.ird.fr -ou -denoni@mpl.ird.fr,

ou encore :

AUF
 4 place de la Sorbonne
 75005 Paris
 Courriel : khalef.boukroune@auf.org
 ou *pascale.sartori@auf.org

Document constitutif du réseau Érosion et Gestion conservatoire des eaux et des Sols (GCES) de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF)

Avertissement

Lors de la réunion préparatoire du 16 juillet 2003 organisée par l'AUF, la question de savoir quel lien potentiel existait entre le réseau Télédétection et le réseau Érosion et GCES en cours de création, a été discutée en profondeur. Il est apparu très rapidement qu'il s'agit de domaines d'activités scientifiques et techniques totalement différentes, la télédétection n'étant qu'un des outils permettant la spatialisation de certains phénomènes érosifs aux échelles régionales et continentales.

Les deux réseaux peuvent travailler en synergie particulièrement dans les régions à faible pluviométrie où la végétation n'empêche pas la vision d'états de surfaces et des formes d'érosion et sur le thème de la répartition spatiale de l'occupation des sols.

Lors de la réunion du 19 et 20 avril 2004, il nous a été signalé le projet de lancement d'un nouveau réseau concerné par l'eau et l'environnement avec lesquels nous aurons à coopérer : nous avons tenu compte de ces projets pour mieux circonscrire notre espace de compétence.

1. Justificatifs de la création d'un réseau Érosion et GCES

1.1 L'érosion, un défi agronomique, environnemental et socioéconomique pour la gestion de deux ressources fondamentales pour le développement durable : la terre et l'eau

L'érosion est un phénomène naturel, somme de trois *processus* : arrachement, transport et sédimentation sous l'effet de l'énergie du vent, de la pluie, du ruissellement et de la pesanteur. L'accélération de ces *processus* par les activités humaines est un problème majeur du développement durable, tant au Sud qu'au Nord. Il concerne tout à la fois les problèmes de gestion des ressources en terres et en eau. En effet d'ici 2020 la surface des sols cultivés dégradé va probablement s'étendre de cent cinquante millions d'hectares et une trentaine de pays de la zone semi-aride va connaître un déficit hydrique important.

Ce phénomène accéléré par l'homme, provoque des conséquences très négatives au niveau du champ cultivé (dégradation des sols, diminution des stocks de carbone et de l'eau, perte des nutriments, baisse des rendements et au final destruction de la ressource sol) et à l'aval sur la pollution des eaux (matières en suspension et éléments nutritifs), la santé humaine (poussières), l'eutrophisation des eaux douces, l'envasement des réservoirs, la destruction des infrastructures et les

inondations, et à plus long terme sur les changements climatiques. Entre les deux, l'érosion entraîne le remodellement des versants affectés par le ravinement et les coulées boueuses. Cet appauvrissement général conduit également à la dégradation des conditions de vie du paysannat jusqu'à la migration des populations. Rappelons que l'altération d'un mètre de roche pour former un sol demande cent mille ans alors que la destruction par l'érosion de la couche cultivable se réalise souvent en moins de un à deux siècles.

Pour illustrer l'importance de ces problèmes de gestion conjointe de l'eau et des sols, qu'il nous suffise de rappeler les inondations catastrophiques tant en Europe (écoulements boueux de Sarno en Italie en 1998 et débordements du Rhin, de l'Ode et de l'Elbe en Allemagne en 2002) qu'au Sud de la France : la série des pluies diluviennes de Vaison-la-Romaine, Nîmes en 1988, l'Aude et la région de Limoux en 2001, l'Hérault et le Gard en 2002 qui ont causé la perte de dizaines de personnes et des dégâts économiques très élevés. Signalons enfin, les événements dramatiques du 10 novembre 2001 en Algérie qui ont provoqué 1 000 morts et 3 000 blessés dans le quartier de Bab-El-Oued à Alger, enseveli sous 4 mètres de boue.

1.2. La Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES)

Depuis des millénaires, l'homme s'est acharné à lutter contre les phénomènes érosifs. Dans un premier temps, il a mis au point des méthodes traditionnelles adaptées aux conditions écologiques et socioéconomiques : par exemple la culture itinérante lorsque les terres sont très abondantes ou bien les gradins méditerranéens dans les zones montagneuses où la pression démographique ou économique est importante. Suite à des crises économiques et environnementales, une série de stratégies modernes de petits équipements d'hydraulique a été développée en milieu rural : Restauration des terrains de montagne (RTM), Conservation de l'eau et des sols (CES) dans les plaines américaines et Défense et restauration des sols (DRS) dans le bassin méditerranéen. Il s'agit essentiellement de méthodes mécaniques imposées par l'administration sans concertation avec le milieu paysan, sans vraiment étudier l'efficacité, la rentabilité et l'acceptabilité de celles-ci par les populations.

Face aux échecs répétés, est apparue une nouvelle démarche en 1987 à l'atelier de Porto Rico : la Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES ou *Land husbandry* des anglophones) qui propose d'intensifier la production tout en protégeant le sol, la biodiversité et la qualité des eaux. Il est temps de passer de l'étude et de la cartographie des *processus* d'érosion et de dégradation des sols à l'étude des techniques aptes à augmenter les rendements tout en améliorant la gestion de l'eau, des sols, des nutriments et de la matière organique.

Enfin pour rappel, il existe déjà différentes associations internationales (WASWC, ESSC, ISCO, UISS, COST) qui s'intéressent essentiellement aux *processus* de dégradation des sols, à l'érosion et à la conservation des sols. En se focalisant sur la GCES, notre réseau ajoute une dimension originale et complémentaire. Au-delà des *processus* d'érosion, le réseau Érosion et GCES se propose de développer des

techniques de diagnostic et de gestion de l'eau et de la biomasse, de restauration de la biodiversité et d'amélioration de la productivité des sols. Ces techniques prennent en compte la variabilité des formes et de l'intensité des *processus*, selon le climat, les sols, les pratiques agricoles et les conditions socioéconomiques.

2. Objectifs

Il découle du chapitre précédent que le domaine d'actions de l'AUF concerne avant tout les collaborations entre les institutions du Nord et du Sud sur des problématiques du Sud. Les objectifs majeurs du réseau Érosion et GCES peuvent donc être présentés d'une manière synthétique mais néanmoins hiérarchisés comme suit :

- Aider au désenclavement des chercheurs, des laboratoires et des équipes de recherche isolées, en accélérant la diffusion et rendant plus accessible aux francophones l'information sur l'érosion et la GCES. Cet effort de désenclavement s'adresse en premier lieu aux chercheurs des pays francophones et peut concerner aussi les chercheurs s'exprimant en français mais n'appartenant pas à des pays francophones. Il peut aussi servir de cadre aux échanges entre chercheurs et développeurs dans le domaine de la GCES .

- Diffuser les résultats originaux des membres du réseau au travers de moyens d'audience internationale et des technologies modernes, en servant de catalyseur pour la publication d'articles ou de synthèses dans le domaine de la GCES.

- Associer des équipes de recherche, de formation et de développement intéressées par les multiples facettes de l'érosion et de la GCES afin de favoriser des partenariats multi-nationaux dans le cadre d'appels d'offre spécifiques.

- Servir de *pool* d'experts dans le domaine de la formation en matière de GCES et d'évaluation des projets de lutte antiérosive.

- Servir d'interface avec les autres réseaux internationaux œuvrant dans le même domaine.

- Développer au meilleur niveau certaines recherches (voir point 3) qui impliquent la coopération multilatérale en vue du développement durable,

- Promouvoir la mobilité et la formation des chercheurs en francophonie, en particulier pour la rédaction de leurs productions scientifiques.

En bref, l'objectif global est d'atteindre le plus rapidement possible le stade d'un réseau opérationnel, outil de référence aussi bien dans les pays francophones que dans les autres parties du monde pour répondre aux besoins réels en matière d'érosion des sols, de gestion durable de l'eau sur les versants et de GCES.

3. Thèmes de recherche du réseau EGES

À ce stade du développement du dossier, nous pensons que les thèmes de recherche suivants ont toute chance de constituer des préoccupations scientifiques

particulièrement stimulantes pour de nombreux chercheurs. Dans les thèmes que nous allons détailler ci-après, cinq rubriques nous semblent incontournables :

- **des aspects de méthodologie** : diagnostic rapide et définition d'indicateurs pertinents par des techniques simples, techniques de spatialisation des données et indicateurs de suivi-évaluation des projets d'aménagement ;
- **des aspects socioéconomiques de l'érosion et de la GCES** : coûts de l'érosion, perception par les intéressés et acceptabilité des techniques de la lutte antiérosive (pertes de fertilité, dégâts aval, pertes de rendements, main-d'œuvre, matériaux, entretien) ;
- **l'amélioration des stratégies** traditionnelles et modernes de GCES ;
- **la restauration de la productivité des sols et de la biodiversité** ;
- **la conservation des eaux et de leurs qualités.**

À titre indicatif, nous proposons quelques axes de recherche d'intérêt capital, notamment dans les pays de la Francophonie :

- développer des pratiques de GCES adaptées aux diverses conditions bio-physiques et humaines dans le paysage. Mettre au point une méthodologie pour évaluer le coût des méthodes antiérosives, leur efficacité et leur acceptabilité par les différentes couches de la société paysanne. Face à la diversité des *processus* d'érosion, proposer des pratiques de GCES adaptées aux diverses conditions bio-physiques et humaines ;
- développer des techniques de gestion de la biomasse favorisant le stockage de la matière organique des sols et l'amélioration de leurs propriétés physico-chimiques et biologiques. Le maintien d'un certain équilibre carboné apparaît comme une mesure importante de conservation des sols, en raison du rôle de la matière organique sur la structure du sol, sa résistance à l'érosion, le stockage des nutriments et la séquestration du carbone ;
- rechercher des techniques de gestion de l'eau sur les versants permettant de valoriser au mieux la quantité et la qualité de cette ressource. Les enjeux de la gestion de l'eau diffèrent grandement d'un climat à l'autre. Par exemple, dans les pays semi-arides, on aura tendance à capter le ruissellement et à l'infiltrer localement tandis que dans les pays humides, on cherchera plutôt à évacuer les excès soit par diversion (terrasses) soit par dissipation de l'énergie du ruissellement tout au long du versant (cordons de pierres, haies vives, structures perméables). Les pratiques de gestion de l'eau à promouvoir diffèrent donc grandement selon la situation écologique, selon les politiques régionales et selon la demande (allocation de l'eau aux paysans sur les versants, aux consommateurs urbains, aux grands projets d'irrigation des plaines ou aux industries) ;
- rechercher des techniques de diagnostic et de lutte contre la déflation et l'ensablement en zone aride et semi-aride;

– étudier la fertilisation organique et les compléments minéraux indispensables pour l'intensification de la production. Puisque aucune source organique de fertilité ne suffit à compenser les exportations intensives par les récoltes et les pertes par érosion et drainage, il faut jouer sur la complémentarité de diverses méthodes de gestion de la biomasse et des apports de nutriments minéraux pour valoriser les activités de GCES ;

– développer des outils, simples et rapides, d'évaluation des risques érosifs tenant compte des variabilités spatio-temporelles en vue de l'aide à la décision en matière de GCES. La lutte antiérosive requiert d'identifier les zones à hauts risques afin de classer les priorités d'interventions correctives. Par ailleurs, la lutte contre la pollution diffuse demande aussi l'évaluation de l'effet d'implantation des diverses pratiques antiérosives sur la réduction des émissions de polluants ;

– étudier la bio-disponibilité des polluants et des nutriments transportés par les sédiments érodés et l'impact des pratiques de GCES sur cette bio-disponibilité. La bio-disponibilité des polluants entraînés par le ruissellement et les sédiments érodés varie selon divers facteurs tels que : la nature du polluant, la texture du sol, l'intensité de l'érosion... Cette bio-disponibilité influence fortement le niveau d'impact réel de l'érosion sur les plans d'eau récepteurs (eutrophisation et minéraux lourds) ;

– étudier les interactions et les relais entre les *processus* d'érosion dans le paysage et les agrosystèmes par rapport à des objectifs de GCES. La gestion durable des sols exige en effet qu'on tienne compte des interactions entre les divers *processus* qui se manifestent tout au long du versant. En particulier en milieu semi-aride, on peut observer des relais entre l'érosion hydrique et l'érosion éolienne. En milieu humide, la lutte contre les inondations doit s'articuler autour de l'aménagement des canaux de drainage dans les vallées, mais surtout autour de l'amélioration de l'infiltration des pluies et de la rétention du ruissellement sur les versants.

– étudier l'impact des politiques agricoles et environnementales et des conditions socioéconomiques sur l'érosion et l'adoption des techniques de GCES.

4. Produits

Il existe de multiples retombées scientifiques et pratiques découlant de l'activité du réseau Érosion et GCES. Si les moyens mis à la disposition du réseau le permettent, nous envisageons dans l'immédiat les produits suivants :

- créer le site Web du réseau Érosion et GCES, à l'intérieur du site de l'AUF ;
- mettre sur le site du réseau la liste de ses membres, avec leurs domaines d'expertise. Il est évident que ne peuvent figurer sur le site que les membres qui en ont fait expressément la demande ;
- lancer sur le site du réseau un forum sur l'érosion et la GCES ;
- réaliser une lettre d'information électronique sur le Web de parution semestrielle, incluant l'annonce des activités des équipes et des congrès ainsi qu'une analyse bibliographique des ouvrages récents ;

– organiser des journées scientifiques tous les deux ans, avec parution des actes, en français, dans le bulletin du réseau Érosion et GCES et avec le support d'un Comité de lecture qui veillera, si nécessaire, à aider et à former les chercheurs à la rédaction scientifique de qualité ;

- Participer, au sein de l'AUF, aux revues scientifiques existantes ;
- préparer des ouvrages et manuels retraçant l'état de l'art dans les domaines scientifiques abordés par le réseau (voir thèmes et sous-thèmes) ;
- organiser des séminaires d'opportunité et des formations thématiques.

L'un des atouts majeurs pour le succès du réseau Érosion et GCES est de sélectionner parmi les meilleurs jeunes chercheurs ceux qui devraient bénéficier en priorité de l'octroi de bourses, qu'il s'agisse de stages de courte durée ou de bourses d'excellence dans le cadre de la mise en forme ou de la rédaction de thèse, notamment pour les thèses avec un encadrement en co-tutelle.

Le nouveau réseau Érosion et GCES bénéficie largement de l'expérience du réseau pré-existant de l'IRD. Une nouvelle structure et une nouvelle dynamique vont se développer dans l'esprit de l'AUF, c'est-à-dire avec un fort souci d'échanges d'experts francophones prenant en compte une ouverture internationale.

Le document préliminaire est le résultat d'un travail en équipe mené par Claude Bernard (claud.bernard@irda.qc.ca), Georges De Noni (denoni@mpl.ird.fr), Ha Pham Quang (pqha-nisf@hn.vnn.vn), Éric Roose (roose@mpl.ird.fr), Mohamed Sabir (sabirenfi@wanadoo.net.ma), German Trujillo (german_trujillo_yandun@hotmail.com).

Il a été discuté, amélioré et validé par 40 participants de 16 pays et 4 continents lors de la réunion du 19 et 20 avril 2004.

L'équipe remercie sincèrement MM. Joël Jallais, Khalef Boulkroune et François Blasco pour leurs encouragements et avis éclairés, ainsi que Pascale Sartori et l'équipe AUF qui a organisé la réunion préparatoire.

LE RÉSEAU EGES : ANIMATEURS DES THÈMES, SOUS-THÈMES ET REPRÉSENTANTS NATIONAUX

→ Membres du Comité de suivi du Réseau

Dr Pham Quang Ha, pédologue, (Vietnam) ; Dr Pr A. Laouina, géomorphologue, (Maroc) ; Dr D. Diallo, agro-pédologue, (Mali) ; Dr Pr Simone Ratsivalaka, géographe, (Madagascar) ; Dr Claude Bernard , agronome, (Québec) ; Dr German Trujillo, agro-économiste, planification, (Équateur) ; Dr Pr Dieter König, géographe-écologue, (Allemagne) ; Dr Éric Roose, agro-pédologue IRD, (France).

Éric Roose a été élu coordonnateur et Georges De Noni secrétaire scientifique.

→ animateurs de thèmes

1. Méthodologie de mesure, indicateurs spatio-temporels et diagnostic des processus ;

Animateurs : S. Pomel (Univ. Bordeaux), C. Biolders (Univ. Louvain), Ha Pham Quang (INF. Hanoi) et J. Moeyersons (Musée de Tervuren, Belgique) ;

2. Aspects socioéconomiques et politiques de la lutte antiérosive,

Animateurs : J. De Graaff (Univ. Wageningen), C. Reij (Univ. Amsterdam) et A. Morel (Univ. Grenoble) ;

3. Amélioration des stratégies traditionnelles et modernes de GCES

Animateurs : A. Laouina (Univ. Rabat), M. Boufaroua (CES Tunis), G. Trujillo (ministère Agriculture d'Équateur) ;

4. Restauration de la productivité des terres et de la biodiversité :

Animateurs : D. Klein (Cirad Montpellier), D. Koenig (Univ. Koblenz), T. Rishirumuhirwa (Agro. Bujumbura), R. Zougmore (INERA, Ouagadougou) ;

5. Conservation des eaux et de leurs qualités

Animateurs : J. Albergel (IRD, Montpellier), S. Wicherek (ENS St-Cloud) et B. Touaibia (ENSH, Algérie).

→ animateurs de sous-thèmes

Thème 1 / Méthodologie, diagnostic, indicateurs : S. Pomel

1.1. Traceurs bio-géochimiques et radio-isotopes : Sylvain Huon

1.2. Mouvements de masse, érosion aratoire : J. Moeyersons

1.3. Méthodes de mesure, géomatique : E. Delaitre ;

Thème 2. Aspects socioéconomiques et politiques de l'érosion : Jan De Graaff

2.1. Suivi-évaluation, étude d'impact :

2.2. Érosion urbaine : M. Tchotsoua

2.3. Perception paysanne de l'érosion : F. Bodnar

Thème 3. Amélioration des stratégies traditionnelles ou modernes : Mohamed Sabir

- 3.1. Diagnostic et lutte contre l'érosion éolienne : C. Biolders
- 3.2. Techniques culturales : A. Rakotondralambo
- 3.3. Stratégies traditionnelles en milieu méditerranéen : Sabir et Roose

Thème 4. Restauration de la productivité des terres : Robert Zougmore

- 4.1. Agroforesterie et restauration des sols : D. König
- 4.2. Restauration des parcours, légumineuses : D. Klein
- 4.3. Restauration de la biodiversité par la LAE : M. Diatta
- 4.4. Réhabilitation des terres très dégradées : C. Reij

Thème 5. Conservation des eaux : Jean Albergel

- 5.1. Retenues collinaires : M. Boufaroua
- 5.2. Qualité des eaux : C. Bernard
- 5.3. Allocation des eaux depuis le versant jusqu'au barrage : A. Morel et J. Albergel

→ Représentants nationaux

- Algérie (Arabi) ; Allemagne (König) ;
- Belgique (Moeyersons) ; Burkina Faso (Zougmore) ; Burundi (Rishirumuhirwa) ;
- Cameroun (Boli) ; Canada (Bernard)
- Équateur (Trujillo) ; Espagne (Pla Sentis) ; France (De Noni) ;
- Mali (Diallo) ;
- Madagascar (Rakotondralambo) ; Maroc (Sabir) ;
- Pays Bas (De Graaf) ;
- Pologne (Wicherek) ; Rwanda (Ngarambe) ;
- Suisse (Hurni) ; Sénégal (Diatta) ;
- Vietnam (Pham Quang Ha) ; République démocratique du Congo (Mondjalis)

Justificatif des Journées scientifiques du réseau Érosion et GCES

L'érosion, un défi agronomique, environnemental et socioéconomique pour la gestion de deux ressources fondamentales pour le développement durable : la terre et l'eau.

L'érosion est un phénomène naturel, somme de trois *processus* : arrachement, transport et sédimentation sous l'effet de l'énergie du vent, de la pluie, du ruissellement et de la pesanteur. L'accélération de ces *processus* par les activités humaines est un problème majeur du développement durable, tant au Sud qu'au Nord. Il concerne tout à la fois les problèmes de gestion des ressources en terres et en eau. En effet d'ici 2020 la surface des sols cultivés dégradé va probablement s'étendre de cent cinquante millions d'hectares et une trentaine de pays de la zone semi-aride va connaître un déficit hydrique important.

Ce phénomène accéléré par l'homme, provoque des conséquences très négatives au niveau du champ cultivé (dégradation des sols, diminution des stocks de carbone et de l'eau, perte des nutriments, baisse des rendements et au final destruction de la ressource sol) et à l'aval sur la pollution des eaux (matières en suspension et éléments nutritifs), la santé humaine (poussières), l'eutrophisation des eaux douces, l'envasement des réservoirs, la destruction des infrastructures et les inondations, et à plus long terme sur les changements climatiques. Entre les deux, l'érosion entraîne le remodellement des versants affectés par le ravinement et les coulées boueuses. Cet appauvrissement général conduit également à la dégradation des conditions de vie du paysannat jusqu'à la migration des populations. Rappelons que l'altération d'un mètre de roche pour former un sol demande cent mille ans alors que la destruction par l'érosion de la couche cultivable se réalise souvent en moins de un à deux siècles.

À Madagascar, l'érosion semble omniprésente, sous toutes ses formes, depuis les *lavaka*, ravines saignant les collines, les glissements de terrain en relation avec les sapements de berges, ou l'érosion en nappe et rigoles des Hautes Terres cultivées comme en témoignent les très nombreux travaux des naturalistes, géographes, agro-pédologues et hydrologues. De nombreuses stations d'expérimentation sur les facteurs de l'érosion et les techniques de lutte antiérosive ont été mises en place et suivies pendant plusieurs années. Elles ont permis d'accumuler des données de base qui serviront à valider les modèles et à faire évoluer les concepts de la Défense et restauration des sols (DRS) des forestiers, à la Conservation de l'eau et des sols (CES) des agronomes et finalement à la Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) des agro pédologues conscients qu'il ne s'agit pas seulement de conserver les sols en place, mais d'améliorer les systèmes de production durables et rentables en même temps que l'environnement rural global.

Deux postulats sont à réexaminer : i/les pratiques paysannes sont destructrices des sols, ii/ l'érosion est toujours un problème grave qui réduit l'efficacité de l'agriculture.

La réunion annuelle du réseau Érosion et GCES de l'AUF du 24 au 27 octobre 2005 à Antananarivo, Madagascar, permettra aux chercheurs et praticiens de Madagascar, de l'Afrique du Sud et de l'Est, ainsi que de l'océan Indien d'échanger leurs connaissances et expériences sur les problèmes divers posés par l'érosion et la lutte antiérosive dans cette région montagneuse, souvent volcanique et très peuplée. Cette réunion devrait aussi nous donner la possibilité d'identifier les chercheurs et thèmes de recherche qui pourront être encouragés à se réunir en réseau pour regrouper les forces existantes autour du réseau EGES de l'AUF.

Discours d'ouverture de Bruno MAURER

Directeur du bureau océan Indien
de l'Agence universitaire de la Francophonie

C'est pour l'Agence universitaire de la Francophonie un moment important que celui de cette rencontre scientifique qui marque la vie du dernier né des réseaux de chercheurs de l'Agence, le dix-huitième. On pourrait s'étonner qu'un réseau de chercheurs né seulement en 2004 soit déjà en mesure, après un an d'existence à peine, d'organiser une manifestation de l'ampleur et de l'importance de celle qui vous réunit ici ; c'est que ce réseau n'est pas né tout armé, *ex nihilo*, mais qu'il est l'héritier d'un réseau autrefois soutenu par l'IRD et qu'il peut ici, à Antananarivo, capitaliser tout le travail fait en amont, pendant plusieurs années sous le patronage de l'IRD. Je suis heureux, en ma qualité de directeur du bureau régional océan Indien de l'AUF et au nom du Recteur, Michèle Gendreau-Massaloux, de pouvoir profiter de cette occasion pour souligner la qualité du partenariat existant depuis plusieurs années et dans de nombreux domaines entre l'Agence que je représente et cette institution de recherche.

La problématique générale, Érosion et Gestion conservatoire des eaux et des sols, est assurément fondamentale. On peut à cet égard en souligner le caractère à la fois ancien et actuel. Ancien parce que l'Histoire nous apprend que si les civilisations sont mortelles, elles le sont souvent du fait même de l'intervention humaine ; sans s'en rendre compte suffisamment tôt, les sociétés finissent par épuiser le milieu naturel qui constitue leur assise, eau et sol au premier chef, et s'éteignent ainsi parfois brutalement, à peine parvenues à ce qui pourrait être considéré rapidement comme un âge d'or. Des recherches récentes menées sur les sites des cités royales de l'antique Sumer, en Mésopotamie, tendent à montrer que cette civilisation s'est effondrée en quelques décennies de façon si radicale qu'on a fini par oublier jusqu'à la localisation de ces villes florissantes qui se nommaient Ninive, Assur ou Akkad sans parler de Babylone. Grâce à la culture irriguée, ces villes dominaient des territoires fertiles d'où elles tiraient la richesse à l'origine de leur puissance. Mais l'irrigation aurait, là comme ailleurs, provoqué un accroissement de la salinité des sols et au final rendues stériles les terres cultivées, provoquant un déclin plus irrémédiable que les invasions militaires... Plus près de nous, les conséquences de la mise en eau du barrage d'Assouan sur le fragile équilibre du Nil sont là pour nous rappeler que nous ne tirons pas toujours les leçons de l'Histoire.

Actuelle, cette problématique l'est assurément, tant elle s'inscrit dans la perspective d'un développement durable, expression qui, pour une fois, n'est pas gal-

vaudée si l'on examine la nature des travaux que vous menez. L'AUF veille à ce que les réseaux de chercheurs qu'elle soutient conservent toujours une dimension appliquée, soient riches d'implications sociales et d'applications concrètes : le vôtre répond à ce cahier des charges de manière exemplaire.

Je soulignerai également le fait que le lieu de votre manifestation scientifique, Madagascar, est particulièrement bien choisi au regard de votre problématique, cette île Rouge dont on dit que les fleuves saignent quand leur cours rouge des sols charriés atteint le bleu de la mer pour un mariage qui n'a rien d'heureux mais qui conduit souvent à la stérilité...

Je terminerai ce mot de bienvenue en mettant en avant une dernière caractéristique de votre problématique, son caractère rassembleur.

Géographiquement d'abord, puisque outre Madagascar, le Burundi, le Rwanda, le Maroc, la Réunion, le Mali, le Cameroun, le Vietnam, Mayotte, les Comores, l'Équateur, la France et j'en oublie sans doute sont ici représentés... Disciplinairement ensuite, puisque vous êtes, les uns et les autres, géographes physiciens et humains, agro-pédologues, agro-économistes, agro-pastoralistes et agro-forestiers, hydrologues, géomaticiens, géochimistes, géo-écologues, anthropologues...

Devant cette diversité, deux lectures sont possibles, pessimiste et optimiste.

Pessimiste parce qu'elle tend à montrer l'universalité des problèmes liés à l'érosion et à la gestion conservatoire des eaux et des sols et qu'elle témoigne de la difficulté à maîtriser des phénomènes multidimensionnels tant au plan des causalités que des implications.

Mais optimiste également, en ce qu'elle témoigne de la vitalité de la recherche francophone et que l'on peut espérer que votre rencontre à Madagascar verra émerger de votre séminaire de nouvelles pistes, prise de conscience partout de l'importance de ces enjeux.

Depuis un an ou deux à présent, une tradition – récente donc – veut que les réunions des comités de réseau de chercheurs de l'AUF soient le moment de journées scientifiques. C'est le moment de rencontres entre universitaires d'horizons scientifiques et de pays différents, mais aussi de peut-être de rencontres entre acteurs politiques et économiques, décideurs, et chercheurs, car alors que l'on parle de la nécessité de la professionnalisation du monde universitaire, peut-être faut-il œuvrer également dans l'autre sens à une « universitarisation » – néologisme nécessaire - du monde professionnel...

Je ne conclurai pas sans remercier l'Université d'Antananarivo, représentée aujourd'hui par Simone Ratsivalaka et par son Président Pascal Rakotobe, ainsi que les nombreux partenaires de cette manifestation, IRD, CIRAD, SCAC, FOFIFA, ANAE.

Au nom du bureau océan Indien et au nom de Madame le Recteur de l'AUF, permettez-moi de vous souhaiter des journées riches d'échanges, de perspectives concrètes et de pistes futures.

Remerciements

Journées scientifiques Érosion et GCES du réseau Érosion et Gestion conservatoire de l'Eau et de la fertilité des sols de l'AUF

Nous remercions les organismes suivants pour leurs supports et leurs contributions au succès des Journées :

- Université d'Antananarivo
- Agence universitaire de la Francophonie
- service de Coopération et d'Action culturelle, Ambassade de France Antananarivo
- Institut de recherche pour le développement
- Projet FSP FORMA (Forum de la recherche à Madagascar)
- Foibe fikarohana momba ny fambolena (FOFIFA)
- Association nationale d'actions environnementales (ANAE)



Agence universitaire de la Francophonie



Sommaire

Le réseau Érosion francophone.....	v
Document constitutif du réseau Érosion et Gestion conservatoire des eaux et des Sols (GCES) de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF)	vii
Le Réseau EGCEs : animateurs des thèmes, sous-thèmes et représentants nationaux.....	xiii
Justificatif des Journées scientifiques du réseau Érosion et GCES	xv
Discours d'ouverture de Bruno Maurer	xvii
Remerciements	xix

1. Synthèses

1.1. Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive. De la conservation des sols à la gestion durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) Éric ROOSE	27
1.2. Bilan et évaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols, - avant 1996 - à Madagascar Pierre-François CHABALIER.....	33
1.3. Recherches francophones sur l'érosion hydrique Georges DE NONI, Éric ROOSE	43
1.4. L'érosion, une question importante pour la séquestration du carbone par les écosystèmes continentaux Christian FELLER, Martial BERNOUX, Éric ROOSE	51
1.5. Lutte antiérosive et recherche en gestion et conservation sols au Burundi Théodomir RISHIRUMUHIRWA.....	57
1.6. Programme national de lutte antiérosive (PLAE) (Madagascar) Rémy FONTANNAZ.....	65
1.7. Agroforesterie au Rwanda : son efficacité et ses limites Dieter KÖNIG.....	71

2. Processus d'érosion

2.8. Dégradation des terres dans les parcours de plaine en milieu méditerranéen sub-humide, non forestier, le cas de la façade atlantique du Maroc Abdellah LAOUINA, Miloud CHAKER, Rachida NAFAA, Antari MUSTAPHA	79
2.9. Ancienneté et vitesse d'érosion des <i>lavaka</i> à Madagascar M. MIETTON, J.-C. LEPRUN, R. ANDRIANAIVOARIVONY, M. DUBAR, M. BEINER, J. ERISMANN, F. BONNIER, E. GRISORIO, J.-P. RAFANOMEZANA, P. GRANDJEAN.....	87
2.10. Modèle de fonctionnement en <i>lavaka</i> : rôle du drainage des rivières Mamy Herisoa RABARIMANANA	95

2.11. Étude de la corrélation entre composition chimique et minéralogique dans la formation de l'érosion en <i>lavaka</i> , Clément MIANDRINANDRASANA, Pax RAJAONERA.....	99
2.12. Étude de la relation sol/roche-mère pour la gestion de la fertilité des sols : cas des <i>tanety</i> d'Alasora, Madagascar Léa-Jacqueline RAHARIJAONA RAHARISON, Safidy NOMENJANAHARY, Marie-Antoinette RAZAFINDRAKOTO	101
2.13. Dynamique des pertes agrochimiques dues à l'érosion et incidence sur la production au Moso (Burundi) Ferdinand NTIBURUMUSI.....	105

3. Méthodes : indicateurs, SIG, cartographie

3.14. Des images de télédétection pour l'érosion Christian PUECH, Damien RACLOT, Andres JACOME.....	113
3.15. Automatisation de l'estimation de la perte de terre Herinirina Iarivo NARY	119
3.16. Les SIG, outils de traitement des données et d'aide à la prise de décision pour la gestion des sols et de l'érosion Solofo RAKOTONDRAOMPIANA, Claude COLLET, Simone RATSIVALAKA	125
3.17. Application de la télédétection et des SIG dans la gestion des sols d'un bassin versant des Hautes Terres centrales malgaches Simone RANDRIAMANGA, Haja Maminirina A. MIARINJATOVO	131
3.18. Potentiel comparé des données de Météosat seconde génération (MSG) et de l'imagerie <i>radar wide swath</i> au suivi des crues et de l'envasement du lac Alaotra Lova Tahina RANDRIANARISON, Fanja Nirina Hanitra RAMAHATODY, Laurent BEAUDOIN, Jean-Paul RUDANT, Solofo RAKOTONDRAOMPIANA, Jean-Bruno RATSIMBAZAFY, Mparany ANDRIAMIANINA.....	137
3.19. Prévision des zones sensibles à l'érosion à partir des données à références spatiales - démarche de base Minoniaina RAZAFINDRAMANGA	143
3.20. Utilisation d'un appareil simple, mais précis, pour mesurer l'érosion en conditions extrêmes à Mayotte Jean-Michel SARRAILH.....	147
3.22. Implications de l'érosion hydrique dans l'aménagement du bassin versant d'Antsaharatsy, Hautes Terres centrales de Madagascar Haja Maminiriana ANDRIANAVALONA MIARINJATOVO, Simone RANDRIAMANGA	153
3.21. Utilisation des marqueurs radioisotopiques pour l'étude de l'érosion à diverses échelles spatiales et temporelles Claude BERNARD, Lionel MABIT, Marc LAVERDIÈRE.....	159
3.23. Indicateur de risques d'érosion et les états de surface du Nord Vietnam Simon POMEL, Ha PHAM QUANG.....	167

3.24. Cartographie de l'érosion des terres. Application à l'île de Mayotte S. GUILLOBEZ, J.-F. DESPRATS, J.-C. AUDRU	173
---	-----

4. Techniques de GCES

4.25. Labour ou semi-direct dans les écosystèmes soudano-sahéliens (cas du Cameroun et du Mali) Drissa DIALLO, Zachée BOLI, Éric ROOSE	181
4.26. Effets des jachères légumineuses arbustives sur la séquestration du carbone et l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion. Manankazo, N-O de Madagascar Marie-Antoinette RAZAFINDRAKOTO, Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY, H. RANDRIANARIMANANA, Nicolas ANDRIAMAMPIANINA.....	189
4.27. Érosion et évolution des conditions culturales après défriche sous différents systèmes de culture en labour et semis direct sur couverture végétale B. MULLER, J.-M. DOUZET, R. L. RABEHARISOA, R. R. N. RAZAFIMIROE, J. RAKOTOARISOA, RAZAKAMIARAMANANA, A. ALBRECHT	193
4.28. Caractérisation de la protection du sol contre l'érosion due à différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale à l'aide de micro-parcelles dans le cadre d'un essai multidisciplinaire B. MULLER, J.-M. DOUZET, M. B. RASOLONIAINA, S. RABEZANAHARY, A. RASAMILALA, RAZAKAMIARAMANANA, A. ALBRECHT	199
4.29. Effet des systèmes en semis direct sous couverture végétale sur le stock du carbone et l'agrégation d'un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres malgaches. (Andranomanelatra, Madagascar) Tantely M. RAZAFIMBELO, Christian FELLER, Alain ALBRECHT.....	203
4.30. La régénération de la fertilité des sols : cas d'un bassin versant à Miarinarivo, sur les Hautes Terres de Madagascar Lala RAZAFY FARA.....	211
4.31. L'utilisation systématique du vétiver pour la protection du chemin de fer FCE (Madagascar) Jeans RANDRIAMANANTSOA, Fenomanana RAHELISOA, Étienne RAZAFINDRABOTO, Mamy Fidélis RAKOTOARIVELO, Lala RANDRIANASOLO.....	219
4.32. L'érosion en <i>lavaka</i> et leurs utilisations par les paysans du terroir d'Ampasimbe, Madagascar Nicolas ANDRIAMAMPIANINA	223

5. Diagnostic du risque et prise en compte des contraintes paysannes

5.33. Action concertée de lutte contre l'érosion des sols à la Réunion A. HÉBERT, G. BENOIT, D. GROENÉ	231
5.34. Étude de l'impact de l'érosion côtière sur l'état de santé des récifs coralliens à Itsamia Moheli Comores Said AHAMADA.....	237

5.35. Effet des systèmes de culture à base de manioc sur l'érosion des sols à Mayotte Houlam CHAMSSIDINE, Patrice AUTFRAY, Angèle LEGALL, Jean BOZZA... ..	239
5.36. Pratiques paysannes et gestion conservatoire des terres cultivables aux Comores Mohamed ISSIMAILA, Issouf AMBADI, Selemane ISSA AHMED.....	245
5.37. Proposition pour l'amélioration de la production agricole aux Comores par une meilleure gestion de la fertilité des sols dans les parcelles paysannes. Ismaila MOHAMED ASSOUMANI.....	253
5.38. GCES dans les terrains de parcours au Maroc oriental Miloud CHAKER	255
5.39. Dynamique de la déforestation et érosion du sol dans la région de Vavatenine (côte orientale de Madagascar) JAORIZIKY	263
5.40. Pratiques paysannes et gestion de l'érosion, exemples malgaches. Une ingénierie écologique indigène Chantal BLANC-PAMARD, Hervé RAKOTO RAMIARANTSOA	265
5.41. Diagnostic régional de la gestion du risque érosif. Étude autour du corridor fo- restier de Fianarantsoa (Madagascar) Georges SERPANTIÉ, Erwan COADOU LE BROZEC, Domoina RAKOTOSON, Albert RAKOTONIRINA, Aurélie TOILLIER.....	275
5.42. Étude de l'érosion hydrique au service de la lutte antiérosive en Équateur German TRUJILLO, Georges DE NONI,	285
5.43. Ruissellement, érosion et gestion conservatoire des andosols : cas des systèmes culturels en Équateur et en Martinique Bounmanh KHAMSOUK, Georges DE NONI, Éric ROOSE, Marc DOREL.....	291
6. Conclusions des Journées scientifiques	299
Adresses des participants	305

1.

Synthèses

Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive. De la conservation des sols à la gestion durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

ÉRIC ROOSE

Labo. MOST, UR. SeqBio au Centre IRD, B. P. 64501, F 34394 Montpellier, cedex 5, France.
Fax : +33 (0)4 67 41 62 94 , Courriel : roose@mpl.ird.fr.

1. Démographie et érosion

Toutes les sociétés ont rencontré des problèmes de dégradation du milieu par divers types d'érosion à l'occasion de crises géologiques ou socioéconomiques. En agglomérant les populations dans les villes, chaque civilisation a créé des conditions favorables à la dégradation de la végétation et des sols, au ruissellement et à l'accélération de l'érosion dans les campagnes environnantes. Or depuis un siècle, la population africaine a été multipliée par cinq : la demande en vivres et autres biens de consommation entraîne l'extension des cultures sur des terres plus fragiles, l'intensification du pâturage et des techniques culturales sur des pentes fortes et la réduction du temps de jachère : les risques de dégradation du milieu sont donc plus forts que jamais.

2. Deux logiques de lutte antiérosive

Pour surmonter ces crises environnementales, les sociétés ont développé des stratégies de lutte antiérosive (LAE) en fonction de deux logiques :

- * une logique aval développée par les consommateurs d'eau, les villes, irrigation et industries. Leur objectif est de protéger la qualité des eaux et les aménagements urbains. Pour le bien public, le pouvoir central envoie ses ingénieurs imposer dans les campagnes des petits équipements hydrauliques (barrages collinaires, banquettes, fossés de drainage) dont le but est de réduire les transports solides, de protéger la qualité des eaux et les équipements (barrages, irrigation des vallées, industries, routes, ouvrages d'art, habitats).

- * une logique amont partagée par les paysans, dont l'objectif est d'améliorer la productivité de la terre et du travail, en adaptant les systèmes de production au marché et en développant des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau sur les versants, en gérant la biomasse et en concentrant les nutriments sur les terres cultivées. En définitive, l'érosion n'est pas seulement un problème technique, mais aussi le signe de la dégradation d'une société en mutation. Or, à l'époque de la mondialisation, la restructuration de l'économie entraîne une crise sociale et environnementale : c'est une époque de remise en cause favorable à l'évolution des mentalités sur la gestion des ressources en eau et en sol, denrées de plus en plus rares.

3. Les stratégies traditionnelles

Face à ces crises socioéconomiques, les sociétés rurales ont tenté d'y porter remèdes par des stratégies traditionnelles adaptées aux pressions foncières, en aménageant les eaux de surface, en redistribuant la biomasse et les nutriments pour améliorer la productivité des sols cultivés et stabiliser les versants. Depuis 7000 ans, l'Homme a accumulé des traces de sa lutte pour maîtriser l'eau sur les versants, protéger la fertilité des terres, réduire l'érosion. Ces stratégies traditionnelles sont strictement liées aux conditions écologiques et économiques des sociétés qui les ont développées. Par exemple, la culture itinérante sur brûlis est bien équilibrée sur les terres peu peuplées, dans le cadre d'une économie d'auto-subsistance. Mais dès que la densité de population croît au-delà de 10 à 40 habitants /km² (en fonction de la richesse du milieu), la jachère n'arrive plus à restaurer la fertilité des sols. Par contre, les terrasses en gradins irrigués qui demandent énormément de travail à la construction et à l'entretien, exigent des populations nombreuses, des terres fertiles en montagne et la disponibilité en main d'œuvre bon marché. L'abandon de ces systèmes, ne signifie pas leur manque d'efficacité antiérosive, mais l'évolution des conditions socioéconomiques du milieu. Une trentaine de techniques traditionnelles ont été observées sur les rives de la méditerranée qui mériteraient d'être mieux valorisées par l'optimisation de l'irrigation, de l'usage de la biomasse et de la fertilisation (Roose, Sabir, De Noni, 2002).

4. Les stratégies modernes d'équipement hydraulique des versants : la logique de l'État

Depuis l'ère industrielle, les états centralisés ont dépêché leurs ingénieurs en milieu rural pour tenter de réduire les nuisances de l'érosion des versants sur la qualité des eaux de surface et la protection des équipements industriels ou urbains. À l'occasion de crises économiques et environnementales, ont été créés des stratégies d'équipement en petite hydraulique agricole : la RTM en 1882 dans les Alpes et Pyrénées (Lilin, 1986), la CES en 1930 dans la Grande Plaine américaine, puis la DRS (1940-1980) dans les montagnes qui entourent la Méditerranée (Roose, 1994).

*La restauration des terrains en montagne (RTM) a été développée en France dans les années 1860-1882, pour faire face à une crise d'érosion liée aux populations montagnardes appauvries qui ne pouvaient survivre sans mener les troupeaux sur les terres communales surpâturées. La dégradation de la couverture végétale et le tassement des sols par le bétail ont entraîné le développement catastrophique du ruissellement et des torrents. Pour protéger les aménagements des vallées et les voies de communication, l'Office national des forêts a racheté les terres dégradées, reconstitué la couverture forestière ou herbacée et corrigé les torrents. Plus d'un siècle plus tard, la population montagnarde a beaucoup diminué (industrialisation et colonisation) : il reste de très beaux ouvrages de correction torrentielle dont malheureusement l'entretien est très lourd (quarante millions d'euros/an pour la France).

*Aux États-Unis d'Amérique, le Service de conservation de l'eau et des sols (CES = SWC en anglais) a été créé lors de la terrible crise économique de 1930, pour conseiller les fermiers volontaires qui réclamaient aux agronomes un appui technique et financier pour maîtriser l'érosion des champs. En effet, l'extension rapide des grandes cultures mécanisées peu couvrantes (coton, arachide, maïs) dans la Grande Plaine a déclenché une érosion éolienne catastrophique. Des nuages de poussières soulevés par le vent obscurcirent le ciel en plein jour (*dust bowl*) : 20 % des terres cultivables furent dégradées à cette époque. Sous la pression du public, l'État a dû mettre en place simultanément un programme de recherche sur la limitation de l'érosion et un service public de conservation de l'eau et des sols au niveau de chaque comté.

*La Défense et Restauration des sols (DRS) a été développée par les forestiers dans les années 1940-1980 autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages (en trente à cinquante ans) et la dégradation des équipements et des terres. La DRS est née d'un mariage de raison entre la RTM des forestiers (reforestation des hautes vallées et correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers). Pour les forestiers, il s'agissait de mettre en défens les terres dégradées par la culture et le surpâturage et de reforester les hautes vallées pour restaurer la capacité d'infiltration des versants montagnards.

Cependant, depuis les années 75, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches technocratiques menées sans l'avis des bénéficiaires. Aux USA, malgré cinquante ans de travaux remarquables des services de SWC et les millions de dollars investis chaque année, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an de sédiments (limite de tolérance de la sédimentation) qui viennent polluer les eaux des lacs. La fréquence des vents de sable a baissé mais l'envasement des barrages et l'inondation des plaines posent encore de graves problèmes. En Algérie, malgré 800 000 ha de reforestation (ceinture verte) et l'aménagement de banquettes sur 350 000 ha cultivés, la dégradation des sols continue, l'envasement des barrages et le manque d'eau et de bois restent des problèmes préoccupants. En Afrique de l'Ouest et du Nord, les paysans préfèrent parfois abandonner leurs terres aménagées par l'État plutôt que d'entretenir des banquettes antiérosives car ils craignent qu'il ne s'agisse d'un piège dressé par l'État pour s'emparer de leurs terres. Les paysans ont bien remarqué que ces banquettes gênaient la mécanisation et leur faisaient perdre 5 à 15 % des surfaces cultivables, sans augmenter pour autant le rendement des terres « protégées ».

« Pourquoi tant d'efforts pour protéger la terre pour si peu de bénéfice sur la production ? »

5. La GCES, une stratégie participative orientée vers l'amélioration des ressources en eau, biomasse et en nutriments

Au séminaire de Porto Rico (1987) furent étudiées les multiples causes de l'échec des projets comportant un important volet de lutte antiérosive (LAE) : les causes

essentielles de l'abandon des structures mécaniques furent l'absence de participation des bénéficiaires et leur inefficacité sur la productivité des terres. Une nouvelle stratégie (*Land husbandry* ou GCES en français) fut donc proposée qui tente de mieux prendre en compte les préoccupations immédiates des paysans : assurer leur survie, intensifier les cultures en valorisant la terre et le travail, améliorer le système de culture, en particulier l'infiltration, l'enracinement et la nutrition des plantes. C'est une véritable révolution qui entraîne la modification des priorités des projets de lutte antiérosive :

- * Engager un dialogue entre les techniciens et les paysans dès le début des projets sur la perception par les paysans des problèmes posés par l'érosion et des solutions acceptables.

- * Améliorer d'abord la gestion des bonnes terres qui réagissent le mieux aux investissements avant de s'occuper « des terres mortes » qui exigent de très gros efforts pour restaurer leur productivité.

- * Rechercher de nouveaux systèmes de production en vue d'une gestion durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

- * Confier à une équipe spécialisée de l'État le traitement délicat de l'érosion catastrophique (grandes ravines, mouvements de masse, inondations et aménagement des rivières), mais responsabiliser les paysans pour l'amélioration de l'environnement rural.

Partant du principe que les aménagements antiérosifs ne peuvent être durables sans la participation paysanne, la GCES tient compte de la perception paysanne des problèmes de dégradation des sols et des éléments de solutions. Le défi à relever est de doubler la production en vingt ans, tout en réduisant significativement les risques de ruissellement. La majorité des sols cultivés sont épuisés : il n'est plus temps de les conserver seulement, il faut restaurer ou mieux améliorer leur capacité à produire car la demande de produits de consommation ne peut plus attendre d'hypothétiques effets à long terme de la lutte antiérosive. D'elle-même, la lutte antiérosive n'améliore que rarement les rendements des cultures.

6. Les tendances actuelles des techniques de GCES

L'auteur présente enfin l'évolution des techniques de LAE dégagées lors du colloque de Yaoundé sur « l'impact des activités humaines sur l'érosion en Afrique » (Roose, 2000).

- * Les effets néfastes de l'érosion sur la productivité des terres sont localement importants (perte de 30 % du rendement après un décapage de 5 cm de sol) mais rarement catastrophiques en Afrique, tant en ce qui concerne le décapage des champs érodés que les nuisances sur le réseau hydrographique. L'érosion en nappe est mal perçue des paysans et dix fois plus dégradante que le décapage par l'érosion linéaire ou aratoire. Malheureusement les praticiens attendent l'apparition de rigoles et de ravines pour intervenir quand le mal est déjà fait.

- * Pour améliorer l'efficacité des techniques antiérosives, on évolue des banquettes et ados de terres imperméables vers de simples micro-barrages perméables

(cordons de pierres, haies d'herbes ou d'arbustes) ou plus récemment vers des systèmes de travail réduit du sol sous litière ou sous couverture permanente de légumineuses.

* On évolue des stratégies de lutte antiérosive de la DRS-CES à dominance mécanique sur de grands chantiers vers des démarches plus biologiques associant la gestion des eaux de surface, à celle de la biomasse et des engrais minéraux complémentaires pour optimiser la croissance des plantes.

* La recherche propose aussi des techniques simples pour restaurer rapidement la capacité de production des sols dégradés encore suffisamment épais : améliorer la gestion du ruissellement, travailler profondément le sol pour améliorer l'enracinement, revitaliser l'horizon superficiel par apport de MO fermentée (fumier, compost), remonter le pH à plus de 5,5, nourrir les plantes plutôt que le sol.

* A l'échelle du petit bassin versant, les aménagements antiérosifs bien réussis aboutissent à l'étalement des crues, la réduction des transports solides et l'alimentation des nappes. Mais l'amélioration de la production passe aussi par la satisfaction des besoins en eau et nutriments des plantes aux moments où l'exige la physiologie végétale.

* En milieu urbain, très peu perméable, le ruissellement est particulièrement abondant. S'il est mal contrôlé, on observe une forte agressivité des ravines, le sapement des versants et des berges, des glissements de terrains très dangereux et des inondations fréquentes avec ensablement des pistes et bas-fonds. Il est recommandé de mettre en place des comités de quartier chargés de sensibiliser les habitants aux risques d'érosion /inondation qu'ils font subir à leurs voisins et pour organiser et entretenir le drainage.

* Sur le terrain, pour avancer des solutions adaptées aux multiples problèmes posés par le développement durable il est recommandé à la recherche de coopérer étroitement avec les projets de gestion de terroirs.

Conclusions

Les mots cachent une philosophie. Certains découvrent peut-être qu'ils font de la GCES sans le savoir ! La GCES est un concept beaucoup plus large que « l'agriculture de conservation » qui se limite aux systèmes de culture dans un champ sans assumer la restauration des ravines, ni les mouvements de masse. La GCES englobe la gestion spatiale durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols dans le terroir et les bassins versants; la lutte antiérosive n'est qu'un aspect de la valorisation de la terre et du travail.

Mots-clés : Stratégies de lutte antiérosive ; RTM ; CES ; DRS ; GCES ; évolution historique.

Références bibliographiques

BENNETT, H. H., 1939, *Elements of soil conservation*, New York, Mac Graw-Hill, 530 pp.
GRÉCO, J., 1978, *La défense des sols contre l'érosion*, Paris, Maison Rustique, 183 pp.

- LILIN, Ch., 1986, « Histoire de la restauration des terrains en montagne », *Cah.Orstom Pédol.*, 22 : 139-146.
- LOWDERMILK, W. C., 1953, « Conquest of the land through 7 000 years », *Agric. Ir.format. Bull.*, USDA, SCS, 99 : 54 pp.
- ROOSE, É., 1994, « Introduction à la GCES », *Bull. Pédol.FAO*, Rome, n° 70, 420 pp.
- ROOSE, É., Lamachère JM., 1999, « Influence de l'Homme sur l'érosion », vol. 1 et 2 des actes du Colloque de Yaoundé, *Bull réseau Érosion* 19 + 20, 608 + 578 pp., IRD, Montpellier, France
- ROOSE, É., Sabir M., De Noni G., 2002, « Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen », *Bull. réseau Érosion*, 21, 523 pp., IRD, Montpellier, France.
- ROOSE, É., 2004, « Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive », *Sécheresse*, 15, 1 : 9-18.
- SHAXSON, F., HUDSON, N., SANDERS, D., ROOSE, É., MOLDENHAUER, W., 1989, *Land husbandry : a frame work for soil & water conservation*, Ankeny , Iowa, SWC. SOC, WASWC, 64 pp.

Bilan et évaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols - avant 1996 - à Madagascar

PIERRE-FRANÇOIS CHABALIER

CIRAD, B. P. 20 , 97408 Saint Denis messagerie cedex 9, La Réunion, France
Tél. : +33 (0)2 62 52 80 38, Fax : +33 (0)2 62 52 80 21,
Courriel : pierre.chabalier@cirad.fr

Introduction

C'est à Madagascar que les actions de recherche, les études et les réalisations concernant l'érosion et la protection de sols, ont été les plus denses depuis les années 50 en milieu tropical. Elles ont été d'une grande diversité thématique et ont concerné une grande variabilité de milieux.

Comme l'ensemble de ces travaux constitue une richesse unique pour Madagascar, un projet PCS (projet conservation des sols) a été mené conjointement par le FOFIFA, le CIRAD et l'ONE en 1996 pour les inventorier, les évaluer quant à leur pertinence et leurs résultats (techniques, sociologiques et économiques). L'objectif a été d'en fournir une synthèse en vue d'une utilisation possible pour de nouveaux projets.

Ce projet a comporté plusieurs actions. Une synthèse très exhaustive de la bibliographie a permis de recenser plus de 4 200 articles et documents. Un aperçu historique et spatial des études a permis de situer les recherches sur l'érosion et la conservation des sols ainsi que les travaux réalisés par différents projets depuis 1950. Des synthèses thématiques ont été réalisées par des spécialistes. Six enquêtes sur le terrain ont été menées en vue de réaliser un bilan – évaluation des projets de conservation des sols plus ou moins anciens, menés dans des zones très différentes. Nous résumerons dans ce papier uniquement les résultats d'études liées à l'érosion.

1. Les grands systèmes géomorphologiques et d'érosion à Madagascar peuvent se résumer très synthétiquement de la façon suivante, en allant de la côte Ouest (zone aride) à la côte Est (zone très pluvieuse) :

Formations de cordons littoraux et alluvions sur la côte Ouest, érosion en *sakasa-ka* sur les sables roux, dépôts d'alluvions (*baiboho*) dans la plaine dépressionnaire de l'Ouest, érosion en *lavaka* sur les hautes terres, érosion en nappe et glissement de terrain sur la façade Est et alluvions en deltas et plages sur la côte Est.

2 - Les mesures des phénomènes d'érosion

Un grand nombre de parcelles d'érosion de Wischmeier ont été implantées à partir de 1950 dans les 6 grandes zones climatiques (sur 20 sites) , associées à un certain nombre de bassins versants expérimentaux (sur 11 sites).

Les expérimentations ont concerné la quantification de l'érosion (définition des paramètres de l'équation de Wischmeier), la comparaison des influences des couverts végétaux et leur modification ainsi que celles des pratiques agricoles. Les deux versants de l'île se distinguent par des coefficients R de l'érosivité des pluies différents :

Pour le versant occidental : $R = 0,50 P + b$

Pour le versant oriental : $R = 0,35 P + c$

On peut discerner les grandes zones de sensibilité à l'érosion avec R et K :

- **L'Ouest** : l'érosivité de la pluie est assez forte ($R > 900$) et l'érodibilité K du sol forte également ($K > 0.2$). C'est une région très sensible, d'autant que la savane est peu couvrante et brûle régulièrement.

- **La zone centrale** où R est moyen et K faible à moyen ($400 < R < 600$ et $0.05 < K < 0.2$)

- **La zone Est** où $R > 900$ mais K faible $< 0,05$

- **La bordure orientale** des hautes terres où R est moyen et K très faible < 0.05 .

Une carte des zones iso-érosives a été dressée. Elle distingue 15 zones d'érosion, allant de la plus faible à la plus forte susceptibilité à l'érosion.

Le ruissellement moyen sur l'île peut être estimé à 25 % de la pluviométrie et il est dû en moyenne à 5 à 7 événements orageux (ou cycloniques). Les mesures de perte en terre sur les parcelles varient selon les zones, les traitements et les années de 0 à 500 t/ha/an. Des glissements de terrain « en coup de cuillère » pouvant être très importants sont fréquents dans l'Est, sur les versants de *tanety* venant d'être défrichés.

L'influence du couvert végétal a également été mesuré sur des parcelles et sur des bassins :

- Le ruissellement et l'érosion sont faibles sous prairie non dégradée, mais augmentent dès que celle-ci est brûlée (doublement du ruissellement par rapport à une prairie améliorée mise en défens),

- Dans l'Est, la forêt naturelle réduit l'érosion, de même que la jachère *savoka* et les plantations : le coefficient de ruissellement sous forêt n'est que de 0,8 % (10 kg de terre/an) contre 22 % sous culture sur brûlis. Le maximum est atteint sous sol nu, mais la culture de gingembre a donné des résultats de perte en terre presque identiques à ceux de la parcelle sol nu (150 t/ha au maximum).

- Les cultures à plat occasionnent les plus forts ruissellements, avec une augmentation d'un facteur de 10 par rapport à des cultures sur billons isohypses.

- La méthode de mise en andain lors du défrichement pour les cultures sur brûlis, limite l'érosion qui reste alors de même ordre de grandeur que celle sous forêt secondaire laissée en témoin (*savoka*).

1. Synthèses

L'étude de petits bassins versants dans différentes zones agroécologiques a permis d'établir des bilans hydriques sous différents types d'aménagement et de caractériser les modalités de ruissellement et de perte en terre.

Dans l'Est, il a été mis en évidence que la forêt naturelle (et un peu moins les eucalyptus) donne moins de ruissellement que la jachère (*savoka*), du fait d'une forte ETR, de l'existence d'écoulement sub-superficiels retardés et d'une meilleure rétention et infiltration de l'eau dans le sol.

En zones plus sèches, les aménagements et mise en défens (création de murettes de pierres) augmentent l'infiltration et régularise l'écoulement de l'eau du BV.

Tableau 1. Valeurs des indices-pluies à Madagascar (DRFP-CTFT-1976)

Zones	Sous Zones	Stations	Indice pluie (R)	Périodes d'observations
Nord-Ouest	Nord-Ouest	Miadana	1230	1970-1973
Est	Est	Ivoloina	957	1966-1972
	Moyen Est	Périnet	494	1963-1972
Ouest	Sud-ouest	Taheza	290	1962-1966
	Ouest	Miadana	988	1970-1975
	Nord	Befandriana-Nord	1204	1968-1972
	Moyen-Ouest	Kianjasoa	718	1967-1975
Hauts plateaux	Centre	Nanisana	370	1965-1973
	Ouest	Manankazo	508	1962-1975
	Est	Ambatomainty	385	1972-1975
	Sud	Ampamahcrana	476	1962-1975
	Ankarata	Nanokely	359	1965-1972
	Lac Alaotra	Vallée témoin	479	1962-1968
	Mangoro	Analabe	621	1969-1971
Sud	Extrême-Sud	Antanimora	230	1962-1967

À partir de ces résultats, des techniques de DRS ont été adaptées selon 4 zones d'érosivité des pluies. Des efforts ont été menés pour marier conservation et production. Dans ces expérimentations, on a montré la nécessité d'introduire dans la rotation deux à trois ans de prairie artificielle ou une jachère améliorée sur les Hautes Terres, les avantages des cultures suivant les courbes de niveau et sur billon quelles que soient les pentes du terrain, par rapport à une culture en plat, et la nécessité d'apporter une fertilisation d'entretien sur les sols ferrallitiques des Hautes Terres.

Tableau 2. Récapitulatif de l'indice des pluies

zones	Indice pluie : R	appréciations
Ouest et Nord-Ouest	Supérieur à 1200	Très forte
Est	950	Assez forte
Hauts plateaux	500	Moyenne
Sud	Inférieur à 300	faible

Tableau 3. Pertes en terre et érodibilité des sols

Zones	Sous Zones	Stations	Pertes en terre maximale annuelle (t/ha/an)	Érodibilité K	Nombre d'années d'observation
Hauts plateaux	Est	Ambatomainty	233,9	0,19	2
	Sud	Ampamaherana	320,8	0,03	2
	Ouest	Manankaso	457,0	0,24	2
	Centre	Nanisana	80,5	0,20	6
	Ankarata	Nanokely	198,1	0,22	7
Ouest	Centre Nord	Befandriana	312,2	0,16	4
	Nord	Nord	131,0	0,23	5
	Moyen-Ouest	Miadana	241,0	0,41	7
		Kianjasoa			
Est	Est	Ivoloina	259,1	0,02	6

Tableau 4. Synthèse des pertes en terre en fonction des sols et des couverts

	Perte en terre En sol nu t/ha/an	Perte en terre en % du sol nu		
		Forêt savane dense	Couvert dégradé	Sous cultures
Sol ferrallitique	400	0 %	1 à 5 %	20 à 50 %
Sol ferrugineux	350	0 %	10 %	40 à 60 %

3 - Les solutions techniques de lutte contre l'érosion

3.1 - Lutte contre l'érosion éolienne dans le sud

Des actions anciennes sur la création de brise vents ont concerné le choix d'espèces résistantes. 300 ha de culture ont été ainsi protégés, mais ces techniques ont eu un faible impact au niveau des populations qui ont coupé au fur et à mesure les eucalyptus pour le feu.

Des actions ont été également entreprises pour la fixation des dunes dans des estuaires.

Dans le bassin d'Ambovombe, des actions se sont succédées sur la création de haies brise-vent. Le système de triple haie avec *Casuarina*, *l'Acacia arabica* et en plus de *l'Atriplex* fonctionne bien et a été adopté par les agriculteurs. Des centaines d'hectares ont été protégés. Le bassin aménageable représente 3 000 km².

3.2 - Lutte contre l'érosion hydrique des zones cultivées

Les projets d'aménagement ont évolué progressivement avec le temps : on est passé de grands projets d'aménagement type « grands travaux mécanisés de DRS » menés en régie par l'administration (années 50 à 70) à des projets plus modestes avec des approches plus participatives type GCES, comme l'agroforesterie, la gestion agrobiologique des sols.

Les dispositifs avec banquettes (utilisation de la formule de Ramser pour l'espacement) ont concerné les projets pilotes des années 50 (exemple : la vallée témoin du lac Alaotra) qui incluaient la réalisation d'aménagement mécanique des versants ainsi que la création de rizières avec leurs barrages d'irrigation, la création de pistes, des reboisements, le traitement des *lavaka*. La création de fermes pilotes (exploitations agriculture-élevage) faisait partie des projets. Les agriculteurs utilisaient des pratiques d'intensification de production (fertilisation minérale et organique, rotation avec des successions de cultures adaptées, création de prairies artificielles, etc.).

Les aménagements des vallées forestières de l'Est (années 60-70) sont la suite de ce type d'opération, incluant la création de rizières, des plantations de caféiers, des reboisements, ainsi que la création d'arboretums (dont certains sont devenus actuellement des réserves).

Tous les grands aménagements mécanisés (avec banquettes et fossés) réalisés dans les années 50 à 70, sont relativement bien conservés actuellement et ont prouvé leur efficacité. Tous ces grands projets ont créé au départ des conditions favorables pour le développement d'une zone, en mettant au point un ensemble de composantes intégrées. Mais il s'est avéré que de nouvelles contraintes sont apparues avec le temps (augmentation de la population, problème de marché et de débouché des produits, augmentation des coûts des intrants...) qui ont fait que les techniques de conservation n'ont plus été respectées, car n'étant plus prioritaires face à la stratégie de survie des agriculteurs. C'est pourquoi les projets plus récents s'appuient plus sur les communautés villageoises existantes, avec l'aide d'ONG. Ils sont moins ambitieux, et les aménagements ne concernent pas forcément l'ensemble d'un bassin versant.

Des systèmes agroforestiers ont été mis au point dans chaque zone pour remplacer progressivement les systèmes traditionnels. Par exemple dans l'Est, on distingue les jardins de case riche en fruitiers et vivriers, les jardins mixtes situés plus loin et les agro-forêts (cultures de rente en sous étage forestier).

Dans les actions entreprises, de nouvelles espèces arborées (bois d'œuvre, bois de chauffe, arbre d'ombrages par ex) ont été essayées et les systèmes de culture ont été simplifiés en les axant sur quelques cultures de rente (dans l'Est : vanille, café, banane, letchi, agrumes, etc.).

Des systèmes sylvo-pastoraux ont été introduits vers 1990 sur les plateaux (ex : Anjzorobe, projet FAO). C'est une combinaison d'herbacées fourragères et d'arbustes fourragers en haies. Cette pratique des haies arbustives en courbe de niveau (*Flemengia*, *Leucaena*, *Calliandra*, *Acacia*, etc.) se développe bien. Les haies sont associées à des cultures sur les bandes : rotation de plantes incluant des jachères améliorées (*Crotalaria*, *Tephrosia*, *Desmodium*, *Mucuna*, etc.) et d'autres techniques d'intensification (fertilisation mixte) et des pratiques agrobiologiques (emploi des couvertures mortes ou vivantes). Cependant, si les résultats sont encourageants, la vulgarisation de ces pratiques agroforestières rencontre un certain nombre de problèmes à la fois techniques (manque de semences et préférence des boutures, coupes trop fréquentes des haies et des arbres) et sociaux (rôle de l'arbre dans l'appropriation des terres par ex.).

Il est donc difficile de juger de la diffusion et de la rémanence de ces pratiques.

3.3 - Les corrections des ravines, des *lavaka* et des *sakasaka*

Elles ont fait également l'objet de mise au point de techniques depuis les années 50. Ces érosions sont spécifiques à des zones et des types de sols. Les sédiments sableux évacués font de gros dégâts sur les aménagements situés en aval, notamment les périmètres rizicoles, les lacs de retenue et les divers aménagements hydrauliques.

Pour les *lavaka* de moins de 1 ha que l'on trouve sur les plateaux, il est possible de les stabiliser en faisant appel en amont, à des séries de petits barrages en

gabion, servant à la sédimentation sur les bras secondaires, complétés par des barrages plus importants sur les gorges principales. D'autres petits barrages, en végétaux morts et vivants, sont également installés en complément des gabions. La revégétalisation des zones en surplomb et celle des altérites complètent le dispositif principal.

Pour les *lavaka* plus importants, les travaux à mettre en oeuvre sont trop importants et trop coûteux.

Pour la stabilisation des *sakasaka* dans les sables roux du sud, des techniques analogues donnent satisfaction. Dans ce cas, les agaves, des vétivers sont utilisés comme barrage vivant servant de sédimentation et de filtration dans la ravine. Les amonts de la ravine sont également végétalisés pour limiter une régression trop rapide de la ravine.

Tous ces moyens restent coûteux en main d'oeuvre et en matériels et les dispositifs doivent être entretenus.

3.4 – les reboisements

Le reboisement de protection est une technique de lutte contre l'érosion très efficace pour le taux de réduction des pertes en terre. Des bassins versants expérimentaux suivis pendant quinze ans (Manankaza et Perinet) ont montré que le ruissellement et les pertes en terre sous une plantation (pin et eucalyptus) sont du même ordre que sous une forêt naturelle et restent faibles. Selon les zones climatiques, des espèces d'arbres sont conseillés pour les reboisements.

Les reboisements concernent 200 000 ha en tout à Madagascar et les chantiers de replantation de la région moyen-Est ont été pratiquement les plus importants dans le monde à l'époque. On peut les considérer comme de production et de protection. D'autres types de reboisements ont été testés à Anjozorobe, ce sont des reboisements tampon entre la forêt naturelle et la zone de culture, qui peuvent servir de fourniture en bois de chauffe. Ils limitent ainsi la progression de la déforestation de la forêt primaire. Les résultats sont encourageants, mais trois problèmes se posent : celui du foncier, celui de l'exploitation forcée des eucalyptus et celui des feux. En effet, les méthodes d'exploitation des reboisements privés actuellement utilisées dégradent les bois et les sols. Les reboisements détruits ne sont pas renouvelés.

L'embroussaillage des versants, donnent de bons résultats.

On retiendra comme plantes : le mimosa, le *Grevillea banksii* dans l'Est, ainsi que le petit bambou, mais ces deux espèces sont très envahissantes. Le *Leucaena leucocephala*, le *Cedrelopsis greweii* sont également efficaces. Ces plantes se développent mieux dans certaines zones que d'autres. Le choix est donc délicat.

3.5 – les pratiques agronomiques

Les pratiques agronomiques à la parcelle et les systèmes de culture sont également un moyen de lutter efficacement contre l'érosion des sols. Les effets sont inclus dans le coefficient C qui est très intégrateur dans l'équation de Wischmeier. On note l'effet sur la densité du couvert (contre l'effet *splash* des pluies), sur la permanence de la culture en place, l'amélioration du profil cultural. Il est difficile d'isoler le facteur « fumure » des autres facteurs de production : travail du sol, résidus, date de semis, longueur du cycle, etc. L'érosion enlevant la partie la plus fertile du sol, on ne conçoit pas l'utilisation de fertilisants - qui sont chers - sur des sols non protégés et inversement, on ne conçoit pas d'aménagements antiérosifs sans une intensification par l'utilisation de fumure minérale et organique.

Dans le domaine de la fertilisation, l'IRAM, puis le FOFIFA ont conduit de très nombreux essais dans toutes les zones cultivées et les types de sol.

Durant les années 60-70 les expérimentations étaient conduites en milieu contrôlé et en station. La détermination des carences des sols par la méthode Chaminade a été généralisée sur tous les types de sols. Des essais de courbe de réponse aux éléments déficients étaient alors suivis en station sur des cultures tests (maïs et riz irrigué). Des essais ont également montré le rôle spécifique de la matière organique apportée dans la gestion de la fertilité des sols de plateau. Les résultats étaient ensuite adaptés par le développement qui testait des fumures simples avec les paysans.

À partir de 1972, l'augmentation du coût des engrais a obligé le FOFIFA à rechercher des solutions économiques en utilisant les ressources locales (dolomie, phosphate, fumier, compost). Dans cette démarche, on ne testait pas la globalité des facteurs de production avec leurs interactions, mais un seul facteur : la fertilisation. La correction de la fertilité des sols de *Tanety* des Hautes Terres (sols très pauvres pour les quels les travaux ont été les plus nombreux) reste complexe. La correction de la fertilité par des apports minéraux et organiques revient extrêmement cher (correction de la toxicité aluminique, correction de la forte carence en phosphore et en bases). Les fumures de correction proposées dans les années 70 pour les sols des plateaux étaient de 400 kg de phosphore, de 2 t de dolomie/ha et de 300 kg de potasse. Mais, des économies en fumure de correction phosphatée se sont révélées par la suite possibles, en jouant sur le fractionnement des apports dans la rotation.

Pendant la période 1984-1995, des tests multilocaux ont vérifié l'intérêt d'une fumure organo-minérale modérée. Pour les sols des plateaux, des recommandations de fumure type 90-60-45 en complément de 5 t/ha de fumier et de 1 t de dolomie ont été vulgarisées.

Pour les sols du Moyen-Ouest et ceux du Sud sur sables roux, sols plus fertiles naturellement, une fumure moyenne d'entretien est suffisante : type 5 t/ha de fumier avec PK 60-60 (ou 70-60-60 sans fumier).

1. Synthèses

Des essais de rotations ont conduit à recommander des rotations triennales : exemple de rotation type pour le Moyen-Ouest : maïs-légumineuse-riz.

Depuis 1990, les recherches ont plutôt été menées sur les pratiques agrobiologiques et agroforestières qui permettent de réduire considérablement la fertilisation chimique.

La gestion agrobiologique des sols se développe depuis les années 90, dans une démarche de création-adaptation en partenariat avec d'autres organismes et surtout en association avec des agriculteurs.

Ces pratiques devraient supprimer l'érosion au niveau de la parcelle car l'emploi du semis direct, et des couvertures permanentes du sol (vives ou mortes) limitent le ruissellement et surtout la perte en terre. Les effets sont nombreux sur le sol, comme par exemple la création d'une meilleure activité biologique et l'augmentation du taux de matière organique du sol. Cette amélioration des qualités physiques et chimiques du sol, fait qu'il résiste mieux à l'érosion. Cependant, pour être appropriées par les agriculteurs, ces techniques doivent être innovantes et doivent apporter des avantages au niveau économique. Le gain de main d'œuvre, du fait du non travail du sol, est un facteur clef de la réussite de ces systèmes. Par contre, ils demandent l'utilisation très rationnelle d'intrants comme les herbicides, que les agriculteurs doivent acheter et apprendre à manipuler. Des systèmes adaptés à chaque grande zone climatique (Hauts plateaux, Vakinankaratra, région du lac Alaotra ; Moyen-Ouest et Sud-Ouest) sont encore expérimentés.

Les résultats sont très spectaculaires et la diffusion se fait spontanément après des démonstrations en milieu paysan.

Un grand espoir est donc fondé sur la diffusion de ces techniques qui pourrait résoudre beaucoup de problèmes, dont ceux liés à l'érosion.

3.6 – les pratiques agropastorales

Les pratiques agropastorales concernent 55 % de la surface de l'île qui est couverte de savanes herbeuses ou arbustives. L'élevage extensif domine avec près de onze millions de têtes, dont dix millions de zébus. La réduction de la fertilité des sols influe sur la couverture du sol et le rendement. Ainsi on considère que le taux de recouvrement du sol par les graminées qui dominent (300 espèces décrites), n'est que de 30 à 40 % sur les Hautes terres et de 20 à 80 % dans le Moyen Ouest. Les pratiques pastorales dans le système extensif varient selon les zones, mais l'utilisation des feux de brousse est généralisée (feux précoces ou de saison sèche). Ils concernent deux millions d'ha par an. Ils ont des impacts en général négatifs sur les sols et la végétation (sauf les feux très précoces).

Des essais menés dans plusieurs stations montrent une légère augmentation du ruissellement et des pertes en terre sur les parcelles brûlées par rapport à des parcelles non brûlées : ruissellement de 8,5 % de P contre 7,8 % et pertes en terre de 3 t/ha contre 2,4 t/ha (moyenne de 6 ans). Cette perte de 600 kg/ha supplémentaire de sol avec le passage du feu, correspondrait à un million deux cents mille tonnes de terre perdues sur toute la surface de savane brûlée annuellement.. Une mise en défens du feu pendant quatre ans permet une amélioration progressive

du pâturage (l'*Aristida* remplace le *Trychopteris*, résistant au feu), ce qui permet également une meilleure protection du sol contre l'érosion. Mais il est très difficile de lutter contre les feux sauvages qui sont parfois criminels

Des pratiques comme le fauchage ou le pâturage intensif réduisent considérablement les pertes. L'intensification de l'élevage (essentiellement vaches laitières) suppose la création de prairies dans les bas-fonds en contre-saison du riz et l'installation de prairies sur les *tanety* avec l'introduction de légumineuses (pratiques agrobiologiques, par ex.). Cette intensification va de pair avec une meilleure protection des sols contre l'érosion (mise en défens des parcelles contre les feux et l'érosion, utilisation du fumier, etc.).

4 - Conclusion

Cette étude historique montre qu'on ne peut pas proposer à des agriculteurs des solutions standards d'aménagement. Celles-ci doivent être intégrées à la production des agriculteurs d'une zone, et elles ne doivent pas avoir un impact économique négatif, même sur le court terme. La prise en compte de stratégies des agriculteurs avec leur propre espace de référence est une condition nécessaire à la mise en œuvre de solutions techniques appropriées. Actuellement, de nombreux facteurs limitent la mise en place de ces techniques antiérosives : le manque de structuration des organisations paysannes, l'insécurité foncière, les feux de brousse, l'insuffisance de l'encadrement et le manque de moyens de l'État, la croissance de la population et les migrations, de même que l'environnement économique défavorable à l'agriculture (compte tenu du faible prix relatif des produits agricoles).

Des changements récents dans l'amélioration des structures de production et des prix peuvent toutefois favoriser à terme l'intensification et la durabilité des systèmes (augmentation du prix du riz, sécurisation foncière et gestion locale des terroirs agricoles). Ces changements pourraient entraîner, entre autres, le retour à l'élevage intensif, donc la création de prairies et l'utilisation d'intrants organiques, et la mise en place de techniques antiérosives, telles que l'agroforesterie ou l'agrobiologie.

Références bibliographiques

COLLECTIF, *Bilan et évaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols à Madagascar*, 1996, document FOFIFA, CIRAD, ONE ; 500 pp., cartes et annexes ; également disponible en CD

Facteurs physiques :

RAUNET, M., RABESON, R., « Ensembles morphopédologiques, climatologie, hydrologie et hydrogéologie », pp.1-129

Facteurs anthropiques :

CHABALIER, P-F., « Les feux de brousse », pp. 130-136

CHABALIER, P-F., « La mise en culture par abattis brûlés : le *tavy* », pp. 137-144

RAKOTO, H., « Les migrations, démographie et densité de population », pp.145-156

ANDRIAMAPIANINA, N., « Mesure des phénomènes d'érosion », pp. 157-194

RAKOTOMANANA, J.-L., « Lutte contre l'érosion éolienne et hydrique », pp. 195- 237

RANDRIANJAFY, H., « Foresterie et reboisement de production », pp. 238-262

RAKOTOMANANA, J.-L., « Pratiques agroforestières », pp. 263-289

Recherches francophones sur l'érosion hydrique

GEORGES DE NONI, ÉRIC ROOSE

Centre IRD, B. P. 64501, F-34394 Montpellier cedex 5 - France
Courriel : denoni ou roose@mpl.ird.fr

Introduction

La fatalité et l'impuissance de l'homme face aux éléments naturels déchaînés sont des motifs souvent évoqués pour signaler les dégâts causés par l'érosion. Ce sentiment est d'autant plus ancré dans l'esprit des gens que les médias ne s'intéressent qu'à l'érosion catastrophique. Par exemple, les pays du Sud font souvent la « une » des journaux parce que les paysages sont épisodiquement le théâtre d'averses très agressives qui saturent rapidement le sol et provoquent des ravine-ments important (100 à 300 t/ha/an), des glissements de terrains (plusieurs milliers de m³ de boue en une heure) et des inondations brutales [3, 29, 32].

C'est au profit de tels événements qu'est négligé le travail de sappe de l'érosion en nappe et rigoles. Bien que peu spectaculaire au quotidien, ce type d'érosion prépare progressivement, pluie après pluie, les catastrophes de demain. Son œuvre est particulièrement préoccupante et tenace dans les pays du Sud qui ont connu une croissance démographique très forte au cours du XX^{ème} siècle. La population de ces pays a doublé tous les vingt-cinq ans entraînant des problèmes socioéconomiques et environnementaux sans précédent. L'augmentation des besoins vitaux et sociaux a d'abord provoqué l'extension des défrichements pour les cultures et l'intensification des pâturages puis l'érosion accélérée ($E= 10$ à 700 t/ha/an) et le ruissellement exacerbé (il passe de 1 % sous végétation naturelle à 25 % sous cultures sarclées et peut dépasser 75 % lors des plus fortes averses) [20]. En une génération (vingt-cinq ans), l'érosion peut décaper l'horizon humifère et causer l'abandon de la terre [29].

En définitive, la connaissance de l'érosion reste un sujet d'actualité et à développer. Le phénomène est toujours aussi actif aujourd'hui qu'hier au regard de la démographie galopante du Sud qui se poursuit et aussi des changements climatiques dorénavant avérés et à l'origine d'événements paroxysmiques de plus en plus en fréquents. Face à ce constat, le présent article se propose de dresser un bilan global et d'apporter une analyse critique sur les apports de la recherche francophone à l'étude de l'érosion hydrique, qui est le type de *processus* le plus généralisé dans le Sud.

1. Observations et mesures de l'érosion sur parcelles

Un essai de bilan des méthodes de recherches francophones sur l'érosion hydrique permet d'apprécier l'évolution des approches. Après de nombreuses études ponctuelles sur des parcelles expérimentales (1 m² sous simulateur à 50 m² puis 1 000 m²), on s'est orienté vers des bassins versants de différentes tailles. Mais ceux-ci étant coûteux, et les situations observées difficiles à répéter et interpréter, on a assisté à un retour, toujours d'actualité, vers des parcelles plus faciles à gérer et plus caractéristiques d'une situation (un seul sol, pente, couvert végétal, itinéraire technique). Pour cette raison, nous n'évoquerons ici que le cas des recherches francophones sur parcelles de ruissellement [28].

Alors que les premières parcelles de mesures de l'érosion furent mises en place par Woulny en Allemagne en 1895 [19] puis largement utilisées aux USA à partir des années 30 sous l'impulsion de Bennett, le père de la « conservation des sols », la France tarda à s'approprier ce type de méthode. En effet, l'enquête de Hénin et Gobillot, réalisée dans les années 50, montrait qu'en dehors des montagnes et des vignes, les risques d'érosion étaient très limités en terres de cultures. Il a fallu attendre 1978 pour que les agronomes reviennent sur ce diagnostic et relancent des études sur l'érosion des sols [5, 21]. Depuis, de très nombreuses études basées sur le suivi de parcelles rappellent les liens entre la dégradation des sols, l'érosion et les diverses formes de pollutions des eaux de surface et de nappe [3, 29, 32].

En Afrique francophone, les recherches ont démarré plus tôt, dès les années 50, après le retour du congrès mondial de l'AISS de Washington d'une équipe de pédologues de l'ORSTOM. Sous l'impulsion du professeur Fournier, de l'ORSTOM, de l'IRAT et CTFT, tout un réseau de stations de mesures de l'érosion sous divers agrosystèmes tropicaux fut mis en place en Afrique de l'Ouest et à Madagascar, dès les années 56-60. Un premier bilan fut dressé par Fournier [15], Roose [26], le CTFT [11] et Charreau [9]. Une deuxième vague de mesures en parcelles expérimentales et petits bassins versants fut lancée par la suite pour estimer les facteurs du modèle USLE, l'efficacité des méthodes biologiques de lutte antiérosive, les bilans hydriques et les pertes de nutriments par érosion et drainage [29]. Enfin, une troisième série d'expérimentations en grandes parcelles et sous simulateurs de pluies permit de tester les risques de ruissellement sous divers états de surface [8, 10], les risques d'érosion sous cultures traditionnelles et les systèmes améliorés en tenant compte à la fois de la gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments organiques et minéraux [6, 13, 24, 27].

Pour valoriser leurs résultats, les chercheurs francophones se sont largement appuyés sur l'équation de prévision des pertes en terre (USLE et modifications successives : Wischmeier et Smith, 1978) parce que ce modèle est fondé sur de très nombreux résultats de mesures de terrain aux USA (10 000 parcelles) et dans de nombreux autres pays (par exemple : plus de mille résultats annuels en Afrique). L'analyse des résultats à l'aide de cette équation a permis de constater que les pluies dans les pays du Sud sont très agressives, que l'érosion est un moteur

de l'appauvrissement en particules fines et nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols de ces pays mais qu'heureusement, les sols sont assez stables et assez résistants à la battance. Néanmoins, on ne peut conclure ce bilan sans rappeler les limites du modèle empirique USLE qui ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et rigole dont la source d'énergie est la pluie. Au delà de 20-25 % de pente, ce modèle ne s'applique plus car l'énergie du ruissellement devient prépondérante. En outre, pour fonctionner ce modèle nécessite des données moyennes accumulées sur plusieurs années et n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse. Enfin, la fonction du modèle étant multiplicative, certaines interactions entre facteurs ne peuvent être prises en compte.

Par la suite, d'autres modèles empiriques ont été proposés, qu'il s'agisse de RUSLE où on a tenté d'affiner les paramètres pour les principaux sols et couverts végétaux du Maroc, de MUSLE où l'énergie des pluies a été remplacée par celle du ruissellement, ou de SLEMSA pour l'Afrique du Sud où les interactions sont regroupées différemment [29]. En revanche, les recherches pour quantifier l'érosion hydrique provoquant le ravinement sont bien moins nombreuses, alors que les paysages méditerranéens ou tropicaux semi-arides sont souvent lacérés par le ruissellement concentré, même sous savane arborée. Par exemple, au Maroc, il a été démontré sur divers petits bassins que l'érosion en ravine est beaucoup plus active que l'érosion en nappe [18, 22]. Dans la zone soudano-sahélienne, le ravinement est très actif, même sur des pentes de 1 % car les versants des glacis sont très longs, les sols battants peu perméables et le ruissellement très abondant [29].

2. Spatialisation des déterminants de l'érosion, à différentes échelles

Très tôt, géographes et pédologues francophones ont utilisé la cartographie pour évaluer les surfaces occupées par l'érosion et essayer de croiser entre eux les facteurs déterminants. En fonction de l'évolution des outils (de la photo aérienne à l'image satellitale) et des techniques de dessin et d'interprétation révolutionnées par le recours à l'informatique (SIG), on distingue 3 périodes-clés associées chacune à des types de cartographie spécifiques qui sont :

– la 1^{re} période couvre l'époque coloniale jusqu'au milieu des années 70. A cette époque, les recherches en Afrique concentrent un maximum d'efforts sur l'étude des milieux naturels et anthropisés et se focalisent sur l'inventaire des ressources naturelles ; le sol, l'eau et la végétation sont particulièrement étudiés. La cartographie est le support de base pour les chercheurs de cette époque qui sont avant tout des naturalistes et qui fondent leurs travaux sur les observations directes du terrain. Les pédologues seuls ou associés à des géographes, dressent des cartes à grande échelle (de 1/50 000 à 1/200 000) : le rôle des chercheurs de l'ORSTOM fut très important dans la connaissance de ces milieux tropicaux africains comme en témoigne l'importante production bibliographique de cet Institut [2, 25]. La répartition spatiale des sols, associant les effets de l'érosion, est finement représentée.

– la 2^e période débute dans les années 75-80. Elle marque la prise de conscience au plan international de la gravité des phénomènes de dégradation et d'érosion des sols dans les pays tropicaux, associée à une croissance démographique galopante. En effet, dès 1972, lors de la réunion de Stockholm, la première conférence des Nations unies sur l'environnement fait état d'un constat très alarmiste notamment en Afrique et crée le Programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP). Cet effort, auquel s'associeront ensuite la FAO, l'UNESCO, l'Association internationale de sciences du sol, aboutira au lancement en 1987 du programme d'évaluation de l'état actuel de dégradation des sols dans le monde, connu sous le sigle GLASOD -Global Assessment of Soil Degradation – [16]. En 1990, la carte de l'état actuel de dégradation dans le monde est terminée, à l'échelle de 1/10 000 000). Une superficie de l'ordre de dix-neuf millions six cents mille km², soit 16 % des terres exploitables dans le monde) est touchée par des phénomènes de dégradation dont la majorité par érosion hydrique. Une telle évaluation n'aurait pu être possible sans utiliser les images et les données fournies par les satellites.

– la 3^e période prend place à partir des années 90. Elle se distingue par l'utilisation des SIG et l'introduction du concept d'indicateurs dans les méthodes de suivi et d'évaluation de l'érosion. Les Nations unies tentent de rénover leur approche et de remplacer la méthode d'évaluation de la dégradation des terres, vieille d'une quinzaine d'années. Ils proposent de rechercher dorénavant les indicateurs de qualité des terres, « Land Quality Indicators » [17], parmi ceux-ci l'érosion est l'un des indicateurs recherchés les plus discriminants. Par exemple pour évaluer l'état d'érosion, Brabant [7] suggère d'utiliser trois indicateurs principaux qui se réfèrent : i) au type d'érosion ; ii) à son extension sur le terrain et iii) à son degré de gravité. Ces trois indicateurs sont ensuite agrégés automatiquement dans un SIG pour former un indice synthétique permettant de qualifier et de quantifier l'état érodé du site étudié [14, 31]. Néanmoins, ces outils ne sont pas encore à la portée de tous les pays. Pour être réellement opérationnel, le recours aux SIG et aux indicateurs nécessite la numérisation de toutes les données cartographiques disponibles, ce qui présuppose outre l'existence des informations cartographiques, l'accès à des machines pour pouvoir réaliser un travail de saisie informatique long et coûteux.

3. L'évolution récente : relations entre érosion, lutte antiérosive et séquestration du carbone et utilisation de marqueurs radiotopiques

Les changements climatiques liés au phénomène de l'effet de serre ont révélé la dynamique d'accumulation du carbone dans l'atmosphère. Partant de ce constat et parmi d'autres déterminants, se pose la question du rôle de l'érosion dans les pertes en carbone à l'échelle de la parcelle et des versants .

Un point sur la question a été fait lors du Colloque de Montpellier en 2002, dédié à l'érosion et à la séquestration du carbone, sur l'importance des pertes de carbone

par divers *processus* d'érosion sélectifs ou non (érosion linéaire ou en masse) en milieu tropical et méditerranéen [30]. Par rapport à la production de biomasse (1 à 20 t/ha/an), les pertes de carbone particulaire (par érosion) sont modestes et ne représentent que 1 à 50 kg/ha/an en milieu bien protégé (forêts, prairies, savanes, cultures sous mulch ou plantes de couverture), mais peuvent atteindre 50 à 500 kg/ha/an sous cultures labourées sarclées et jusqu'à 2 t/ha/an sur sol dénudé en milieu très agressif sur fortes pentes. Les pertes en carbone soluble par drainage et ruissellement sont peu connues : elles augmentent de 1 à 600 kg/ha/an avec l'importance du volume drainé du Sahel à l'équateur. Seule l'érosion en nappe est franchement sélective vis-à-vis du carbone (1,2 à 3 et parfois 10 fois la teneur en carbone de l'horizon 10 cm). Par rapport à la capacité de séquestration du carbone par les sols (0,1 à 2,5 tC/ha/an), les pertes par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur. Là où les rigoles se développent, les pertes en C sont dépendantes du volume érodé et des teneurs des dix premiers cm du sol. Par conséquent, le paysan a tout intérêt à développer des systèmes de culture bien couvrant pour réduire les pertes par érosion en MO et nutriments, améliorer la stabilité des agrégats et augmenter le stock de carbone dans l'horizon de surface.

Au niveau du versant, le carbone érodé rencontre de nombreux pièges (végétation dense, pente concave, sols filtrants, talus, haies vives et autres obstacles filtrants, prairies marécageuses bordant les rivières). Une bonne partie des terres que l'on croyait érodées par les pluies, sont en fait poussées vers le bas des champs par le labour et autres techniques culturales : cette érosion aratoire décape les sommets des versants et concentre les horizons humifères sur les talus et en bas des pentes. Il s'agit d'un déplacement localisé plus que d'une séquestration du carbone, à moins que cet humus enfoui soit plus durable du fait de la diminution de l'aération par les labours. Le pâturage entraîne le tassement de la surface des sols, un ruissellement abondant et du ravinement actif, mais aussi un transfert de la biomasse du parcours vers les champs voisins du lieu de parage. Plus l'érosion est vive, plus l'incision dans la couverture pédologique est profonde et les sédiments pauvres en carbone.

Dans les petits barrages de Tunisie centrale, la majorité du carbone vient de la végétation et des sols [1]. Dans les grands fleuves, l'essentiel du carbone provient des eaux de drainage et de l'altération des roches carbonatées ou silicatées : le carbone particulaire est peu abondant (piégé en amont) et l'humus des sols est rapidement prélevé pour le développement de planctons et algues dans la rivière. Les océans possèdent les plus grandes réserves de carbone de la terre (39 000 GT de C organique et 10 000 GT de carbone inorganique) en face desquelles le flux de carbone érodé sur les sols du continent (1,2 GT) est bien modeste : ces réserves dépendent des équilibres entre le C soluble de l'océan et le CO₂ de l'atmosphère. Les autres puits de C (1 500 GT dans les sols et 650 GT dans les arbres) se détériorent par minéralisation, laquelle est encore accélérée par les activités humaines (défrichements, brûlis des résidus de culture, labour et pâturage).

D'autre part, l'utilisation de marqueurs persistants peut apparaître comme un complément efficace aux méthodes conventionnelles d'observation et de mesures de l'érosion. Des divers isotopes qui ont été suggérés comme traceurs du *processus* d'érosion, le césium-137 (^{137}Cs), le plomb-210 (^{210}Pb) et le béryllium-7 (^7Be) s'avèrent particulièrement intéressants [4] à 3 échelles de temps.

Les premiers travaux utilisant le ^{137}Cs comme indicateur des mouvements de sol ont été réalisés aux États-Unis, dans les années 1960. Depuis, de nombreuses études exploitant cette technique ont été réalisées en Amérique du Nord, en Europe, en Océanie ainsi que, dans une moindre mesure, en Amérique du Sud, en Asie et en Afrique. Ces diverses études couvrent une vaste gamme de sols, de pentes, de cultures et de pratiques culturales. Bien que la plupart aient été conduites à l'échelle du champ, la taille de l'unité expérimentale a varié de la parcelle au bassin versant. Concernant les chercheurs francophones, l'école québécoise est particulièrement active dans ce domaine

4. Conclusions et perspectives

L'essai de bilan que nous venons d'effectuer montre qu'il n'existe pas de méthode de mesure parfaite. Il faut donc choisir un faisceau de techniques adaptées aux problèmes que l'on veut résoudre et aux moyens financiers disponibles. Un effort important a été réalisé dans le domaine du suivi de l'érosion en nappe. Les nombreuses données issues des parcelles de ruissellement et des pluies simulées ont bien montré que l'érosion en nappe est un moteur de l'appauvrissement en particules fines et nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols des pays du Sud et qu'elle joue à côté du drainage un rôle important dans l'appauvrissement en nutriments des sols. Par contre, l'étude des ravines, de la circulation des flux d'eau et de sédiments, de leur piégeage sur les versants, reste à développer. On dispose encore moins d'études systématiques de l'érosion aratoire (par les techniques de travail du sol), de l'érosion en masse, des glissements de terrain et du creeping qui relient l'érosion en nappe en montagne. Les apports à tirer de techniques récentes – spatialisation par SIG et recours aux radioisotopes – devraient permettre d'améliorer la connaissance de ces *processus* dans l'espace.

Rappelons, enfin, que l'utilisation et la maîtrise de techniques d'observation et de mesures de l'érosion dépassent le cadre de la connaissance des *processus* sensu stricto. Ces dernières constituent des outils indispensables pour tester l'efficacité des méthodes de lutte antiérosive. Combien de projets ont-ils échoué parce que les techniques employées n'avaient pas été validées ! L'étude de l'érosion pour la simple connaissance n'est qu'une étape en soi et n'a de véritable de sens que si elle sous-tend et valide les méthodes de lutte antiérosive [12, 29].

Références bibliographiques

ALBERGEL, J., MANSOURI, T., ZANTE, P., BEN MAMOUN, A., ABDELJAOUED, S., 2006, Organic matter in the sediments of hill dams in a semi-arid Mediterranean area (Tunisia), In « Soil erosion and carbon dynamics », *Advances in Soil Sciences*, CRC, Publisher, Boca Raton

1. Synthèses

- AUBERT, G., SÉGALEN, P., 1966, « Projet de classification des sols ferrallitiques », *Cah. ORSTOM, Pédol.*, 1966, 4 : 97-112
- AUZET, V., 1988, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture. Aspects agronomiques*, CEREG, Strasbourg, 60 pp.
- BERNARD, C., MABIT, L., LAVERDIÈRE, MR., WICHEREK, S., 1998, « Césium-137 et érosion des sols », *Cahiers Agricultures* 7:179-186
- BOIFFIN, J., 1976, « Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre », *Ann. Agron.*, 274 : 447-463.
- BOLI, Z., BEP, B., ROOSE, É., 1998, « Degradation of a sandy alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the west savannah of northern Cameroon », *Advances in GeoEcology*, 31: 395-401
- BRABANT, P., 1992, « La dégradation des terres en Afrique », *Afrique contemporaine*, Documentation française, Paris, 161 : 90-103
- CASENAVE, A., Valentin, C., 1989, *Les états de surface de la zone sahélienne, Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Paris, 229 pp.
- CHARREAU, Cl., 1970, *Pluie et érosion*, IRAT, Sém. Climatologie, Bambey, Sénégal, 12 pp.
- COLLINET, J., VALENTIN, C., 1984, *Evaluation of erosion factors in Western Africa using rainfall simulation*, Proc. Symp. Harare AISH 144 : 451-461
- CTFT, 1969, *Conservation des sols au Sud du Sahara*, min. Affaires étrangères et CTFT, Paris,
- DE NONI, G., VIENNOT, M., 1996, « Mutations récentes de l'agriculture équatorienne, conséquences sur la "durabilité" des agrosystèmes andins », *Cah. ORSTOM Pédol.* 23, 2 : 277-288
- DE NONI, G., VIENNOT, M., ASSELINE, J., 1997, *Terres d'altitude et terres de risque : la lutte contre l'érosion des sols dans les Andes équatoriennes*, Coll. Latitude 23, IRD, 220 pp.
- DIALLO, D., BARTHÈS, B., ORANGE, D., ROOSE, É., 2004, « Stabilité des agrégats et des mottes comparées aux risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali », *Sécheresse*, 15, 1 : 57-64
- FOURNIER, F., 1960, *Climat et Érosion*, PUF, Paris, 194 pp.
- GLASOD, 1990, *Global Assessment of soil degradation, World map of the status of human-induced soil degradation, An explanatory map*. ISRIC, Wageningen.
- GLÉMAREC, Y., 2000, *Définition d'indicateurs d'environnement pour le développement des hautes terres tropicales*, thèse de doctorat, Paris VII.
- HEUSCH, B., 1970, « L'érosion du Pré-Rif (Maroc) », *Ann. Rech. Forestières Maroc*, 12 : 1-176
- HUDSON, N.W., 1995, *Soil conservation*, Batsford, Londres, 391 pp.
- LAQUINA, A., CHAKER, M., NAFAA, R., COELHO, C., FERREIRA, A., BOULET, A., CARVALHO, T., 2004, « Transformations agraires et risques d'érosion dans les collines de Tafout (Maroc) », *Bull. réseau Érosion*, 23 : 157-169
- LE BISSONNAIS, Y., 1988, « Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau : analyse des mécanismes de désagrégation », *Agronomie*, 8, 10 : 87-96
- NAIMI, M., TAYAA, M., OUZIZI, S., CHOUKR-LAH, R., KERBY, M., 2004, « Estimation du ravinement dans le BV du Nakhla, Rif, Maroc », *Bulletin réseau Érosion*, Montpellier, 2002, 21 : 232-243
- NEBOIT, R., 1991, *L'Homme et l'Érosion*, Université de Clermont-Ferrand, 34, 269 pp.
- QUANTIN, P. et al., 1992, *Étude des sols volcaniques indurés «Tepetates» des bassins de Mexico et Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole*, ORSTOM-CEE, 85 pp.
- RIQUIER, J., 1977, « Assessing soil degradation », *FAO Soils Bull.*, 34, 83 pp.
- ROOSE, É., 1967, « Dix années de mesure du ruissellement et de l'érosion à Séfa au Sénégal », *Agron. Trop.*, 22, 2 : 123-152
- ROOSE, É., ARABI, M., BRAHAMIA, K., CHEBBANI, R., MAZOUR, M., MORSLI, B., 1996, « Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie : synthèse des campagnes 1984-95 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion », *Cah. ORSTOM, Pédol.* 28,2 : 289-308
- ROOSE, É., DE NONI, G., 1998, « Apport de la recherche à la lutte antiérosive. Bilan mitigé et nouvelle approche », *Étude et Gestion des sols*, 5, 3, 181-194
- ROOSE, É., 1994, « Introduction à la GCES », *Bull. Sols FAO*, Rome, n° 70, 420 pp.
- ROOSE, É., DE NONI, G., PRAT, C., GANRY, F., BOURGEON, G., 2004, « Érosion du carbone » (Tome 1) – « Gestion de la biomasse, Erosion et séquestration du carbone » (Tome 2), *Bulletin du réseau Érosion* n° 22 et 23, IRD-CIRAD, Montpellier, 493 et 636 pp.

- SABIR, M., MADDI, M., NAOURI, A., BARTHÈS, B., ROOSE, É, 2002, « Runoff and erosion risks indicators on the main soils of the mediterranean mountains of Occidental Rif area (Marocco) », *in* proceedings 12th ISCO Conference, Beijing China, Mai 26-31, vol. II : 370-375
- VEYRET, Y., PECH, P., 1993, *L'Homme et l'Environnement*, PUF, Paris, 423 pp.
- WISCHMELER, W.H., SMITH, D. D., 1978, *Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning*, UDSA, 537, 58 pp.

L'érosion, une question importante pour la séquestration du carbone par les écosystèmes continentaux

CHRISTIAN FELLER¹, MARTIAL BERNOUX², ÉRIC ROOSE²

¹ IRD Madagascar, B. P. 434, 101 Antananarivo, Madagascar

² Centre IRD Montpellier, Labo. MOST, B. P. 64501, F-34394 Montpellier cedex 5
Courriels : feller@ird.mg , bernoux@mpl.ird.fr ou roose@mpl.ird.fr

1. Problématique

Les préoccupations sur le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (en particulier CO₂, CH₄, N₂O) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en termes de source ou de puits de carbone. Les sols constituent un important réservoir de carbone, environ mille cinq cents milliards de tonnes, ce qui équivaut à presque trois fois la quantité stockée dans la biomasse terrestre, et deux fois celle de l'atmosphère. Toute modification de l'usage des terres et, même toute modification de l'itinéraire technique des sols agricoles, peut induire des variations du stockage du carbone dans les sols. En outre le carbone (C) du sol est particulièrement intéressant pour lutter contre l'érosion : en effet la matière organique (MO) a un rôle majeur sur la stabilité des agrégats (et propriétés physiques liées), l'érodibilité du sol, et le stock de nutriments (NPK, etc.) indispensable à une production durable des couverts végétaux. Ainsi une bonne gestion de la biomasse est une solution assurant la sécurité alimentaire, la conservation de ressources en eau et en sol, et une lutte contre les gaz à effet de serre.

Ponctuellement, les variations de stock de C sont dues à divers *processus*: modification des apports de MO, transfert de C sous forme solide (particulièrement par érosion) ou soluble (lixiviation par les eaux de drainage et de ruissellement), et surtout pertes par minéralisation (CO₂, CH₄) de la MO des sols. Il est donc naturel que les sols apparaissent comme potentiellement importants dans le contrôle des stocks et flux de C et l'érosion est un des *processus* à étudier.

Dans le bilan global du C, les flux de C érodé (sous la forme solide ou soluble) des sols vers les sédiments fluviaux, lacustres ou marins ne sont pas du tout négligeables puisqu'ils représentent 0,6GtC/an à comparer aux émissions totales de C-CO₂ dues aux écosystèmes continentaux qui sont de l'ordre de 1,5GtC/an. Aussi, dans les relations entre érosion, ruissellement et séquestration du C, doit-on s'in-

terroger sur les différents points suivants :

- le C érodé (solide et soluble) fait-il partie du bilan de la « séquestration du C ».
- Autrement dit, qu'est-ce que la séquestration du C ?
- au cours de son cheminement de l'amont vers l'aval, le C érodé est-il transformé ? et quel impact cela a-t-il sur le bilan de la séquestration ?
 - que se passe-t-il aux différentes échelles de paysage ?
 - quelles sont les pratiques agricoles et forestières permettant à la fois une lutte contre l'érosion et une séquestration accrue du C ?

2. C érodé et séquestration du C

On utilise ici la définition proposée par Bernoux *et al.* (2004) qui considère que la « séquestration du carbone » C est « le résultat du bilan net, exprimé en équivalents C-CO₂, de tous les flux de GES (CO₂, CH₄ et N₂O) à l'interface sol-plante-atmosphère, induits par une nouvelle pratique agricole ». Autrement dit : (i) la séquestration de C ne concerne pas seulement les flux de CO₂, (ii) la séquestration de C ne concerne que les flux gazeux entre le sol et l'atmosphère et non d'autres flux sous forme de C solide ou soluble comme c'est le cas lors du cycle érosion et sédimentation le long d'une toposéquence. Or, au cours d'une étude, il se peut qu'une partie des variations de stocks de C du sol observées soit due à une perte de C par érosion sur les parcelles en amont et une accumulation en aval par col-luvionnement. Selon la définition ci-dessus, cette variation de stock de C ne doit pas être comptée comme une « séquestration » ou « déséquestration » de C : la notion de « stockage » de C est donc différente de la notion de « séquestration de C ». Ceci étant, on peut imaginer aussi qu'au cours du transfert de C solide ou soluble de l'amont vers l'aval, il y ait, pour une raison ou une autre, changement du *turn-over* du carbone qui devient plus ou moins labile.

3. Comportement du C érodé

Cet aspect du changement de la stabilité du C du sol lors du cycle érosion-transfert-sédimentation est très peu documenté. Ainsi, la désagrégation et détachement des particules de sol sur le site initial, transferts par érosion, sédimentation peuvent conduire, soit à une augmentation de la minéralisation du C érodé-sédimenté, soit au contraire à sa protection contre la minéralisation microbienne. En effet, dans l'état actuel des connaissances, on sait que le seul *processus* de désagrégation tend à augmenter le potentiel de minéralisation du C organique par déprotection de la MO. Mais, par ailleurs, du C originaire d'un sol de surface et stocké dans un sédiment peut devenir aussi moins facilement minéralisable par protection au sein du sédiment ou par changement des conditions d'oxygénation. Finalement la discussion reste ouverte entre les partisans qui affirment que l'érosion n'entraîne qu'un transfert de C sans changement des bilans de CO₂, et ceux qui pensent que les émissions de CO₂ sont accrues lors du transfert ou au contraire que ces émissions sont diminuées dans le sédiment par rapport au sol original, les deux *processus* pouvant intervenir successivement.

4. Niveau du C érodé en fonction de l'échelle étudiée

4.1 Au niveau de la parcelle

Au colloque de Montpellier (Roose *et al.*, 2004), de nombreuses données ont été présentées sur l'importance des pertes de carbone par divers *processus* d'érosion à l'échelle de la parcelle en milieux tropicaux et méditerranéens. Par rapport à la biomasse produite (1 à 20 t/ha/an) les pertes en C particulaire par érosion sont modestes et ne représentent que 1 à 50 kg/ha/an en milieux bien protégés (forêts, prairies, cultures sous litière ou plantes de couvertures), mais 50 à 500 kg C/ha/an sous cultures sarclées ou savanes brûlées et peuvent atteindre plus de 1 000 kg C/ha/an sur sol dénudé en milieu très agressif. Les pertes de C soluble dans les eaux de ruissellement et de drainage sont peu connues et varient de 1 à 600 kg C/ha/an selon l'importance du drainage. Il est très important de s'interroger sur la nature du C érodé : est-ce une forme à *turn-over* rapide ou non ? On sait, par exemple que les « débris végétaux » (de la taille des sables) du sol ont un *turn-over* rapide alors que le C associé aux fractions limoneuses et argileuses a un *turn-over* beaucoup plus lent. D'où l'importance d'évaluer si l'érosion observée est sélective ou non ? Seule l'érosion en nappe est franchement sélective vis-à-vis du C. Par rapport aux dix premiers centimètres du sol, le coefficient de sélectivité du C du sol varie de 0,5 à 14 et tend à décroître quand l'érosion augmente. On distingue cinq groupes principaux de coefficients : les sols nus ($1,2 \pm 0,2$), les sols cultivés et les parcours dégradés ($2,0 \pm 0,5$), les savanes herbues ($2,7 \pm 1$), les savanes arbustives ($4,2 \pm 3,2$) et les forêts denses ($7,5 \pm 4,5$). Les pertes en C particulaire dépendent plus du volume érodé que des teneurs en C de la surface du sol, car si l'érosion diminue, les teneurs en C du sédiment transporté augmentent.

Les pertes en C par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur que la capacité de séquestration du C dans le sol ($0,1$ à $2,5$ t C/ha/an). Par conséquent, la lutte antiérosive biologique (paillage, plantes de couvertures, forte densité, etc.), en couvrant mieux le sol, réduit les pertes par érosion et drainage et apporte plus de C au sol. L'effet « double gain » se traduit par l'augmentation des stocks de MO des sols restaurés et une séquestration du C accrue (sous réserve de non émission supplémentaire des autres GES comme CH_4 et N_2O). La conservation des sols et surtout, la restauration des sols dégradés, représentent donc un puits de C dont il serait utile de connaître les retombées économiques et environnementales.

4.2 Échelle du versant

Les stocks de carbone des sols sur les versants varient en fonction des *processus* d'érosion, des formes de pente, de la rugosité de la surface du sol et de la densité du couvert végétal au ras du sol. L'érosion aratoire (déplacement en masse par les outils de travail du sol) dépasse souvent l'érosion en nappe sur les surfaces convexes cultivées depuis des siècles avec des dépôts colluvionaires très abondants en bas de pente concave ou sur les talus en limite des parcelles. Les labours répétés peuvent effacer les ravines sur les versants. Le pâturage entraîne le tassement de la surface du sol, un ruissellement abondant et le ravinement actif des drainilles,

chemins reliant les parcours des hautes terres et la source d'abreuvement : il permet la concentration des nutriments sur les parcs de repos et les champs voisins du parcage ou les champs de case.

La fraction du C particulaire érodé diminue en fonction de la distance de son cheminement et les teneurs en C organique particulaire (COP) baissent lors des forts charriages car le ravinement décape les horizons profonds, plus pauvres en MO (donc en C) que la surface.

4.3 Echelle continentale : les flux de C dans les fleuves

À l'échelle des petites rivières et des lacs collinaires, l'ensemble du C sédimenté provient d'une seule source : la MO des sols (Albergel *et al.*, 2004). Par contre dans les grands bassins versants les *processus* sont plus complexes faisant intervenir d'autres formes de C (soluble) et des origines multiples (altérations des roches, filtres biologiques).

Une faible partie des exportations de C sous forme particulaire et/ou soluble se retrouve naturellement dans les grands fleuves. Le C présent dans les rivières l'est aussi sous une forme inorganique et, dans ce dernier cas, provient (i) de l'atmosphère (ii) de l'altération des roches, qu'elles soient carbonatées ou silicatées. Dans les rivières et les fleuves, l'exportation de C organique est en règle général très limitée (environ 1 % de la production de la biomasse sur le continent), ce qui correspond à un flux constant de cinq cents millions de tonnes par an. Le transfert de C dans les fleuves est contrôlé par de nombreux *processus* physico- ou biochimiques, les sols étant fortement impliqués. Par exemple, les flux de C transportés dans l'immense bassin Amazonien (6 400 000 km²) ont été précisément mesurés, et il est estimé que l'apport net de C organique des zones humides et des affluents secondaires du cours inférieur de l'Amazone est de quatre millions de tonnes de C par an et serait donc responsable de 8 à 10 % de l'exportation totale de C organique des fleuves du monde (Seyler *et al.*, 2004).

5. Importance des pratiques forestières et agricoles sur l'érosion et la séquestration du C

S'il est clair que les forêts stockent du C dans le bois et dans le sol (> 100tC/ha sur 30 cm de sol dans le Rif, Maroc), il a été démontré que le pâturage extensif ou intensif mal géré dégrade la végétation et entraîne une perte de C du sol de l'ordre de 40 %. Pour la culture des céréales, la perte est de 60 %. Heureusement, la reforestation avec des espèces à croissance rapide (*Pinus halepensis* ou *Eucalyptus camaldulensis*) reconstruit 90 % du stock de C initial si l'on sait attendre 40 ans. Mais cette solution forestière ne satisfait que rarement la population paysanne. Par contre l'agroforesterie (oliviers ou fruitiers associés à diverses cultures) est intéressante pour l'environnement, qui a des effets identiques à ceux de la forêt en terme de dynamique de stockage de C (80 % du stock de C du sol reconstitués en quarante ans), améliore les revenus des ménages et permet de restructurer l'exploitation des versants pentus en ménageant des aires d'*impluvium* et des aires de production végétale intensive.

Le rôle des feux de brousse est plus complexe qu'on ne le croit : il accélère la

minéralisation de la biomasse, mais produit du charbon de bois qui persiste plus longtemps dans le sol que les composés humifiés. L'impact du feu sur le ruissellement et l'érosion est temporaire : il augmente les risques de ruissellement et d'érosion sur sol dénudé mais favorise par ailleurs la régénération de certaines espèces qui couvrent et protègent rapidement le sol.

L'influence du (sur)-pâturage sur l'érosion et la dynamique du C du sol est mal connue. En effet, les animaux consomment 50 à 60 % de la biomasse ingérée et n'en restituent que 40 % sous forme de déjections. Mais la gestion de ces MO, plus riches en azote, permet de concentrer la fertilité du paysage et la fumure organique dans les zones de cultures intensives (sols plus profonds). Il est apparu nécessaire d'étudier l'influence du mode d'élevage sur la production des GES (CO₂, mais surtout CH₄ et N₂O, beaucoup plus efficaces en terme de réchauffement) et les risques de ruissellement, de ravinement le long des drailles. Le rôle positif de jachères courtes à légumineuses sur le stock de C du sol est bien connu, mais pourrait être contrebalancée par l'augmentation de la production de N₂O. Son introduction à grande échelle en Afrique exige un changement profond des traditions de vaines pâtures et de feux de brousse en saison sèche. La fumure organique et le compost améliorent la production des cultures, mais ne laisse dans le sol que très peu de C après une saison culturale : de toute façon un apport complémentaire d'engrais minéraux (en particulier en phosphore) reste indispensable pour une agriculture intensive et durable.

Les nombreux essais de semi direct sous litière en Amérique latine (Brésil, Argentine et Mexique) et en Afrique (Cameroun, Mali, Maroc) démontrent le double impact de ce système sur la réduction des risques d'érosion et l'augmentation de la séquestration du C (0.5 à 2 t C/ha/an) dans les horizons superficiels du sol (voir les travaux présentés dans Roose *et al.*, 2004b). Bien que le nombre et la durée des expérimentations soit encore trop limités, on peut confirmer un bénéfice environnemental et un bénéfice économique (moins de travail et d'énergie consommée). On manque encore de données en zones semi-arides. Pour que la réduction des pertes par érosion ne soit pas compensée par l'augmentation du drainage, il faut prévoir l'intensification de l'utilisation des ressources en eau, fertilisation raisonnée, forte densité, agroforesterie, etc. Une attention particulière doit être portée sur le mode de gestion des résidus de culture, adventices et plantes de couverture qui sont plus efficaces si elles sont maintenues en surface plutôt qu'enfouies : ces résidus absorbent complètement l'énergie des pluies et du ruissellement et se décomposent plus lentement, en restituant progressivement les nutriments.

Là où les grands chantiers de terrassement des versants ont souvent échoué, la lutte biologique (haies vives, parcs arborés, jachères courtes de légumineuses, cultures intercalaires, bandes enherbées, gestion à la surface du sol des résidus de culture, des adventices et des plantes de couverture, travail limité du sol, etc.)

a démontré son efficacité à réduire le ruissellement et surtout l'érosion en milieux assez humides. Cependant, une gestion simultanée des états de surface du sol et de la fertilisation raisonnée est indispensable pour améliorer la productivité des terres et du travail. La gestion raisonnée de la biomasse et de la fertilisation complémentaire peut apporter des solutions satisfaisantes dans les agro systèmes et relever le défi du XXI^e siècle : nourrir une population qui double tous les vingt ans, tout en réduisant les risques environnementaux.

6. Conclusions et perspectives

De nombreux travaux sont encore nécessaires afin de mieux comprendre et quantifier précisément l'influence de l'érosion et des pratiques de lutte antiérosive sur la séquestration du C aux différentes échelles.

À l'échelle parcellaire, si l'on dispose de mesures sur l'indice de sélectivité vis-à-vis du C par l'érosion, permettant ainsi de qualifier et quantifier le C déplacé, on quantifie encore mal le C déplacé sous forme dissoute dans les eaux de ruissellement et de drainage. Dans les zones tropicales humides, les teneurs en C organique dissous (DOC) ne sont pas négligeables (de 1 à 600 kg C ha⁻¹ an⁻¹) et la composition des eaux de ruissellement est semblable à celle des rivières en termes de DOC. Il y a un fort besoin de données sur le pourcentage d'agrégats qui sont déposés en bas de pente, dans les rivières et dans les océans, mais surtout sur leur susceptibilité à être minéralisés lors du transport ou après sédimentation.

Au niveau des versants les phénomènes sont plus complexes. Certaines méthodes basées sur les traceurs (137Cs, 13C...) permettent d'appréhender la variabilité spatiale des flux, mais des améliorations sont indispensables pour confirmer si la déposition initiale est vraiment homogène dans l'ensemble du paysage même lorsque les précipitations dépendent des vents qui peuvent changer de direction.

Références bibliographiques

- ALBERGEL, J., MANSOURI, T., ZANTE, P., BEN MAMOU, A., ABDELJAOUED, S., 2004, « Matière organique dans les sédiments des barrages collinaires en zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie », pp. 468-478, *In, Bulletin du réseau Érosion* 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.
- BERNOUX, M., FELLER, C., ESCHENBRENNER, V., CERRI, C. C., CERRI, C. E. P., 2004, « Séquestration du carbone dans les sols », pp. 29-42, *In, Bulletin Réseau Erosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.
- ROOSE, É., DE NONI, G., PRAT, C., GANRY, F., BOURGEON, G., (dir.), 2004a, *Bulletin du réseau Érosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone, IRD-CIRAD, 493 pp.
- ROOSE, É., DE NONI, G., PRAT, C., GANRY, F., BOURGEON, G., (dir.), 2004b, *Bulletin réseau Érosion* n° 23, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 2, Séquestration du carbone et érosion des sols, IRD-CIRAD, 636 pp.
- SEYLER, P., MOREIRA-TURCQ, P., COYNEL, A., ETCHEBER, H., GUYOT, J.-L., 2004, « Flux de carbone organique de l'Amazone et de ses principaux affluents », pp. 420-431, *In, Bulletin du réseau Érosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.

Lutte antiérosive et recherche en gestion et conservation sols au Burundi

THÉODOMIR RISHIRUMUHIRWA

C/O AGROBIOTEC, B. P. 5667 Kinindo - Bujumbura, Burundi
Tél. : +257 24 19 72 (bureau) ; +257 22 19 92 (domicile) ; +257 82 45 80 (mobile)
Courriel : agrobiotec2002@yahoo.fr

1. HISTORIQUE

La gestion et la restauration des sols ont été initiées au Burundi dans le cadre de la Mission antiérosive (MAE¹) en 1947, mise en place par les autorités agricoles durant la période coloniale pour lutter contre l'érosion et la dégradation des sols, principalement dans les régions montagneuses du Congo belge et du Rwanda-Burundi.

Les travaux de lutte antiérosive (LAE²) de cet organisme se sont inspirés de l'approche Bennet qui préconise la réduction de l'énergie de ruissellement et l'infiltration des eaux de surface. C'est en application de ce principe que furent lancées de larges campagnes de fossés isohypses et de reboisement, complétées par l'interdiction des feux de brousse.

Ces travaux furent conduits par coercition, sans participation des « bénéficiaires », qui n'en comprenaient ni l'utilité, ni la portée. Ils furent assimilés à la colonisation et furent abandonnés à l'indépendance en 1962. Il fallut attendre 1977 pour leur remise à l'honneur sans pour autant changer ni de méthodes, ni d'approches.

C'est dans la foulée de cette reprise qu'un vaste programme de recherche fut entrepris, pour la première fois en 1979, dans le cadre de la Mission Forestière Crête Zaïre-Nil (MFCZN), sous la tutelle du département des eaux et forêts. Un réseau de parcelles expérimentales fut installé à Rushubi-1 (région du Mumirwa, altitude 1750 m, l'une des plus pentues du pays).

La recherche fut ensuite transférée à la CRAF³ de l'ISABU⁴ en 1985, en même temps que la recherche sylvicole et agroforestière. Cette dernière mis en place deux autres stations expérimentales : Rushubi-2 et Kanyosha et aménagea deux bassins versants expérimentaux en 1986. La CRAF donna naissance au PRPE⁵ en juin 1990.

1 MAE : Mission antiérosive

2 LAE : Lutte antiérosive

3 CRAF : Cellule de recherche agroforesterie

4 ISABU : Institut des sciences agronomiques du Burundi

5 PRPE : Projet de recherche pour la protection de l'environnement

L'IRAZ⁶ entreprit également des recherches sur la conservation des sols avec un accent particulier sur le rôle du bananier sur la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES⁷).

Les travaux de l'ISABU et de l'IRAZ furent ralentis, puis arrêtés à la suite de la crise politique que le Burundi connaît depuis 1993 et en raison de la suspension de l'appui des bailleurs extérieurs à la recherche agronomique.

2. OBJECTIFS

La recherche à l'ISABU s'articulait autour des thèmes spécifiques principaux suivants :

- étude des facteurs d'érosion par l'USLE⁸ de Wischmeier ($A=R*K*LS*C*P$);
- fonctionnement hydrodynamique des sols des sites étudiés ;
- mesure des pertes en terre et du ruissellement ;
- étude des aménagements antiérosifs et des pratiques agricoles ;
- développement des techniques GCES efficaces et adaptées au milieu paysan.

L'IRAZ poursuit les mêmes objectifs mais concentra ses travaux sur le rôle du bananier dans la GCES des hauts plateaux de l'Afrique centrale (Burundi, Rwanda et Est de la RDC⁹).

3. MÉTHODES

Les deux instituts ont adopté, comme méthode de recherche, l'étude de l'érosion et du ruissellement sur des parcelles expérimentales. Chaque station était équipée d'appareils pluviométriques pour calculer la quantité et l'intensité de chaque pluie. Les parcelles disposaient d'un système de collecte des terres érodées et du ruissellement permettant d'étudier les facteurs d'érosion et l'efficacité des différents dispositifs de GCES. Chaque station était également dotée d'une parcelle de Wischmeier (jachère nue travaillée, témoin international).

L'ISABU a également aménagé deux bassins versants expérimentaux, respectivement de 4,5 et 7 hectares, dans le Mirwa central, sur des pentes atteignant parfois 90 %, occupées dans la partie aval par une bananeraie dense. Ces bassins étaient équipés à leurs exutoires de systèmes de collecte du ruissellement et des pertes en terres pour déterminer, suivant une approche systémique, des dispositifs et pratiques antiérosifs qui se sont révélés intéressants en station.

4. PRINCIPAUX RÉSULTATS

4.1. Les facteurs et risques d'érosion

Les principaux résultats obtenus par les deux institutions sont les suivants :

- L'indice climatique «R» déterminé dans les 10 principales stations climatologiques du pays est relativement modéré. Il varie de 350 à 650, respectivement

6 IRAZ : Institut de recherche agronomique et zootechnique

7 GCES : Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité du sol

8 USLE : Universal soil loss equation

9 RDC : République démocratique du Congo.

1. Synthèses

pour des zones climatiques de la plaine de la Ruzizi, de pluviométries inférieures à 1 000 mm, et la crête Congo-Nil, recevant plus de 1 650 mm de pluies par an ;

– La susceptibilité des sols du Burundi « K » est également modérée. Elle est inférieure à 0,15 quel que soient les sols étudiés ;

Les pertes en terre et le coefficient de ruissellement sur les parcelles cultivées varient considérablement en fonction de l'agressivité de la pluie, de l'état de la couverture du terrain, du type de sol, de la pente et sa longueur « LS », du taux d'humectation du sol, de la couverture du sol et des pratiques agricoles « C » et des aménagements anti-érosifs « P ».

Tableau 1. Risques d'érosion et régions géomorphologiques du Burundi.

Régions géomorphologiques	R	K	LS	C/vég. natur.	C/culture	A vég. nat en (t/ha)	A culture en (t/ha)
Plaine Imbo	350	0,07-0,14	0,6 - 1	0,01	0,1-0,7	0,15 - 0,5	1,5 - 34,3
Mirwa	475	0,07-0,14	1,1 - 21	0,001	0,1-0,7	0,04 - 1,4	3,7 - 977,6
Crête Zaïre-Nil	550	0,07-0,14	1,1 - 21	0,001	0,1-0,7	0,04 - 1,6	4,2 - 1131,9
Plateau central O(1)	475	0,07-0,14	1,1 - 8,3	0,001	0,1-0,7	0,04 - 0,6	3,7 - 386,4
Plateau central E(2)	475	0,07-0,14	1,1 - 8,3	0,01	0,1-0,7	0,4 - 5,5	3,7 - 386,4
Dépression N	350	0,07-0,14	0,6 - 2,5	0,01	0,1-0,7	0,15 - 1,93	1,5 - 85,8
Dépression E	550	0,07-0,14	0,6 - 2,5	0,01	0,1-0,7	0,24 - 1,93	2,3 - 134,8

D'après le tableau 1, les risques d'érosion peuvent atteindre >1000 t/ha/an en terres cultivées si la pente dépasse 50 %, notamment dans les contreforts de la crête Congo-Nil, tandis qu'ils restent modérés sur faibles pentes (1 à 5 t/ha/an).

4.2. Efficacité des méthodes de lutte antiérosive

4.2.1. Le couvert végétal

L'efficacité du couvert végétal ressort du tableau n° 2 qui donne les différentes valeurs de l'indice cultural 'C' des principales cultures pratiquées au Burundi.

Il a été également constaté que l'utilisation du paillage, même partiel, est une des clés pour la maîtrise du ruissellement et le contrôle de l'érosion

Tableau 2. Indices culturaux de quelques cultures traditionnelles du Burundi..

Type de végétation	Indice C
sol nu	1
culture paillée/pinède	0,001
bananeraie	0,07 - 0,14
manioc traditionnel	0,10 - 0,16
patate douce traditionnelle	0,53
association haricot-maïs	0,62

Source: Rapport annuel ISABU 1989-1990

4.2.2. Les autres méthodes recommandées

Les recherches à l'ISABU et à l'IRAZ ont montré les méthodes suivantes peuvent être appliquées dans les conditions du Burundi :

- le billonnage en courbes de niveau permettant de réduire le ruissellement et l'érosion sur des terrains en pentes faibles et modérées ;
- l'alternance de cultures sarclées avec des bandes non sarclées ;
- les associations culturales avec plantes rampantes et recouvrantes ;
- les terrasses radicales (à éviter sur des sols instables qui reposent sur une couche imperméable à plan incliné) ;
- les fossés isohypses s'ils sont bien calibrés et associés aux bandes enherbées ;
- les lignes de pierres et andains de déchets végétaux en courbes de niveaux ;
- les boisements (reboisement des sols dégradés et associations agro-sylvo-pastorales par bandes boisées au sein des exploitations) ;
- les haies vives associant des graminées et des arbustes légumineux.

Ces haies réduisent les pertes en terres de plus de 96 % et le ruissellement de 50 % en fonction de la pente et des espèces et combinaisons d'espèces utilisées.

4.3. Rôle du bananier en conservation des sols

Une étude réalisée à l'IRAZ, près de Gitenga, a montré que les résidus d'une bananeraie disposés en bandes isohypses permettent de contrôler l'érosion. Dans ce cas, la densité de plantation joue un rôle important comme le montre le tableau 3.

Tableau 3. Densité de plantation, taux de couverture du sol, érosion en t/ha/an et indices C.

Densité de plantation	Taux de couverture	Erosion en t/ha/an	Indice C
3 m x 3 m + paillis	100%	0,06	0,001
2 m x 3 m	25,0%	1,14	0,03
3 m x 3 m	16,7%	2,36	0,06
5 m x 3 m	10,0%	2,47	0,06
Réf. Wischmeier : nu	0%	40,52	1,00

4.4. Études de l'arrière effet de l'érosion et de restauration des terres dégradées

Un essai de restauration des terres érodées a été réalisé dans le cadre de l'IRAZ sur d'anciennes parcelles d'érosion au bout de 3 années de *processus* érosif. Son objet était d'étudier l'effet des pertes en terre sur la baisse de la productivité des sols et de tester l'efficacité et le coût de 3 méthodes de restauration. Le maïs (*Zea mays*), variété Bambou, a été utilisé pour l'étude des rendements.

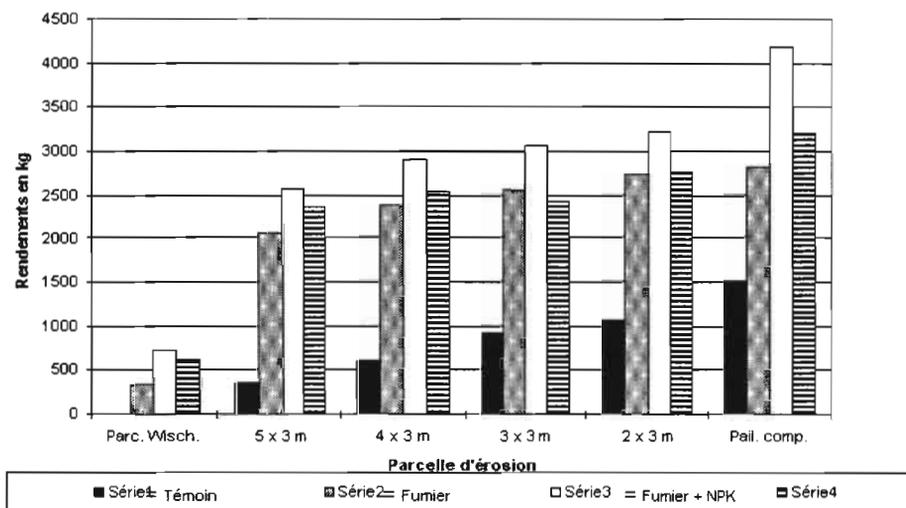
Les méthodes de restauration étudiées sont : le fumier de ferme (6 t/ha en M. S.), le fumier associé aux engrais (NPK 60-60-40), idem + chaulage (500 kg/ha).

Les essais ont été menés sur des parcelles sous bananeraies après trois années d'érosion cumulée d'autant plus importante que la densité de plantation diminue comme le montre le tableau ci-après (tableau 4). Une parcelle nue (parcelle de Wischmeier) a servi de témoin.

Tableau 4. Traitements étudiés.

Parcelles étudiées	Érosion cumulée en trois ans en t/ha
1° Parcelle nue (témoin)	153,9
2° Parcelle 5 m x 3 m	57,9
3° Parcelle 4 m x 3 m	53,9
4° Parcelle 3 m x 3 m	32,2
5° Parcelle 3 m x 3 m	16,8
6° Parcelle m x 3 m + paillis complet	0,14

Les résultats obtenus sont présentés à la figure n° 1. Les rendements enregistrés sur les différentes parcelles sans intrants permettent de mesurer la productivité résiduelle après trois ans d'érosion alors que l'efficacité des méthodes de restauration est donnée par les séries 2 à 4.

Figure 1. Productivité et restauration des terres érodées

Les rendements de la parcelle nue qui a subi les pertes les plus importantes en terre sont nuls. Ils varient de 600 à 1 000 kg/ha sur les parcelles à bananeraies. La parcelle avec paillis complet donne les meilleurs rendements (1500 kg). La baisse de productivité est d'autant plus importante que les pertes en terre sont élevées.

Les résultats montrent que, quelle que soit la méthode adoptée, les rendements de la parcelle nue restent bas, ne dépassant guère 740 kg même en associant le fumier, les engrais N-P-K et la dolomie.

L'érosion a donc affecté la productivité du sol et a partiellement détruit son potentiel de mise en valeur. En effet, avec une perte de 154 t de terre/ha en trois ans (dH sol= 10mm), la parcelle nue nécessite des apports plus importants d'intrants pour retrouver sa productivité initiale.

4.5. Comportement des bassins versants expérimentaux

Les études menées dans les deux bassins versant expérimentaux par l'ISABU ont mis en évidence des zones à érosion active, des zones de redistribution et des zones de dépôts des matériaux érodés. Les pertes en terre à l'exutoire sont très faibles dans les deux bassins étudiés, restant toujours inférieurs à 180 kg/ha/an comme le montre le tableau 6.

Tableau 6. Pertes solides dans les deux BV expérimentaux d'Isale en kg/ha/an.

Campagne	1986-1987	1987-1988
BV ₁ (4,5 ha)	171,29	46,00
BV ₂ (6,5 ha)	64,00	1,82

Ces faibles pertes sont à mettre à l'actif du rôle des zones de cultures dominées par une bananeraie dense qui joue un rôle éminemment efficace en conservation des sols.

5. CONCLUSIONS

Ces résultats, qui sont loin d'être exhaustifs, témoignent d'une intense activité de recherche dans les années 1985-1995. Malheureusement, cette recherche est actuellement suspendue. La crise que connaît ce pays en est la principale cause. Il est urgent de relancer ces travaux qui sont de la plus haute importance dans la gestion des exploitations agricoles et dans la sauvegarde de l'environnement.

Cependant, les bases d'une bonne gestion et conservation des sols existent. Il est important de se fixer un seuil de tolérance des pertes en terres. Ce seuil représente les pertes en terre qu'un sol peut perdre annuellement sans que sa fertilité n'en soit affectée. La lutte antiérosive reviendra à réduire les pertes en dessous de 1 à 12 t/ha/an. Il faudra pour cela combiner plusieurs méthodes, en s'inspirant de l'équation paramétrique de Wischmeier.

Dans le contexte du Burundi, les meilleures approches sont celles qui recourent aux méthodes biologiques comme l'utilisation du paillage et des déchets organique, les haies vives et l'intégration de l'arbre dans les systèmes cultureux. Les méthodes mécaniques comme l'aménagement des terrasses, les fossés isohypses et le labour en courbes de niveaux pourront compléter les approches biologiques.

Une combinaison raisonnée de toutes ces méthodes peuvent apporter, selon les cas, des solutions à moyen et long terme.

Références bibliographiques

- DUCHAUFOR, H., PATRY, J. P., 1988, Étude de la conservation des eaux et des sols dans le Mumirwa, Cas de deux bassins versants en commune isale, Mission d'appui technique à l'ISABU.
- LASCOUX, D. M., BITOKI, O., BIZIMANA, M., 1986, Lutte contre l'érosion : synthèse des essais après la campagne 1985, Bujumbura, 30 pp.
- I. S. A. BU, 1991, Département des études du milieu et des systèmes de production, Programme agroforesterie sylviculture et érosion, *Rapport annuel 1989-1990*, partie érosion

1. Synthèses

I.S.A.BU, 1989, *Rapport des recherches agronomiques 1988-1989*

I.S.A.BU, 1987, *Rapport des recherches agronomiques 1987*

RISHIRUMUHIRWA, T., 1992, « Ruissellement et érosion sous bananier au Burundi », in *Bulletin Réseau Érosion*

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

RISHIRUMUHIRWA, T., 1993, « Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol », *Bul. réseau Érosion*, Montpellier, 13 : 63 - 70

RISHIRUMUHIRWA, T., 1997, *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro – Burundi)*, thèse n° 1636, EPFL, Lausanne, 302 pp.

Programme national de lutte antiérosive (PLAE) (Madagascar)

RÉMY FONTANNAZ

PLAE : B. P. 371, Mahajanga, Madagascar ; Tél. : +261 (20) 62 247 75,
Courriel : fontannaz@simicro.mg

1. Historique

L'érosion alarmante constatée dans de nombreux bassins versants des périmètres rizicoles met en cause, à moyen et long terme, la survie des rizières et des infrastructures d'irrigation. Le PLAE est financé par la Coopération allemande par l'intermédiaire de la *Kreditanstalt für Wiederaufbau* (KfW) et le Gouvernement malgache. Il est réalisé par le bureau d'étude AHT- Group (consultant).

L'identification des nouvelles implantations a été réalisée lors d'une mission d'étude qui a permis de choisir deux localisations pour l'extension du PLAE. L'étude a porté sur les sites prioritaires à partir de la liste établie par le MAEP et les provinces de Fianarantsoa et de Toliara. Un atelier stratégique de démarrage du PLAE II s'est tenu en décembre 2004 à Mahajanga et à Marovoay.

2. Objectifs

A long terme, le Programme est conçu pour contribuer à assurer la pérennité des sous bassins versants de petite taille situés aux alentours directs des rizières et des réseaux hydrauliques périphériques et, à moyen terme, à réduire l'ensablement des rizières et canaux.

La gestion adéquate des bassins versants assure une exploitation pérenne des principaux périmètres irrigués.

Les SBV autour de la plaine de la Basse Betsiboka et d'au moins deux autres régions sélectionnées sont aménagés et gérés d'une façon durable par les populations pour contrôler l'ensablement des périmètres rizicoles.

Développé en six principaux résultats attendus :

1 : Les mesures de LAE appropriées sont appliquées sur les sites sensibles à l'érosion et reproduites par d'autres villages avec l'appui du programme

2 : Les mesures agricoles et pastorales intégrant la LAE permettant d'atténuer l'érosion et d'augmenter la productivité sont intensifiées dans les sites touchés

3 : La sûreté de l'appropriation des bénéfices de l'exploitation des ressources naturelles est favorisée par la clarification de la situation foncière

4 : Des structures formelles de gestion sont établies pour réaliser et entretenir les mesures techniques (R1 et R2) et pour faire appliquer les règles de gestion

5 : Les expériences du PLAE sont diffusées et des relations de partenariat sont développées pour mettre en œuvre le programme de LAE

6 : L'extension progressive des programmes de LAE au niveau national est engagée et appuyée par une structure de formation

Les impacts attendus doivent porter sur:

– l'érosion : les participants ont bien compris que le Programme de lutte Antiérosive (PLAE) permettra de réduire l'érosion des BV et l'ensablement des rizières ainsi que des terrains cultivables en aval des *lavaka*.

– la couverture végétale : La couverture végétale s'améliorera alors dans les zones traitées permettant du coup l'augmentation de la capacité de charges des aires de pâturage.

– la productivité agricole ainsi que la production agricole s'améliorera.

– la gestion des ressources naturelles : les paysans comprendront la nécessité et adopteront alors une gestion rationnelle des ressources naturelles permettant la valorisation et l'exploitation durables des terrains aménageables en culture sur *tanety*.

– les revenus : la gestion rationnelle des ressources naturelles ainsi que la croissance de la production entraîneront alors une augmentation des activités génératrices de revenus.

– le PLAE conduit à un respect mutuel et à une meilleure cohésion sociale.

– les aspects méthodologiques : l'aptitude de la population concernée à la planification de toutes activités (autocontrôle) est renforcée et l'approche méthodologique « PLAE » est appliquée par d'autres projets ou programmes.

– les perspectives institutionnelles : des partenariats se créeront dynamisés par l'équipe du PLAE Marovoay transformés entre temps en ONG.

3. Moyens et contraintes

3.1 Structures et personnel

L'Unité de coordination est basée à Mahajanga, elle comprend une coordinatrice nationale, un gestionnaire de fonds et une secrétaire de direction et du personnel d'exécution. Cette structure est appuyée à temps partiel par un CTP, un CT et des consultants internationaux et locaux. Le centre de formation est en cours d'installation, il dépend de l'unité de coordination et sera établi à Marovoay. Son personnel est limité à un Coordinateur qui s'appuiera sur l'antenne en place et sur des intervenants externes dont certains collaborent déjà avec le PLAE. L'antenne de Marovoay est composée d'un chef d'équipe, de son adjoint, de trois Conseillers auprès des organisations paysannes (COP), de huit techniciens de l'environnement (TE) et du personnel d'exécution.

L'antenne d'Ambositra-Soavina vient de démarrer et son personnel est en nombre réduit, mais il aura la même composition que celle de Marovoay. Les COP sont sociologue, géographe, agronome ou forestier. Les TE sont spécialisés dans l'ani-

mation, l'élevage, l'agroforesterie et l'agriculture. Chaque équipe doit comprendre les spécialistes nécessaires à son travail dans la région où elle se trouve.

Les moyens financiers pour la phase actuelle (PLAE II) sont de cinq millions d'euros étalés sur cinq ans, mais en ce moment, nous préparons le PLAE III dans le cadre d'une rallonge budgétaire déjà accordée de quatre millions d'euros.

3.2. Contraintes

L'harmonisation des approches et de l'accompagnement du monde rural dans une même zone d'action est indispensable, mais elle est difficile à obtenir si les intervenants sont multiples et dépendent de services différents. L'une des composantes qui est l'approche participative ne doit pas rester seulement verbale, mais doit comporter un partage des aspects matériels, financiers et des responsabilités.

L'éloignement des sites d'implantation des antennes entre eux et par rapport à l'unité de coordination entraîne une augmentation du travail d'installation méthodologique et matérielle. L'un des principaux moteurs de l'investissement à long terme par les populations est la sécurisation foncière. Nous avons besoin de facilitation (matérielle) et accélération (administrative) pour répondre à une demande proche des besoins des populations.

3.3. Stratégie

L'État malgache développe une politique générale de décentralisation, caractérisée par le désengagement des institutions étatiques, la responsabilisation des acteurs sur le terrain, le développement du partenariat et la privatisation.

Le programme se définit comme un appui à l'auto organisation des acteurs de la gestion des petits bassins versants. Le PLAE joue le rôle d'un bureau de conseil et d'accompagnement, il participe à une activité d'éducation réciproque au sens de conduire des actions ensemble vers un même but.

Le PLAE a développé des modifications dans l'attitude des populations intéressées. Le partenaire s'est transformé actuellement en acteur responsable de ses interventions et de son pouvoir dans la gestion des bassins versants. La prise en charge par les populations de la diffusion des acquis techniques est réelle. L'autonomisation des structures villageoises et leur formalisation sont en cours pour qu'elles prennent entièrement en main les actions.

Les partenaires et l'équipe du programme utilisent de nombreuses idées provenant du développement participatif, de la recherche-action et autres méthodes, mais ils cherchent surtout à mettre en pratique les procédés et instruments répondant le mieux possible aux situations, aux conditions sociales ou techniques rencontrées dans leur environnement immédiat en veillant surtout que l'appropriation par les populations soit assurée pour le long terme.

3.4. Principes de partenariat du PLAE

La demande de collaboration est faite par le groupe cible et la responsabilisation de la population est la plus entière possible. Le diagnostic de la situation,

l'élaboration des solutions, la planification et la réalisation sont discutées conjointement, négociées et décidées finalement par les villageois. En cas de non-respect des accords de collaboration ou d'absence de participation, les activités sont suspendues.

3.5. Contributions du PLAE aux populations

Le programme apporte :

Un soutien technique général et un transfert de savoir-faire complémentaire à leurs connaissances et reproductible dans les conditions locales.

Un appui à l'auto-organisation selon les choix de structuration faits par la population.

Une assistance à la mise en place des méthodes et instruments de programmation et de suivi.

3.6. Contributions matérielles

Elles sont ponctuelles, limitées aux résolutions des problèmes qui risquent de bloquer les travaux et dont les solutions ne sont pas à la portée de la population comme le prêt de matériel de pépinière et la fourniture de semences, boutures et sachets pot. Ces aides sont apportées au moment du démarrage, par la suite, les populations doivent trouver progressivement elles mêmes les moyens matériels nécessaires. Il n'y a aucune contribution financière directe.

3.7. Groupe cible et zone d'intervention

Le Programme s'adresse au groupe cible représentant l'ensemble des utilisateurs des SBV, les propriétaires des *tanety*, les riziculteurs concernés, les éleveurs, les charbonniers et tous les groupes intéressés comme les écoles, mairies, associations diverses.

L'implantation des zones d'action est faite sur la base du principe de la tache d'huile en choisissant des points principaux répartis autour du périmètre irrigué en formant ainsi des zones d'intervention à partir desquelles se font les extensions en fonction des requêtes de la population.

4. Résultats

Pour l'antenne 1 du PLAE à Marovoay au 28/08/05 :

Une Zone d'intervention de dix communes comprenant 72 *fokontany*, soit 131 villages.

Les SBV¹ touchés sont au nombre de 32, c'est-à-dire 120 sites d'intervention prioritaires et 20 carrières, soit 1 700 ha traités, protégeant 6 000 ha de rizières.

¹ SBV Nous appelons sous-bassin versant (SBV) : L'unité de BV primaire entier par rapport au point de concentration de l'écoulement qui est aussi souvent celui de l'ensablement à l'arrivée sur la rizière, les canaux d'irrigation ou de drainage.

1. Synthèses

Depuis le démarrage en 1998 les populations ont réalisé les mesures :

Mécaniques		Biologiques		Pépinières	Pastoralisme	
Fascines	3 577 m	Plantations d'arbres	200 000 plants	215000 plants	Aires pilotes de pâturage	30 ha
Cordons de paille	1 191 m	Haies vives	24 189 m		Multi. fourrages	60 ha
Cordons de pierres	620 m	Bandes enherbées	191 m			
Diguettes terres	1100 m					

Mots clefs : Lutte antiérosive ; projet ; Madagascar ; Ouest ; Hautes Terres ; ensablement.

Références bibliographiques

COLLECTIF, *Présentation générale*, Avril 2004 (PLAE)

Mission d'identification des nouvelles implantations du PLAE II

COLLECTIF, *Rapport d'atelier stratégique de démarrage du programme de lutte anti érosive* (PLAE II), décembre 2004

Agroforesterie au Rwanda : son efficacité et ses limites

DIETER KÖNIG

Pr Dr, département de géographie, Universität Koblenz
Universitätsstraße 1, D-56070 Koblenz, Allemagne
Courriel : dkoenig@uni-koblenz.de

1. Introduction

Le présent article donne un aperçu des études menées au sein d'un système agroforestier au Rwanda depuis 1985 (vingt ans). Le terrain d'expérimentation, qui fait partie du Projet agricole et social interuniversitaire (PASI) est situé à Butare au Sud du Plateau central rwandais. Les expériences ont été faites sur un sol ferrallitique fortement dégradé, qui est très acide (pH 3,8 à 4) et pauvre en éléments nutritifs. Les conditions agro-écologiques peuvent être caractérisées par une altitude de 1 700 m, une précipitation annuelle moyenne de 1 280 mm en dix mois (régime bimodal) et une température annuelle moyenne de 20 °C.

Les parcelles sont cultivées selon les méthodes de l'agriculture écologique agroforestière 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. Ses méthodes se ramènent à des expériences paysannes autochtones dans des régions d'Afrique densément peuplées, ses éléments principaux sont (König, 1992) :

- l'intégration des arbres et des haies vives dans les parcelles de cultures ;
- la mise en place de cultures associées ;
- la substitution de la jachère par l'emploi d'engrais verts (légumineuses) ;
- 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.

2. Résultats

2.1. Érosion et conservation des sols

Malgré une érosivité des pluies relativement faible (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 %). Sous 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, voir tableau 1). Des résultats comparables (jusqu'à 500 t/ha/an sur

sol nu, 120 à 250 t/ha/an sous cultures non protégées, 1 à 2 t/ha/an sur parcelles protégées par des haies vives) ont été obtenu par F. Ndayizigiye à Rubona (Roose, Ndayizigiye et Sekanyange, 1993 ; Roose et Ndayizigiye, 1996).

Les résultats obtenus sur la parcelle agroforestière 1 (voir tableau 1) montrent que la seule introduction de l'arbre 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 tonnes par hectare et par 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 que 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 1). Par contre, les haies arbustives – une fois installées – 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 fait à maintes reprises montrent que, à Butare, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les arbres autochtones *Maesopsis eminii* et *Polyscias fulva* (fig. 1). Pendant que les arbres exotiques (p. ex. *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 par hectare) coupée trois fois par an contiennent jusqu'à 105 kg de N, 47 kg de P₂O₅ et 26 kg de K₂O. La production de *Leucaena leucocephala* est inférieure à celle de *Calliandra*, qui est mieux adaptée aux sols acides et aux hautes altitudes. Ces chiffres de remontées minérales biologiques sont du même ordre que celles observées par Roose et Ndayizigiye, (1996).

Tableau 1. Évolution de l'érosion du sol sur les parcelles de mesure du 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 (1991/92 à 1993/94)).

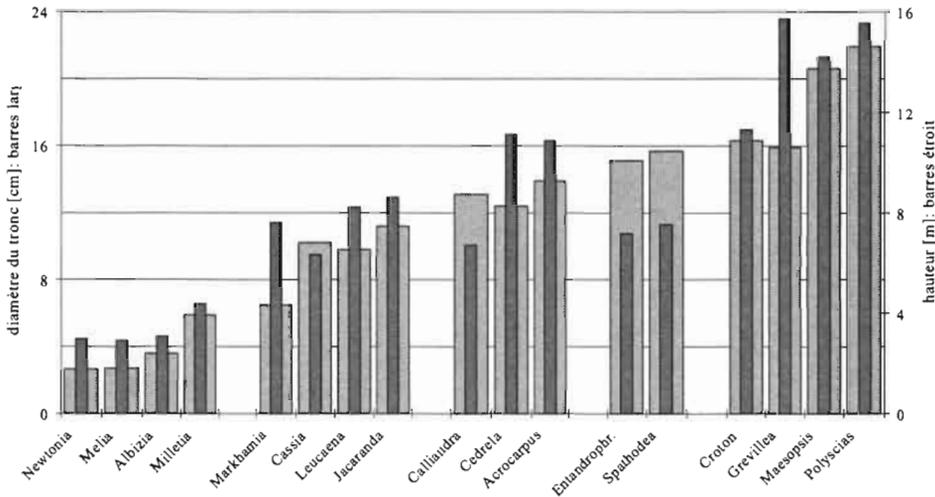
parcelle / traitement	Erosion du sol [t/ha/an]		
	1987/88 à 1989/90	1991/92 à 1993/94	changement relatif [%]
témoin A : jachère nue (témoin universel)	557	392	- 29,7
témoin B : cultures paysannes (manioc)	303	195	- 35,6
parcelles agroforestières :			
1 <i>Grevillea</i> + cultures associées sans protection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

Malgré leur forte croissance initiale, les herbes produisent beaucoup moins de biomasse que les arbustes. Cinq ans après leur plantation, les lignes d'herbes antiérosives (avec *Pennisetum purpureum* ou *Setaria splendida*) ont été fortement dégradées ou même disparues, tandis que les haies arbustives restent 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 purpureum* ou *Tripsacum fasciculatum*. Il en résulte une croissance tardive des arbres et une forte diminution de leur production en biomasse. Même après la baisse de productivité des lignes d'herbes et la disparition de la majeure partie des rhizomes d'herbacées, la croissance des arbres continue à souffrir du manque d'éléments nutritifs. Ce résultat souligne l'importance d'études à long terme. L'intégration de lignes d'herbes dans les systèmes agroforestiers est souvent conseillée et justifiée en raison de la production de biomasse supérieure et son effet antiérosif. La baisse de la produc-

tivité et de l'effet conservatoire reste souvent méconnue, la période d'observation des travaux de recherche étant souvent limitée à moins de trois ans.

Figure 1. Diamètre moyen et hauteur moyenne des arbres de dix ans sur le terrain d'expérimentation du PASI ; le choix se limite aux espèces à forte présence.



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 à 25 tonnes par hectare, 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

totale de la parcelle - peut produire presque autant de biomasse par ha et par an que des engrais verts qui occupent toute la parcelle. Une haie arbustive de légumineuses n'est pas seulement plus facile à entretenir, mais aussi beaucoup plus efficace en ce qui concerne la fixation d'azote et le recyclage des éléments nutritifs. Néanmoins, une amélioration de la fertilité des sols déjà fortement appauvris en éléments nutritifs ne peut pas être atteinte par des méthodes biologiques seules : sur ces sols, une application des engrais minéraux semble indispensable.

3. Conclusion

L'agriculture écologique agroforestière représente une stratégie efficace pour la conservation des sols. L'intégration des arbres (spécialement des espèces autochtones) et surtout l'intégration des haies de légumineuses dans des systèmes de production vivriers permet à la fois de sauvegarder la fertilité du sol et de couvrir le besoin en bois d'une population croissante de la superficie agricole. Elle contribue ainsi à réduire la dégradation des sols même hors de la surface cultivée.

Néanmoins, une amélioration des sols déjà fortement dégradés et appauvris en éléments nutritifs ne peut pas être atteinte sans fumure minérale supplémentaire. Vu les ressources très limitées du pays, la conservation des sols une fois améliorés et surtout la sauvegarde de la fertilité des sols toujours productifs par des méthodes biologiques est indispensable.

Références bibliographiques

- KÖNIG, D., 1992, « L'agriculture écologique agro-forestière - une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda », *Bull. réseau Érosion*, IRD-Montpellier, 12 : 130-139
- ROOSE, É., NDAYIZIGIYE, F., SEKANYANGE, L., 1993, « L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ? » *Cahiers Orstom, Pédol.*, 28, 2 : 327-349
- ROOSE, É., NDAYIZIGIYE, F., 1996, « Agroforestry and GCES in Rwanda », *Soil Technology*, 11, 1 : 109-119

2.

Processus d'érosion

Dégradation des terres dans les parcours de plaine en milieu méditerranéen subhumide, non forestier, le cas de la façade atlantique du Maroc

**ABDELLAH LAOUINA¹, MILOUD CHAKER¹,
RACHIDA NAFAA², ANTARI MUSTAPHA¹**

¹Chaire UNESCO-GN, faculté des lettres et sciences humaines,
Université Mohammed V - Agdal, Rabat, Courriel : cugn@wanadoo.net.ma
²faculté des lettres et sciences humaines, Université Hassan II, Mohammadia.

Problématique

L'élevage représente une part importante du PIB agricole du Maroc (26 % à 32 % selon les années) et le cinquième des emplois agricoles. L'essentiel des interventions s'est sans doute orienté sur le secteur du lait (élevage stabulé) et de l'aviciculture, alors que le secteur des viandes rouges continue à n'avoir que des performances modestes. Mais la stratégie vise actuellement l'amélioration génétique et de la couverture sanitaire, l'augmentation et la multiplication des ressources fourragères, et enfin à faciliter les conditions de commercialisation. La protection des terres contre la dégradation est un objectif exprimé par les politiques, mais les actions effectives pour l'atteindre restent limitées. Il est donc légitime d'évaluer la contribution des terres de parcours aux phénomènes de dégradation en cours, pour orienter l'action si nécessaire, dans une perspective de gestion conservatoire.

Une bonne partie de l'élevage est menée dans les parcours où de petits ruminants pâturent selon un mode extensif traditionnel d'élevage de pays naisseur. Cet élevage extensif a un avantage comparatif considérable dans les régions de steppes et de montagnes où l'amélioration de cette activité constitue la meilleure option possible d'aménagement et de gestion des ressources. Dans les régions subhumides qui ne représentent que 8,9 % du pays, l'agriculture, notamment en plaine, est nettement avantageuse, comparée à l'élevage extensif, même si ce dernier constitue un complément non négligeable, du fait de la forte productivité des parcours, en forêt (325 à 375 UF/ha), comme hors forêt (275 à 300 UF/ha).

Les parcours marocains, qu'ils soient forestiers ou steppiques, sont incapables de répondre aux besoins du cheptel en fourrage. Le déficit est plus ou moins prononcé selon les régions et explique les situations de dégradation du couvert vé-

géal et des sols. Ce déficit est plus ou moins comblé par les apports fourragers de complémentation. Dans les plaines et collines du Maroc atlantique, le déficit est accusé du fait des surfaces limitées laissées pour le parcours et qu'on peut assimiler à des jachères prolongées, alors que la forêt reste le seul espace continu, utilisé comme pâturage. Dans ces régions, l'élevage extensif est limité à des terres marginales et entre comme complément au système de culture, même là où il a représenté l'activité dominante dans le passé. Entre les espaces cultivés, des superficies limitées sont réservées au parcours et ne permettent pas, même avec l'appoint que représentent les chaumes et les jachères annuelles de couvrir les besoins en fourrage. Les deux provinces de Kénitra et Sidi Kacem, par exemple, enregistrent un déficit fourrager de près de 700 000 UF, que les sous-produits des cultures arrivent néanmoins à combler. Mais cela n'empêche pas les espaces de parcours, réduits à une mosaïque étriquée, d'être souvent soumis à une forte dégradation qui en fait des milieux de ruissellement et d'érosion prononcés.

La zone océanique subhumide du Maroc est caractérisée par des phases de pluies continues lors des passages de perturbations d'W en hiver et par une sécheresse totale de l'été. Le ruissellement est plus particulièrement consécutif à la saturation des sols. Dans ce cas, la dégradation est due à l'énergie des eaux ruisselantes qu'il s'agit de gérer correctement, en retardant le ruissellement et en dispersant l'énergie. Cette vulnérabilité à l'érosion est fonction du couvert végétal. Les terres dénudées sont généralement plus favorables au ruissellement que les terres forestières, de matorral ou les jachères peu pâturées. Le degré de pâturage introduit une nuance de taille et constitue un élément facilitant l'avènement du ruissellement par l'extension des taches dénudées et par le tassement des sols qu'il induit.

La recherche a visé les objectifs suivants :

- estimer la contribution des terrains utilisés comme parcours, dans les phénomènes de dégradation des terres en cours et dans les bilans à l'échelle d'un bassin-versant, dans les régions où l'élevage a tendance à être secondaire et où des transformations actuelles importantes tendent à remplacer le parcours extensif, par des systèmes plus productifs ;
- déterminer quels sont les effets du pâturage sur les risques de ruissellement / érosion en dégagant en particulier l'effet du surpâturage, du tassement, comparés à ceux de la mise en culture ;
- à partir des tendances évolutives actuelles en terme d'utilisation des terres, proposer des recettes d'aménagement, en vue d'adopter une perspective conservatoire.

Méthodes d'étude

- Observation de terrain, cartographie, enquêtes auprès des populations,
- Analyse et morphométrie des *processus* d'érosion,
- Simulation des pluies et analyse du comportement des terres (infiltration, humidification, ruissellement, perte en terre),

• Analyse du bilan hydrologique à l'échelle d'un petit bassin versant et suivi des paramètres de surface, en relation avec le ruissellement et l'érosion.

1- Les parcours collectifs de Ksar el Kébir, source d'érosion importante, au milieu de terrains cultivés plus stables.

1-1-Présentation

Dans les collines marno-calcaires de Ksar el Kébir, le finage est remarquablement organisé puisque chaque *douar* possède un terroir de jardinage, où les cultures sont étagées, un petit parcours collectif débouchant sur le *douar* et un large terroir de céréaliculture, de légumineuses et de cultures industrielles. Dans le parcours, le matorral constitué de lentisque et d'oléastre, ne subsiste que très localement, notamment à proximité des lieux saints. Ailleurs, la végétation secondaire dominante est le palmier nain à touffes de thym, les annuelles comme l'asphodèle et la carotte sauvage, alors que les graminées et les légumineuses sont sur-pâturées.

Les parcours étaient déjà fortement ravinés en 1986, essentiellement autour des douars et le long des axes empruntés quotidiennement par le bétail. Le sol est fortement décapé, tout en conservant des buttes coiffées de palmier nain, mais dont les racines sont mises en saillant, exposées au dessèchement rapide. Dans ces secteurs, le ruissellement s'organise très tôt à l'amont des collines pâturées et donne de fortes incisions sur les bas de versants cultivés. Par contre dans les portions de parcours relativement protégés, la dégradation des sols est plus faible. Le passage du parcours à la terre labourée, sur le même versant, se fait d'une façon graduelle, sans rupture de pente. Le ruissellement se fait donc en nappe et n'aboutit pas au stade des incisions.

1-2-Mesure du ruissellement et de l'érosion hydrique

Plusieurs paramètres ont été mesurés, par simulation des pluies, notamment l'humidité des sols (humidité initiale, évolution de l'humidité et humidité de saturation ou de stabilisation), le ruissellement (déclenchement, évolution, fréquences et infiltration finale), la perte en terre (la charge en sédiments exprimée par la turbidité en g/l et la dégradation spécifique en g/m²). A l'échelle globale, on remarque une grande variabilité entre les différents sites étudiés ; la réponse à la précipitation est très forte dans les parcours alors que les cultures ne ruissellent que si le sol est déjà fortement humide. Le coefficient de ruissellement le plus élevé est de 82 %, enregistré dans un parcours très dégradé. Mais, les eaux ruisselantes à partir des parcours donnent moins de turbidité (4,5g/l en moyenne), alors que dans les terres des cultures qui ruissellent moins, la turbidité est importante (23,4g/l en moyenne).

L'humidité de déclenchement du ruissellement varie d'un traitement à l'autre. L'état de surface des parcours portant une pellicule de battance ou des plages de tassement du sol initie un ruissellement précoce ; cette raison peut expliquer

également la manifestation du ruissellement dans les parcours même en saison sèche, après une pluie brève et sans humectation du sol. Tandis que les terres de cultures enregistrent un déclenchement du ruissellement lié essentiellement à l'acquisition d'une humidité maximale que l'on peut décrire comme un état de saturation avancée.

La pluie d'imbibition, déduite de la lame précipitée avant le déclenchement du ruissellement - soit la lame infiltrée - varie selon la saison et le taux de saturation du sol. L'humidité initiale est déterminante. Ainsi en janvier 2000, il a fallu une pluie artificielle inférieure à 8 mm pour générer le ruissellement, sur des sols humides, tandis qu'en novembre 1998, le ruissellement a exigé des pluies de 10 mm à 13 mm dans les parcours dégradés et de 30 mm à 40 mm dans les terres de cultures. Le parcours au sol conservé n'a par contre pas produit de ruissellement après une chute de 50 mm.

L'analyse fréquentielle permet de déceler certaines tendances. D'abord, les maximums les plus forts sont enregistrés dans les parcours très dégradés. L'état alarmant des sols des trois sites analysés justifie cette forte génération de ruissellement. Ensuite viennent les parcours moyennement dégradés ou ayant un sol épais et structuré. Les terres de cultures enregistrent des maxima élevés quand le sol est gorgé d'eau, mais la moitié des cas n'ont pas ruisselé, en période sèche, notamment.

L'interprétation des ruissellements cumulés (en mm) permet de dégager les tranches infiltrées en relation avec la saison (humidité préalable du sol) et l'état de surface. On distingue deux situations dans les parcours : les parcours dégradés où la tranche infiltrée en saison sèche est très importante (entre 70 % et 80 % de l'apport pluvial) et beaucoup plus réduite en saison humide (entre 20 % et 40 %) ; les parcours au sol conservé où la tranche infiltrée atteint 45 % de l'apport pluvial en saison humide et la totalité de la lame de pluie en saison sèche.

Dans les cultures, en saison sèche, aucune des parcelles n'a ruisselé. Après des premières pluies d'automne, une croûte de battance s'est constituée favorisant le ruissellement ; cependant la tranche infiltrée reste importante. En saison humide, après imprégnation profonde des sols, les cultures peuvent générer un ruissellement assez fort. Le sol encroûté et fermé dans les céréales a permis le ruissellement de 50 % de l'apport pluvial. Les cultures semblent donc apparemment plus protectrices vis-à-vis du ruissellement ; mais jusqu'à un certain seuil d'humidité et d'intensité de la pluie. Lors des chutes exceptionnelles, les cultures peuvent favoriser un ruissellement très important. C'est ce qui avait été observé dans d'autres régions du Maroc à Aïn Dik (Kalman, 1970) et en Mamora (Laouina *et al.*, 1992 ; Nafaa *et al.*, 1997).

La conservation de l'eau dans les sols des parcours, leur tassement par piétinement et la formation de la croûte de battance constituent les facteurs qui classent ce genre d'utilisation des terres, comme le plus générateur de ruissellement, ce qui explique l'extension des formes d'érosion qui les marquent. Leur situation to-

pographique en amont des terres des cultures de l'aval, explique le départ d'eaux ruisselantes issues des parcours, pouvant générer des dégâts en aval.

Les résultats obtenus en ce qui concerne le ruissellement ne sont pas confirmés par l'analyse de la turbidité et de la perte en sol. Dans les terres de parcours, la turbidité est moins importante que dans les terrains cultivés, du fait du rôle de la végétation qui maintient le sol. Par contre dans les terres de cultures, si le ruissellement est moins important, les eaux sont beaucoup plus chargées. En ce qui concerne la perte en sol, la jachère et le labour produisent plus de sédiment pendant la saison humide quand le sol est très gorgé d'eau. Mais la dégradation spécifique dans les parcours peut dépasser celle qui est enregistrée dans les terres de culture à cause de l'importance des volumes d'eaux ruisselées.

L'évolution actuelle est significative d'une exagération des phénomènes érosifs. En plus de la forte charge pastorale sur ces parcours, considérés de plus en plus comme aire de repos des animaux, et les prélèvements excessifs sur les espèces ligneuses pour les besoins énergétiques, nous assistons à l'éclatement de l'habitat et à son glissement sur ces parcours. Cette nouvelle tendance de dispersion de l'habitat sera accompagnée par l'ouverture de nouveaux sentiers et l'accentuation du piétinement et de l'érosion. La dégradation des parcours collectifs semble donc contribuer largement à la réactivation des *processus* érosifs, ce que les mesures effectuées ont parfaitement confirmé. Cette évolution, dans un contexte de pression démographique, ne se vérifie pas dans la région de Rabat, où l'évolution socioéconomique est beaucoup plus marquée.

2-Les parcours des Shoul au Sud-Est de Rabat

La région des Shoul, au S.-E. de Rabat, correspond à une zone de banlieue de grande ville, en pleine transformation. Deux phases importantes ont marqué les stratégies et les techniques de gestion des terres dans la région.

– Jusqu'au début du XX^e siècle, la dominance pastorale est effective, avec une utilisation très extensive des terrains ; la forêt représentait encore le couvert dominant. La phase coloniale (1912-1956) a nettement marqué le paysage agraire par la mise en place de nouveaux systèmes d'exploitation des terres. Près de 10 % des terres de la tribu ont été accaparées par les colons. Cette main mise a été accompagnée par le glissement des populations rurales vers les terres marginales, situées sur les rebords des plateaux et sur les pentes des vallées. Depuis lors, la région a connu la transformation de la forêt et du matorral, sur les pentes fortes des vallées, en terrains de céréaliculture pluviale et en parcours saisonniers (Coelho *et al.*, 2002).

– L'appropriation citadine a débuté avec l'avènement de l'indépendance, l'implantation de fermes modernes pour une bourgeoisie citadine et le développement des cultures irriguées à partir des eaux de la nappe phréatique.

L'agriculture en sec a connu quelques mutations notamment l'introduction des semences sélectionnées et des engrais chimiques. Certaines spéculations comme l'orge qui avait un double usage (alimentation humaine et du bétail), sont ac-

tuellement réservées au bétail. Devant l'incertitude des rendements des cultures, l'élevage reste une nécessité pour équilibrer le budget du ménage et constitue l'une des plus importantes vocations de la région. Le cheptel, est composé en majorité d'ovins, suivis de bovins. Toutefois, il faut rappeler qu'il s'agit de petits éleveurs et que les pratiques d'élevage exercées sont des pratiques traditionnelles héritées, basées essentiellement sur la vaine pâture.

Le parcours en forêt, notamment dans la forêt de la Mamora, sur le matorral dégradé des pentes fortes des vallées, sur les chaumes et friches et autour des dayas est encore la règle, alors qu'une faible partie des éleveurs pratique la stabulation. Les éleveurs comptent de plus en plus, pour l'alimentation de leur bétail sur la complémentation fourragère pendant la saison pluvieuse, les chaumes pendant l'été, les jachères et les parcours au printemps.

La vaine pâture assurait une égale répartition de la fumure organique entre les parcelles cultivées. Aujourd'hui, avec les clôtures et la vente de fumier aux fermes irriguées du plateau, seules quelques parcelles de jardinage, proches des maisons continuent à recevoir le fumier ; cela induit des comportements hydrologiques différents d'une parcelle à l'autre, en fonction de la stabilité des agrégats des sols. La fertilisation chimique est de plus en plus répandue ; mais elle est mal maîtrisée, et ne peut permettre de corriger le déficit des sols, alors qu'elle améliore la productivité et donc la densité de recouvrement. Les résidus de cultures et de la jachère, autrefois entièrement broutés, restent aujourd'hui intacts dans certaines parcelles clôturées et non pâturées. C'est une preuve que, localement, il y a une certaine amélioration des conditions hydriques et donc la création de cellules spatiales capables d'absorber les excès locaux de l'eau, ayant entamé un processus de ruissellement.

Le suivi du comportement hydrologique du bassin Matlaq durant la période d'étude (2001 à 2003) a permis de recenser plus d'une dizaine de crues qui s'étaient en majorité sur les mois de novembre et décembre. Ces crues à caractère brutal (temps de réponse <5 mn) sont responsables de la mobilisation d'importantes quantités de sédiments de taille variable, issus du décapage des horizons de surface du sol et des arrachements directs au niveau des chenaux. Les produits charriés sont importants aussi bien par leur masse que par leur taille avec notamment des galets décimétriques.

Une dizaine d'épisodes de crue ont été enregistrés de 2001 à 2003. Les volumes pluviométriques supérieurs à 20 mm/jour, sont une condition de déclenchement des ruissellements, sauf en cas de succession de jours pluvieux antérieurs. Mais les intensités sont plus décisives. Les classes d'intensités supérieures à 20 mm/h, mais encore plus celles dépassant les 40 mm/h ne sont enregistrées avec une fréquence significative que d'octobre à décembre.

Le fonctionnement varie. On a des cas d'épisodes succédant à des journées de pluie antérieure avec imprégnation importante des sols, comme cela a été le cas en novembre 2002 (crues du 19, puis du 23/11) Les pluies s'étaient succédées, à partir du 14 novembre, avec des volumes précipités importants, mais des intensi-

tés modérées. Mais on a aussi des cas de ruissellement brutal, dès le premier jour de pluie ; de très fortes intensités ont vite fait d'initier le ruissellement, à un moment où le sol est encore sec, mise à part la pellicule superficielle ; par exemple, l'humidité du sol était inférieure à 3 % à 5 cm de profondeur du sol, le 6 octobre 2003, jour de crue importante, suite à une intensité qui a dépassé 49 mm/h. La réponse hydrique du bassin, à l'exutoire est enregistrée 5 à 10mn après l'enregistrement de l'intensité pluviométrique maximale. Le débit de pointe, le 24/12/01 a atteint 590 l/s, pour un volume écoulé de 1000 m³, ce qui représente environ un coefficient de ruissellement de 8 %.

Dans toutes les crues enregistrées, le taux de recouvrement végétal moyen du bassin - versant était inférieur à 25 %, en considérant la totalité des parcelles incluses dans le bassin. En cette période automnale, les champs sont soit encore en jachère pâturée, débarrassée de tout résidu de culture par le parcours excessif d'été, soit déjà labourés et donc entièrement dénudés, face à l'impact des pluies. La succession des phénomènes peut se décomposer ainsi : le parcours excessif estival, du fait de la consommation des résidus végétaux du printemps et du fait du piétinement donne un sol à la fois dénudé, tassé, mais dont les particules de surface sont effritées. Les premières pluies d'automne reprennent ces particules faciles à mobiliser, les étalent et les tassent en surface sous forme de croûtes sédimentaires épaisses et compactées (valeurs de pénétromètre atteignant 4,5 hg/m²). La rugosité est fortement abaissée. Dès l'intervention d'une précipitation intense, le sol même sec permet alors le fonctionnement d'un ruissellement direct très intense.

Le problème est d'établir des connexions entre la pluie, le ruissellement et l'ablation aréolaires, le fonctionnement des griffes sur les versants et l'érosion sur le chenal. Quelle est la provenance des matériaux emportés par le chenal, s'agit-il d'un transport superficiel généralisé ou d'une remobilisation axiale localisée ? Y a-t-il une continuité amont - vallons - aval ? L'érosion part - elle de champs particuliers par exemple, les champs labourés griffés ou est-elle plus générale ? Quel est le rôle joué par quelques parcelles représentant des barrages, car couvertes par la végétation ou entourées par des haies vives, dans l'absorption du ruissellement alors que sur les versants à champs continus, ces relais n'ont pas d'effet ?

Dans tous les cas, la région des Shoul, du fait de l'émigration en ville, du recul de la mise en culture des terrains en pente, du comportement individualiste marqué par les clôtures de fil de fer connaît des évolutions qui ont tendance à réduire la vaine pâture et plus globalement l'élevage extensif. La conservation sur les parcelles des résidus de cultures et la moindre pression animale sur les jachères de longue durée permettra sans doute de réduire le ruissellement et l'érosion sur les versants.

3. Conclusion

Les parcours en zone subhumide de plaine n'occupent sans doute qu'une faible proportion de terrain, comparés aux espaces cultivés. Mais leur contribution au

ruissellement et à l'érosion est importante. Les nuances sont multiples, fonction du degré de pression sur le couvert végétal ; mais le plus important, ce sont les évolutions actuelles, pleines de menaces de déstabilisation, dans certains contextes, ou au contraire de promesses de réhabilitation de la qualité des terres, là où la pression a tendance à baisser.

La tendance en terme d'aménagements agraires indique que la vaine pâture traditionnelle est en voie de disparition et à l'inverse une tendance au stationnement des bêtes sur des parcelles clôturées avec du fil barbelé ou du cactus (*Opuntia*). Le fumier n'est donc plus naturellement distribué dans l'espace, et la fertilisation est donc réduite ; à l'inverse, ce fumier est vendu dans des fermes d'irrigation du plateau. Par contre, les clôtures expliquent la conservation de résidus de cultures et des herbacées hivernales des jachères, dans les parcelles non visitées par le bétail ; la multiplication des cellules mieux végétalisées permettra dans l'avenir de réduire l'impact du ruissellement issu des parcelles les plus productrices d'eau, par effet d'infiltration des eaux en excès dans ces « parcelles-barrages ».

Les tendances actuelles d'évolution ne mènent pas nécessairement à des catastrophes écologiques, comme c'est souvent prédit dans les études. On a de nombreux cas d'évolutions positives, pratiquement automatiques.

L'évolution de ces milieux fragiles vers un paysage de bocage, avec un élevage à faibles déplacements et des cultures fourragères de complémentation constitue sans doute l'option de gestion conservatoire la plus simple et la plus économiquement rentable pour les paysans de la région atlantique du Maroc.

Références bibliographiques

- COELHO, C. O. A., FERREIRA, A. J. D., REGAYA, K., LAOUINA, A., HAMZA, A., BOULET, A. K., KEIZER, J. J., 2002, « The role of land-use changes in reservoir siltation in the Maghreb region and its implications for rural planning », HYDROMED : séminaire international des petits barrages dans le monde méditerranéen, Tunis, 28-30 May 2001
- DEBAZAC, E., ROBERT, P., 1973, *Recherches relatives à la quantification de l'érosion*, document n° 4, Publications du projet érosion, FAO, Rabat
- HEUSCH, B., 1970, « L'érosion dans le Prérif : une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Prérif occidental », *Annales des recherches forestières*, 12
- IAV HASSAN II, UTAH STATE UNIVERSITY, 1993-1994, Le développement des zones de parcours au Maroc.
- KALMAN, R., 1976, « Etude expérimentale de l'érosion par griffes », *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 13, 5 : 395-406
- LAOUINA, A., CHAKER, M., NACIRI, R., NAFAA, R., 1992, « L'érosion anthropique en pays méditerranéen, le cas du Maroc septentrional », *Bull. Assoc. des Géogr. Fr.*, 5 : 384-398
- NAFAA, R., LAOUINA, A., WATFEH, A., 1997, « Occupations des sols et dégradation des terres dans la Mamora », *Méditerranée*, 1, 2 : 45-53

Ancienneté et vitesse d'érosion des *lavaka* à Madagascar

M. MIETTON¹, J.-C. LEPRUN², R. ANDRIANAIVOARIVONY³,
M. DUBAR⁴, M. BEINER⁵, J. ERISMANN¹, F. BONNIER¹, E. GRISORIO¹,
J.-P. RAFANOMEZANA⁶, P. GRANDJEAN⁷

¹Université J. Moulin-Lyon III, Courriel : mietton@univ-lyon3.fr ;

²DR IRD, Montpellier

³maître de conférences archéologie, faculté des lettres, Université d'Antananarivo

⁴DR CNRS Sophia Antipolis ;

⁵CR CNRS Strasbourg ;

⁶Hydrologue BRL Madagascar

⁷Cirad Chef du Projet BV Lac

Abstract

A *lavaka* is an emblematic landform in Madagascar. The processes leading to their genesis are relatively well defined. On the contrary, the speed of their evolution and therefore their age are not definitely known. On a large time scale, the relative age of the large *lavaka* is confirmed by the discovery of a site of ancient settlement of the fourteenth century in a *lavaka* of the Ankarafantsika forest in the north west of Madagascar. These landforms precede the arrival of man in Madagascar and are related to paleoclimatic variations. On a short time scale, the silting up of the dam lake of Bevava at the south east of lake Alaotra appreciated on an interval of almost twenty years makes it possible to measure a specific erosion of 2 000 tons/km²/year for a density of 8 *lavaka* /km² on an area of 58 km²

1. Introduction

Bon nombre d'auteurs se sont penchés sur la question de la genèse des *lavaka*. Les hypothèses rendant compte de ces formes spectaculaires ont été particulièrement regroupées par F. Bourgeat (1972), N. Andriamampianina (1988), M. Petit (1965, 1998) ou plus récemment par H. Mulder et O. Idoe (2004) :

– l'une des théories attribue un rôle prépondérant à l'action de l'eau interne dans les sols, poche d'eau ou nappe phréatique, celle-ci provoquant un sapement au lieu d'émergence. Parmi les principaux défenseurs de cette théorie, on peut citer C. Guigues, P. Brenon, J. Tricart, C. Robequain, A. Guilcher.

– l'autre accorde, en particulier avec J. Riquier (1954), une plus grande importance au ruissellement qui décape l'horizon superficiel compact des sols et permet à l'eau d'atteindre l'horizon meuble sous-jacent. La progression des *lavaka* se fait

par éboulements successifs de blocs compacts lorsque ceux-ci sont suffisamment affouillés à leur base.

– Selon nous, les deux types de *processus* se combinent, avec probablement une priorité aux mécanismes de circulation interne de l'eau, si l'on fait notamment le constat qu'une proportion importante de *lavaka* ne présente pas un grand axe dans le sens de la plus grande pente.

L'action des eaux internes est à mettre en rapport avec les modalités d'une part de leur concentration, d'autre part de leur connexion ou non avec les nappes des fonds de vallées voisines, ces deux facteurs étant eux-mêmes en relation avec les discontinuités éventuelles du profil pédologique permettant le perchement ou non de nappes dans des altérites de versants, enfin avec l'épaisseur de ce profil et l'importance du bassin hydrogéologique amont. Ainsi dans la vallée Mariananina, au Sud-Est d'Ambatondrazaka, il est remarquable de constater que le premier gradin qui domine de 50 m à 80 m, sur chaque rive, le fond de la vallée, est indemne de toute incision, tandis que les niveaux supérieurs et à plus grande distance latérale de la vallée sont criblés de *lavaka*.

Par ailleurs, bon nombre de *lavaka*, particulièrement dans la région d'Antanana rivo mais pas seulement, ont une origine anthropique, en tant qu'anciens fossés défensifs (Mille A., 1970) ayant canalisé les eaux de ruissellement ; fossés circulaires autour des rovas ou tunnels, aujourd'hui effondrés, dans l'axe du versant, ayant servi à la collecte d'eau dans les plaines voisines tout en échappant au regard.

Mais quelle est l'ancienneté de ces formes, à quelle vitesse évoluent-elles ? Les informations sur ce point sont beaucoup plus rares. C'est là l'objet de notre étude, qui se situe à deux échelles de temps.

2. L'ÉROSION DANS LE TEMPS LONG : L'ANCIENNETÉ DES LAVAKA ?

Pour qui connaît Madagascar, il existe incontestablement une dynamique érosive actuelle, affectant un manteau d'altérites épais (d'épaisseur décamétrique), mis en déséquilibre de façon probablement récente à l'échelle des temps géologiques. En témoignent la fraîcheur de bon nombre de formes de dissection linéaire tout comme l'importance des transports solides et la turbidité des cours d'eau. Pour autant une reconnaissance plus approfondie montre qu'une ancienneté relative de l'érosion ne fait aucun doute.

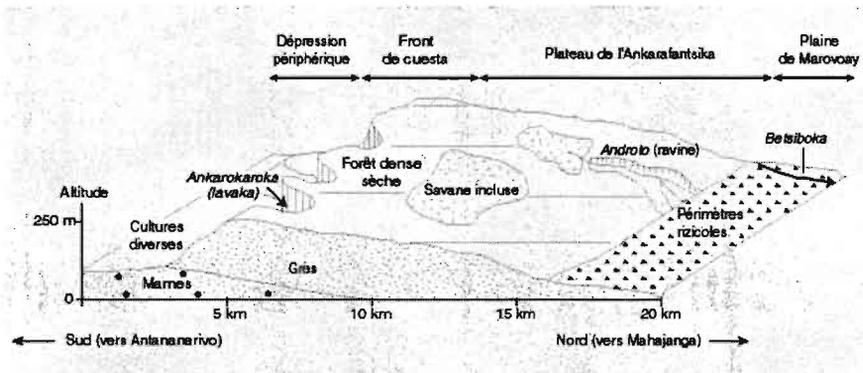
Ce constat avait été fait bien avant nous, en particulier par F. Bourgeat, qui insiste sur l'existence de *lavaka* anciens. A notre connaissance, l'auteur est le seul à donner, par datation d'un sol tourbeux fossilisé par colluvionnement issu d'un *lavaka*, un âge du moins relatif à ce dernier. L'horizon organique est daté de 11 850 +/- 400 ans. L'auteur insiste justement sur l'influence des variations paléoclimatiques pour expliquer ces anciens *lavaka*, antérieurs à l'apparition de l'homme à Madagascar.

Dans la forêt de l'Ankarafantsika, au Nord-Ouest du pays (fig. 1), nos constats vont dans le même sens :

2. Processus d'érosion

- d'une part, certains *lavaka* de grande taille apparaissent complètement recolonisés par la végétation ;
- d'autre part, sur le front de cuesta de l'Ankarafantsika, on observe tout à la fois de grandes éventrations (Ankarokaroka), beaucoup plus longues et profondes que les *lavaka* des Hautes Terres, ayant probablement réclamé du temps pour leur genèse, sans aucune plage de sédimentation fraîche sous forme de cône à l'exutoire, et des griffures ou ravines linéaires, récentes et accompagnées de dépôts bien visibles, même à travers la forêt dense. Des *processus* similaires mais liés à des agents différents peuvent conduire à des formes identiques, plus ou moins anciennes ;

Figure 1. Le massif de l'Ankarafantsika : morphologie, géologie et végétation.



– enfin, les tessons de poterie, découverts en 2002, à l'intérieur du grand canyon d'Ankarokaroka, attestent d'une ancienneté relative de ce grand *lavaka*. Le premier examen, macroscopique, réalisé par les archéologues malgaches, donnait déjà une valeur de témoins archéologiques intéressants puisque remontant selon R. Andrianaivoarivony au XV^e ou XVI^e siècle. Cette ancienneté a été confirmée depuis lors par une datation par le radiocarbone (Ly-12555. Âge 14C BP : -605 +/- 50. Âge calibré : de 1289 à 1421 ap. J.-C.)¹. Le *lavaka* est dès lors daté *relativement*, comme plus ancien que le XIV^e siècle. Ces témoins d'un habitat ancien ne peuvent être antérieurs au creusement du *lavaka* car ils n'auraient pu se maintenir sur un étroit replat, sur la paroi du canyon, à peu de distance de la corniche sommitale. Il s'agit là d'un site probablement défensif, pris entre la forêt dense sèche en arrière, et le ravin ; les rares témoins de poterie ayant été préservés grâce au glissement de sables blancs qui les ont en partie recouverts. Cette découverte nous conforte dans l'appréciation visuelle d'une permanence de l'érosion à l'échelle des temps longs, échelle historique de l'occupation progressive de l'île, ou plutôt de quelques millénaires.

¹ Ce repère est intéressant aussi comme témoin dans l'histoire du peuplement de Madagascar, histoire mieux renseignée jusqu'ici sur la côte orientale, où l'homme serait apparu durant les premiers siècles de notre ère.

En effet, c'est très probablement au cours de périodes displuviales du quaternaire récent que les conditions de rupture ou de crise morphogénique ont été réunies pour rendre compte de pareilles dissections, plus précisément lors du passage à des périodes plus humides faisant suite à des périodes arides, dont on retrouve justement la trace dans l'Ankarafantsika. En effet, dès 1997, nous avons retrouvé dans ce secteur les trois types de couvertures sableuses bien différenciées, décrites en partie par P. Segalen, entre sables mauves, sables beiges et sables blancs. L'examen granulométrique des sables mauves nous montrait l'importance du tri, qui ne pouvait être qu'éolien. Pourtant, c'est une mission avec J.-C. Leprun en 2002 qui a permis de retrouver là ce qui avait été reconnu préalablement par ce dernier à la latitude de la forêt des Mikae, à savoir la superposition de trois ergs sableux, dont la chronologie de mise en place est en cours d'établissement. L'examen des grains de sables au microscope électronique à balayage, révélant la trace de croissants de chocs éoliens, emporte la conviction. Il est donc clair que des épisodes arides, probablement peu anciens, se sont succédés dans cette partie du Nord-Ouest de Madagascar, où le climat actuel est un climat tropical contrasté mais avec une pluviosité de l'ordre de 1 200 à 1 500 mm. La couverture végétale y est une forêt dense sèche dans laquelle on note l'existence de savanes incluses qui témoignent elles aussi des périodes arides.

En résumé, les *lavaka* anciens n'ont pas attendu l'arrivée de l'homme pour se mettre en place à l'occasion de disparitions, d'origine paléoclimatique, d'un couvert végétal protecteur. Au demeurant, par la mise à feu, notamment en fin de saison sèche, des savanes incluses, l'homme reproduit de nos jours, sur des intervalles de temps évidemment plus courts, en début de saison des pluies ou plus durablement si l'on songe à la colonisation progressive des sols par des graminées cespiteuses très peu couvrantes (*Aristida barbicollis* représente un stade ultime de dégradation par le feu), des conditions de dégradation semblables à ce qu'elles étaient lors du passage d'un aride à un pluvial. Dès lors, on voit apparaître des formes de dissection similaires, même si elles sont de moindre ampleur que les grands *lavaka* anciens. Au total, à Madagascar, l'homme favorise cette évolution particulière des versants mais ne peut être tenu pour responsable de la plupart des grandes formes d'érosion linéaire.

2. LA VITESSE D'ÉVOLUTION DES LAVAKA À L'ÉCHELLE DES TEMPS COURTS

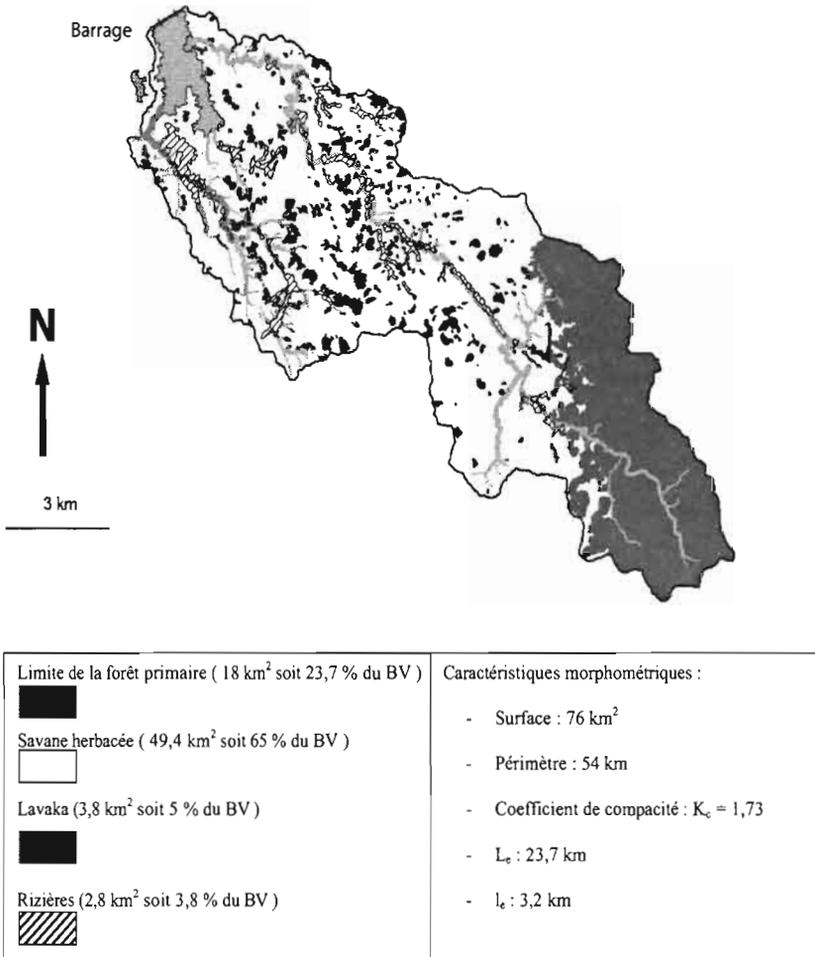
Cette vitesse est appréciée à l'échelle d'un bassin versant par mesures comparées d'envasement d'un lac de retenue (2,1 km²), celui du barrage de Bevava au Sud-Est d'Ambatondrazaka, sur les Hautes Terres. Au demeurant, l'objectif premier est ici de connaître la durée de vie de l'ouvrage, qui commande l'irrigation de 3 500 ha. dans les périmètres irrigués de la vallée Mariananina (région du lac Alaotra).

Ce bassin est de taille modeste (76 km²), de très faible compacité (Kc : 1,76), caractérisé dans sa partie amont par la présence de la forêt pluviale (23 % de la su-

2. Processus d'érosion

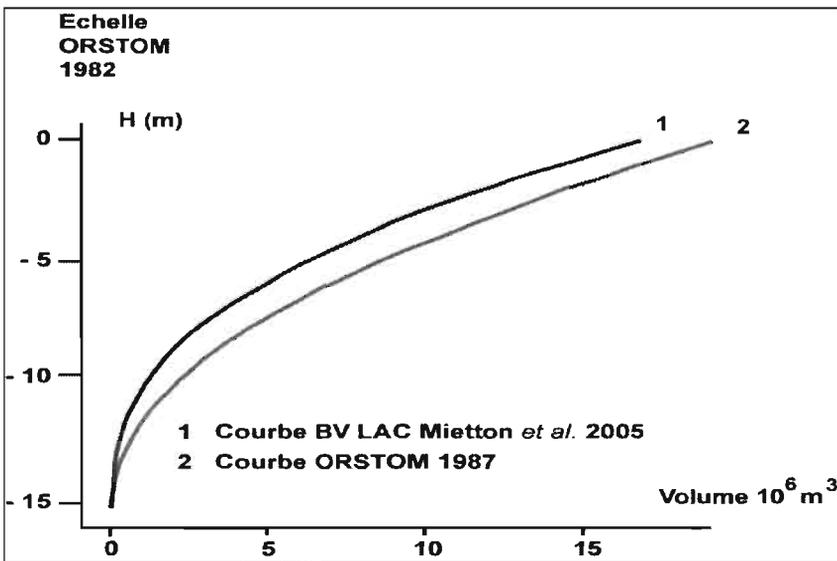
perficie totale) dépassant quelque peu la crête faîtière du premier escarpement oriental, plus arrosé, de l'île. Sur le reste du bassin, sous savane herbeuse, la prééminence d'une érosion par *lavaka* (fig. 2) est marquée. Le nombre de *lavaka* est de l'ordre de 440, couvrant environ 5 % du bassin. La densité rapportée à la partie du bassin hors forêt est de l'ordre de 8 *lavaka*/km², ce qui s'inscrit dans les fortes à très fortes densités selon Helisoa (1983).

Figure 2. Le bassin versant de Bevava (S.-E. d'Ambatondrazaka – Madagascar).



Les données d'envasement acquises fin juin 2005 par échosondage (950 points de mesure sur le lac) sont mises en relation avec des mesures antérieures (Ferry et Garreta, 1987) faites par l'ORSTOM en 1987 (fig. 3) et permettent d'établir une dégradation spécifique d'un ordre de grandeur de 2 000 tonnes/km²/an, ce résultat étant variable suivant les valeurs de masse volumique retenues (ces valeurs peuvent être comprises entre 1,2 et 1,8 tonnes/m³, en l'absence de mesures des densités réelle et apparente des vases). Il convient de parler seulement d'ordre de grandeur puisque les incertitudes sur la masse volumique sont grandes mais aussi sur les mesures de profondeur, liées à l'échosondeur lui-même (marge d'erreur de +/- 5 cm.) et à l'inégalité du plan d'eau au moment de la mesure (batillage). Il est intéressant de souligner que cette valeur apparaît cependant comme un standard régional puisqu'on la retrouve, dans un même contexte morphostructural et climatique sur le bassin versant et le barrage de la Sahamaloto en rive ouest du lac Alaotra (2 400 tonnes/km²/an avec $\rho_s = 1,8$ tonnes/m³).

Figure 3. Bathymétrie du lac de Bevava et dégradations spécifiques



Sans représenter un record mondial, ces valeurs de dégradation spécifique sont cependant imposantes. En effet, il faut :

- rappeler que la valeur enregistrée à Bevava se rapporte non pas à l'ensemble du bassin mais à seule la partie située en aval de la forêt pluviale. Si l'on prend en compte cette seule partie aval, l'ordre de grandeur de la dégradation à Bevava est plutôt de l'ordre de 2 200 tonnes/km²/an.

- préciser que ce bassin de Bevava a fait l'objet de mesures de restauration et de lutte contre l'érosion, notamment par boisement de *lavaka* et mise en place d'ouvrages protecteurs, depuis les années soixante jusqu'aux années 80 !

L'agressivité climatique R_{USA} calculée pour les années 1999 à 2004 sur quatre stations du bassin est de l'ordre de 400 à 500 points seulement mais il faut compter avec les accélérations de l'ablation lors des épisodes cycloniques relativement fréquents sur cette façade orientale de l'île.

Les recherches en cours ont pour but de préciser cependant ce que pourraient être les parts de sédimentation liées à :

- une érosion hydrique mécanique diffuse sur versants soumis chaque année à des feux de brousse dévastateurs ;
- une érosion par sapement latéral dans le lit même des cours d'eau.

La part de sédimentation liée au décapage des versants dominant le lac de retenue semble mineure si l'on observe que le remplissage est très inégal dans l'espace, lié aux apports du principal cours d'eau, la Sasomangana, au débouché de laquelle se développe une sorte de delta lacustre.

4. CONCLUSION

Les *lavaka* malgaches, du moins les plus grands d'entre eux, sont d'origine relativement ancienne, antérieurs à l'arrivée de l'homme dans la grande île au début de notre ère. Leur genèse est à rattacher à des variations paléoclimatiques, notamment des phases displuviales du quaternaire récent.

Toutefois, aujourd'hui, par des pratiques répétées telles que les feux de fin de saison sèche, l'homme reproduit des conditions similaires et favorise à son tour cette évolution particulière des versants.

Hormis les *lavaka* qui ont atteint leur profil d'équilibre et qui n'évoluent plus que par sapement latéral, leur vitesse d'évolution actuelle est remarquable. Les dégradations spécifiques rapportées à l'ensemble d'un bassin versant situé sur le bord oriental du fossé de l'Alaotra sont voisines de 2 000 tonnes/km²/an. Ces pertes en terre posent des problèmes non seulement au niveau des zones-sources mais plus encore en termes de sédimentation, tant au niveau des barrages qui assurent les besoins en eau d'irrigation qu'au niveau des plaines alluviales elles-mêmes, où l'exhaussement des lits et leur divagation génèrent des ruptures de digues catastrophiques sur le plan agricole. Pour autant, la fixation des *lavaka* s'apparente à un travail de Sisyphe, éternellement recommencé, du moins dans les régions comme celle de l'Alaotra, où le manteau d'altérites est particulièrement épais sur des substrats en roches tendres et riches en amphiboles.

Références bibliographiques ²

- ANDRIAMAMPINANINA, N., 1988, *Contribution à l'étude de la dynamique et de la stabilisation des lavaka à partir de quelques exemples*, mémoire de maîtrise, département de géographie, Université de Tananarive, 165 pp. et annexes
- BOURGEAT, F., 1972, *Les Sols sur socle ancien à Madagascar*, Mém. ORSTOM, n° 57, 335 pp.
- BURNEY, D. A., 1996, « Climate change and fire ecology as factors in the quaternary biogeography of Madagascar », *In Biogéographie de Madagascar*, ORSTOM, « Colloques et Séminaires » : 49-58

² Les références bibliographiques détaillées peuvent être demandées au premier auteur (michel.mietton@univ-lyon3.fr)

- COX, R., RAKOTONDRAZAFY, F. M., BAKOARINIAINA, N.L., 2003, « Geological controls on development of erosional gullies (*lavaka*), Central Madagascar », Abstract, The Geological Society of America (GSA).
- FERRY, L., GARRETA, P., 1987, *La Capacité de la retenue d'Antanifotsy, Etudes hydrologiques dans la région du lac Alaotra*, fascicule 7/86, 9 pp. et courbes
- HELISOA, O., 1983, *Les lavaka du socle malgache: distribution, évolution*, thèse Université Paris I, 334 pp.
- MIETTON, M., 1998, *Érosion dans le massif de l'Ankarafantsika et sur ses marges, Gestion des savanes incluses*, rapport pour Conservation internationale, PCDI Ankarafantsika, 22 pp.
- MIETTON, M., LEPRUN, J. C., DUBAR, M., BEINER, M., ANDRIANAIVOARIVONY, R., 2005, *Dynamique actuelle et paléoenvironnements dans la forêt et les savanes incluses de l'Ankarafantsika et ses marges (Nord-Ouest de Madagascar, arrière-pays de Majunga)*, actes de la table-ronde en hommage à R. Neboit, Clermont-Ferrand, mars 2004
- MIETTON, M., 2005, *Rapport de fin de mission Érosion à Ambatondrazaka (Madagascar) auprès du Projet BV Lac Alaotra, (22 octobre-6 novembre 2004)*, ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, Cirad, AFD, 39 pp.
- MIETTON, M., 2005, *Rapport de fin de mission Érosion à Ambatondrazaka (Madagascar) auprès du Projet BV Lac Alaotra, (15-22 juin 2005)*, Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, Cirad, AFD, 38 pp.
- MILLE, A., 1970, *Contribution à l'étude des villages fortifiés de l'Imerina ancien*, thèse 3^e cycle, Université de Clermont-Ferrand, 226 pp.
- MULDER, H., IDOE, O., 2004, *Lavaka the « hole » story, Analyses and design of an integrated bio-physical and socio-economic ISWC management approach to the lavaka phenomenon in Madagascar*, Érosion Soil and Water Conservation Group, Wageningen University, Environmental Sciences, 125 p.
- PETIT, M., BOURGEAT, F., 1965, « Les *lavaka* malgaches : un agent naturel d'évolution des versants » *BAGF.*, 4 ; 29-33
- PETIT, M., 1998, *Présentation physique de la Grande Ile*, ACCT, FTM, 192 pp.
- RABARIMANANA, M. H., RAHARIASON, L. J. R., CHOROWICZ, J., 2003, « Cartographie des *lavaka* par télédétection : analyse des facteurs et gestion des espaces ruraux à Madagascar », *Télédétection*, 3, 2-3-4 : 225-250
- RIQUIER, J., 1954, « Études sur les *lavaka* », *Mémoires de l'Institut scientifique de Madagascar*, série D, tome VI
- STRAKA H., 1996, *Histoire de la végétation de Madagascar orientale dans les cent derniers millénaires*, Symposium Biogéographie de Madagascar, Muséum Histoire naturelle de Paris, pp. 37-47

Modèle de fonctionnement en *lavaka* : rôle du drainage des rivières

MAMY HERISOA RABARIMANANA

Projet de gouvernance des ressources minérales (PGRM) B. P. 280, Lot II Y 20 bis
Ambaranjana 101 Antananarivo, Tél. : +261 20 22 543 13, Fax : +261 20 22 328 18
Courriel : rab_mamy@yahoo.fr

Résumé

Les *lavaka* (fig.1) sont une forme d'érosion particulière des Hautes Terres malgaches. Leur origine et leur mode d'évolution ont fait l'objet de nombreuses études mais suscitent encore beaucoup de questions. Quels sont les rôles relatifs des eaux souterraines et des eaux de surface ? Comment se déclenchent les *lavaka* ? La principale question est de savoir ce qu'il y a de si particulier à Madagascar pour pouvoir provoquer ce type d'érosion. La réponse à cette question devrait permettre de proposer des solutions pour limiter la dégradation des terres.

Parmi les facteurs possibles, il est apparu que le réseau de drainage est à considérer plus précisément, son efficacité à drainer les nappes souterraines (Rabarimana *et al.*, 2003). L'objet de l'étude est de vérifier cette hypothèse de l'efficacité du drainage des eaux souterraines. L'approche par télédétection couplée de SIG peut permettre une observation comparée de nombreux *lavaka*, sur de grandes surfaces, dans des contextes différents, à la recherche de ce qui leur est commun. Les observations de terrain sont complémentaires et permettent une description plus fine d'un petit nombre de *lavaka* pour en décrire certaines particularités. Cette approche combinée autorise une nouvelle recherche sur les facteurs qui interviennent dans ce type d'érosion.

L'étude a permis de proposer un modèle de fonctionnement en *lavaka* (fig. 2) qui semble résultant du sous écoulement dans une épaisse couche de sol dépourvue de couverture végétale. Le facteur d'état principal est la mise en charge de la nappe phréatique libre ou semi captive sous diverses formes d'induration superficielle notamment la carapace ferrallitique imperméable. Le drainage est limité d'une part par cette carapace ferrallitique et d'autre part par les alluvions imperméables qui remplissent certaines vallées, notamment les bas-fonds rizicoles, ce qui crée une surpression. L'érosion en *lavaka* se produit là où la carapace est affaiblie ou détruite. Les facteurs déclenchants (climat, déforestation, destruction, divers systèmes d'aménagement, mouvement tectonique et mouvements de masse) sont susceptibles de détruire la carapace. L'imperméabilité des bas-fonds, qui est parti-

culièrement importante dans les Hauts Plateaux de Madagascar explique l'abondance des *lavaka* dans cette zone centrale de l'île. Ainsi, la réduction du ruissellement par diverses méthodes de génie rural (DRS, CES, RTM) et la recherche du profil d'équilibre des *lavaka* par les méthodes du génie civil (barrage, fascinage etc..) semblent insuffisant pour arrêter totalement le phénomène. La prise en considération du drainage au niveau des sources présente un intérêt particulier dans la conception du plan d'aménagement de la zone concernée car la méthode de stabilisation fournit une source supplémentaire en eau pour l'irrigation.

Mots clés : *lavaka* ; soutirage ; carapace ferrallitique ; drainage ; télédétection ; SIG ; Madagascar .

Références bibliographiques

- BAILLY, C., VERGETTE, J. DE, 1961, «La correction des *lavaka*», doc. *Défense et Restauration des Sols* (DRS), Centre technique forestier tropical (CTFT), n° 14B, 9 pp.
- BARBIER, R., 1980, *L'Érosion souterraine à l'origine des lavaka de Madagascar*, Éditions Georges Thone, Liège, Belgique, pp. 17-21
- HEUSCH, B., 1981, *Les lavaka du lac Alaotra Madagascar*, Documents BRGM, 30 : 221-227
- HOEBLICH, J. M., 1992, « Le *lavaka* malgache une forme d'érosion parfois utilisable », *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 255-268
- HURAUULT, J. M., 1967, *L'Érosion régressive dans les régions tropicales humides et la genèse des inselbergs granitiques. Étude de photo-interprétation*, n° 3, 68 pp.
- PETIT, M., BOURGEAT, F., 1965, « Les *lavaka* malgaches : un agent naturel d'évolution des versants », *Bulletin de l'Association des géographes français*, 332-333 : 29-33
- PORTERES, R., 1956, « Une forme spectaculaire d'érosion à Madagascar- le *lavaka* », *Sci. Nature*, 14, pp. 8-13
- RABARIMANANA, M. H., RAHARIJAONA, R. L. J., CHOROWICZ, J., 2003, « Cartographie des *lavaka* par télédétection : analyse des facteurs et gestion des espaces ruraux à Madagascar », *Revue de Télédétection*, vol. 3, n° 2-3-4, pp. 225-250
- RAHARIJAONA, R. L. J., RANDRIANARISON, J., 1999, « Facteurs géologiques et climatiques influençant l'érosion en *lavaka* et ensablement des rizières : le cas du massif d'Ambositrandriampotsy du Sud du Lac Alaotra », IV^e Conférence de l'Association pour les montagnes africaines (AMA), 26 mai - 01 juin 1997, Antananarivo, Madagascar, in *African Mountain Development in a Changing World*, Hurni, H., Ranamonjisoa, J. (Editors), pp. 159-172
- RIQUIER, J., 1954, « Etude sur les *Lavaka* », *Mémoires de l'Institut scientifique de Madagascar*, série : Sciences de la terre, 6 : 169-189
- RIQUIER, J., 1955, « Procédés de fixation d'une érosion en *lavaka* et de régénération d'un terrain extrêmement érodé », *Le Naturaliste malgache*, pp. 105-111
- RIQUIER, J., 1958, « Les *lavaka* de Madagascar », Institut de recherche scientifique de Madagascar, Tananarive, 13 pp.
- ROUGERIE, F., 1965, « Les *lavaka* dans l'évolution des versants à Madagascar », *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, 332-333, pp. 15-28
- TASSIN, J., 1993b, « Place de la végétation dans le traitement des *lavaka* du Lac Alaotra », *Akon'ny Ala, Bulletin du département des Eaux et Forêts de l'ESSA*, août 1993, 11 : 40-49
- TASSIN, J., 1995, « L'homme gestionnaire de son milieu face à l'érosion en *lavaka* du lac Alaotra (Madagascar) », *Bulletin réseau Érosion*, 15 : 340-344
- WELLS, N.A., ANDRIAMIHAJA, B., RAKOTOVOLOLONA, H. F. S., 1987a, « Proximate causes and patterns of development of the extraordinary gullies on Madagascar's laterized craton », Abstract with Programs, *Geological Society of America*, n° 19, pp. 886

2. Processus d'érosion

WELLS, N.A., ANDRIAMIHAJA, B., RAMILISONINA, 1987b, « *Lavaka explained* », *Geotimes*, 32(4), 3
WELLS, N.A., ANDRIAMIHAJA, B., RAKOTOVOLOLONA, H. F. S., 1991, « Patterns of development of *lavaka*, Madagascar's unusual gullies », *Earth Surface Process and Landforms*, 16, 3 : 189-206
WELLS, N.A., ANDRIAMIHAJA, B., 1993, « The initiation and growth of gullies in Madagascar : are humans to blame ? », *Geomorphology*, 8 : 1-46

Figure 1. Principaux éléments constitutifs des *lavaka*.

a : paroi verticale, b : paroi médiane, c : cheminée de fée, d : paroi latérale, e : plancher, f : éboulis, g : chenal ; h : exutoire.

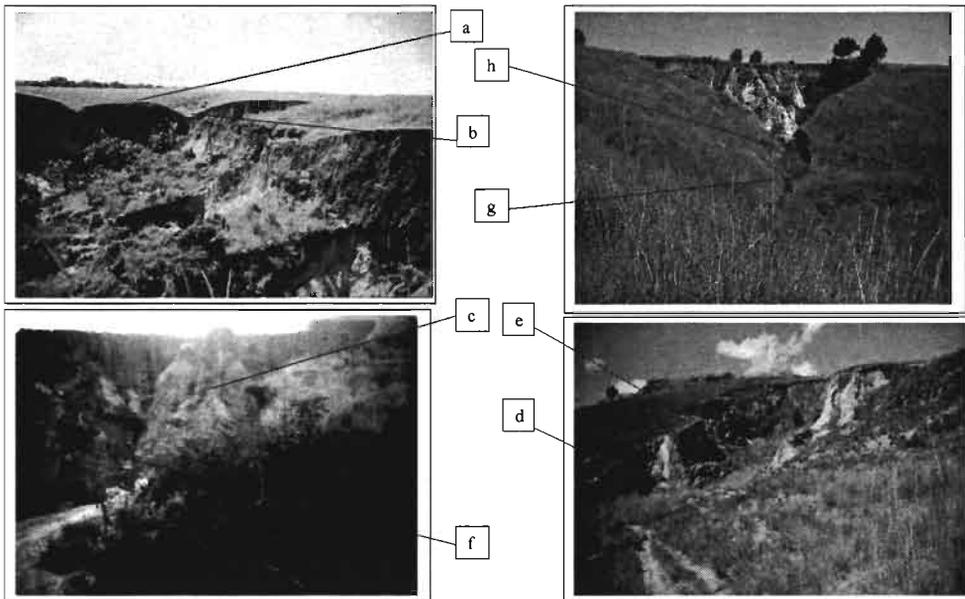


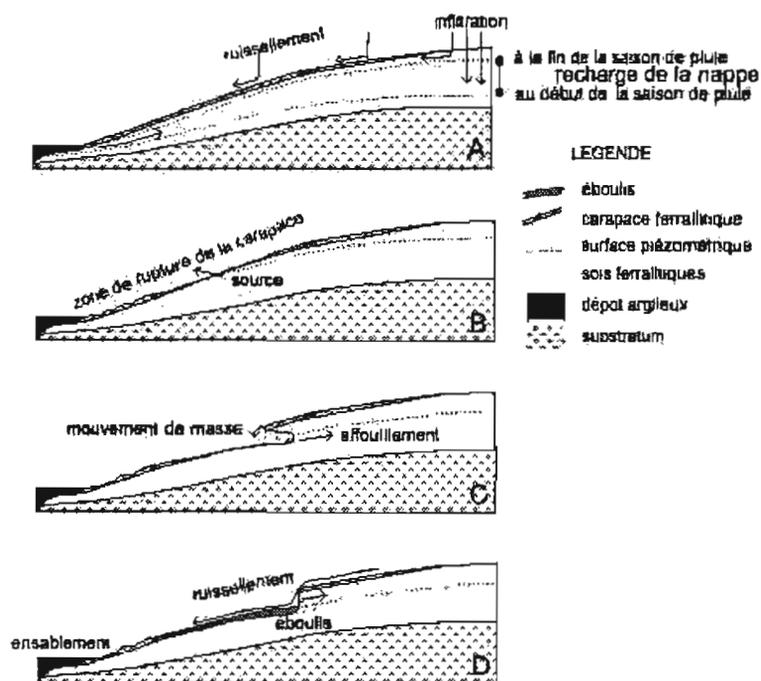
Figure 2. Modèle de fonctionnement en *lavaka*

A : Mise en charge de la masse d'eau

B : Rupture de la carapace et apparition d'une source

C : Érosion par sous tirage et effondrement induit

D : Ravinement et dépôts en aval



Étude de la corrélation entre composition chimique et minéralogique dans la formation de l'érosion en *lavaka*

CLÉMENT MIANDRINANDRASANA, PAX RAJAONERA

département de chimie minérale et de chimie physique,
faculté des Sciences, Université d'Antananarivo,
Tél. : +261 (32) 40 721 10,
Courriel : clement_miandri001@yahoo.fr

Introduction

À Madagascar, la formation des *lavaka* constitue un danger socioéconomique pour le pays car elle provoque l'ensablement des rizières, des centrales hydrauliques des circuits ferroviaires etc. La formation des *lavaka* a été étudiée en terme d'instabilité tectonique et hétérogénéité pétrographique qui sont les facteurs essentiels intervenant dans le déclenchement du *processus* d'érosion en *lavaka*. Notre but est d'établir une méthodologie pour la stabilisation des *lavaka*. Notre étude contribue à établir la corrélation chimique et minéralogique de la formation des *lavaka*. A notre connaissance, cette étude n'a pas encore été effectuée.

Méthode

- Collecte d'échantillons de latérites à proximité des *lavaka* dans la région d'Ambohimambola (Antananarivo)
- Étude de la solubilité des latérites dans l'eau par la mesure de la conductimétrie, mesure de la salinité, solubilisation
- Étude de la composition chimique par la spectrométrie de fluorescence X
- Étude de la composition minéralogique par spectrométrie de diffraction RX (Debye - Scherrer)
- Méthodologie de stabilisation

Mots clés : Érosion ; *lavaka*; latérite ; latérisation ; stabilisation ; instabilité tectonique ; hétérogénéité pétrographique ; Béryllium-10 cosmogénique.

Références bibliographiques

- FICU, Recherche d'une méthodologie pour la stabilisation des *lavaka* en vue d'améliorer les conditions socioéconomiques des communautés rurales
- FICHE 62, 1998, «Reconstituer la dynamique des latérites à l'aide du Beryllium», *Actualité, Fiches Scientifiques*, Avril 1998
- RANDRIANA NAMBININA R. F., 2004, Stabilisation des latérites par élaboration d'un liant, ESPA, Juin 2004, Antananarivo
- ANDRIAMIHAJA RAKOTONIRINA B., 1988, Étude chimique des latérites des hauts plateaux de Madagascar, EESS option Chimie minérale
- DELUBAC, G., RAKOTOARISON, W., RANTOANINA, M., 1963, «Étude géologique et prospection des Feuilles Tananarive - Manjakandriana au 1/100 000», *Rapport de fin de Campagne 1963*

Étude de la relation sol/roche-mère pour la gestion de la fertilité des sols : cas des *tanety* d'Alasora, Madagascar.

**LÉA JACQUELINE RAHARIJAONA RAHARISON¹,
SAFIDY NOMENJANAHARY²,
MARIE-ANTOINETTE RAZAFINDRAKOTO³**

¹département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, B. P. 1500, Antananarivo, Madagascar,

Tél. : +261 (20) 22 689 15 ou +261 (20) 22 282 70 ; Courriel : ljarahari2001@yahoo.fr

²département de géologie, École supérieur polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, B. P. 1500, Antananarivo, Madagascar,

Tél. : +261 (20) 24 216 53, Courriel : nomsafidy@yahoo.fr

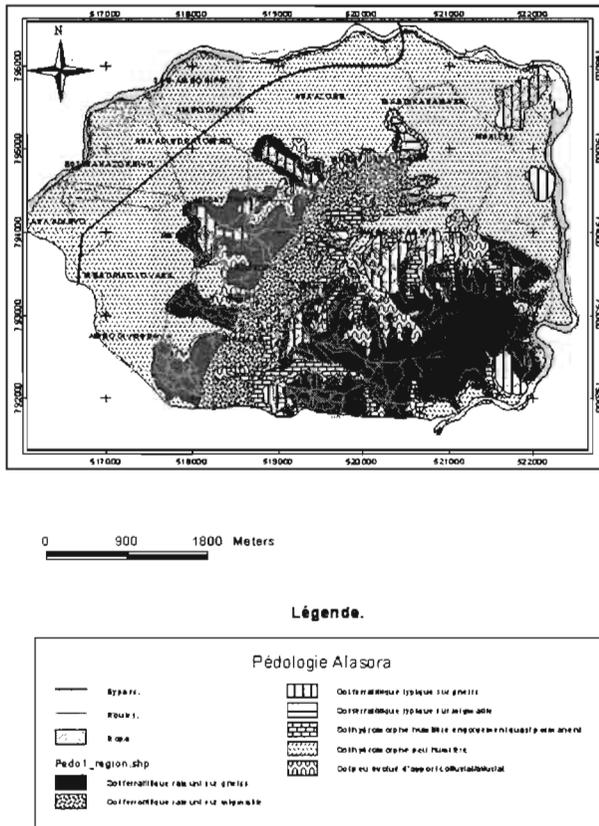
³département des eaux et forêts, École supérieure des sciences agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo, B. P. 175 Antananarivo, Madagascar,

Tél. : +261 (20) 22 316 09, Courriel : ma.kisatoo@univ-antananarivo.mg

Alasora est une zone à forte vocation agricole de Madagascar. La majorité des sols rencontrés sont à prédominance ferrallitique (fig. 1), d'une fertilité souvent médiocre. Ils sont formés aux dépens de roches de nature variée, essentiellement gneiss et migmatites.

Du point de vue agronomique, les sols profonds sur gneiss sont plus fertiles que les sols sur migmatites, en raison de leur richesse en minéraux ferro-magnésiens et en débris organiques. Les sols migmatitiques par leur texture sableuse sont facilement érodibles et perdent très vite leur capacité de production par décapage de l'horizon superficiel. Le problème le plus fréquemment rencontré dans la région d'Alasora est la dégradation des sols qui se manifestent par l'existence de plusieurs formes d'érosion dont la plus manifeste est celle en *lavaka*. Les pratiques culturales et les modes d'utilisation des sols accélèrent ce phénomène de dégradation et influencent certaines propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols.

Figure 1. Carte pédologique d'Alasora établie à partir de la BD 10. (Source : Nomenjanahary S., 2005).

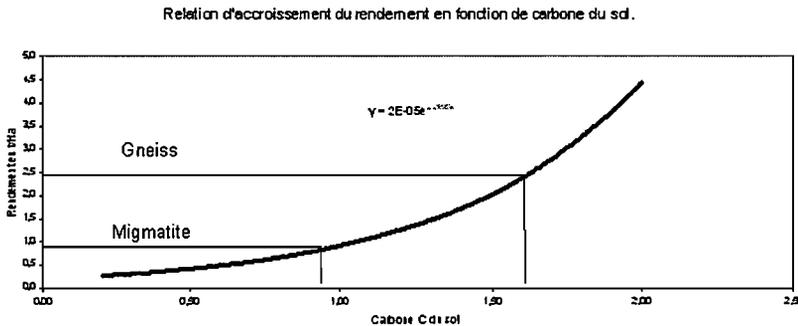


L'objectif de ce travail vise à analyser la relation qui peut exister entre le sol et la roche-mère en vue d'améliorer la productivité agricole. La caractérisation minéralogique et physico-chimique des altérites est indispensable pour comprendre le rôle des facteurs géologiques sur la fertilité des sols. D'après la fig. 2, le rendement agricole des sols est visiblement différent selon la nature de la roche-mère. La gestion de la fertilité des sols mérite d'être améliorée. Pour ce faire, il faut adopter des techniques culturales permettant d'accroître la fertilité des sols: d'une part par apport d'amendements calcaires et d'autre part par apport de biomasse végétale produisant la matière organique et les autres éléments nutritifs au sol.

La gestion de fertilité sur les sols de migmatite devrait être plus intensive par rapport au sol sur gneiss. Des expérimentations menées par Razafindrakoto M. A et Randrianarimanana A. H. R (2004) à Tampoketsa, sur des sols fortement dégradés à roche-mère migmatites, ont montré que l'utilisation des jachères légumineuses arbustives de *Tephrosia vogelii*, ont amélioré très efficacement toutes les

caractéristiques du sol (propriétés physico-chimiques et hydriques, résistance à l'érosion, productivité agricole). Les résultats de cette expérience seront exposés dans le cadre de ce travail ainsi que les méthodes de CES applicables dans cette région d'étude.

Figure 2. Courbes représentant l'influence chimiques et physico-hydriques du sol sur le rendement agricole. (Source : Nomenjanahary S., Randrianarimanana A. H., 2005).



Mots clés : Érosion en *lavaka* ; relation sol/roche-mère ; physico-chimie du sol ; gestion de fertilité ; CES.

Remerciements

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du Projet de coopération scientifique inter-universitaire (PCSI 2003-2005), financé par l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF).

Références bibliographiques

RAHARIJAONA RAHARISON, L. J., COUDRAY, J., RAMERISON, T. A., 2003, «Dégradation des sols par érosion hydrique des versants d'Ampasikely : région du lac Alaotra, Madagascar», *Mém. Acad. Nat. Art. Lett. Sci.*, fasc. 49, actes du colloque du Centenaire de l'Académie malgache : Sol, Environnement et Développement, Académie nationale des arts, des lettres et des sciences, Antananarivo, Madagascar, 23-26 octobre 2002, pp. 109-124

NOMENJANAHARY, S., 2005, *Le Rôle des facteurs géologiques sur les processus pédogénétiques et la fertilité de sols : applications agronomiques dans la commune d'Alasora*, mémoire de fin d'études, option géologie, soutenu le 11 juin 2005, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 129 pp.

RANDRIANARIMANANA, A. H. R., 2004, *Étude de l'amélioration de la fertilité des sols sous différents agroécosystèmes de conservation des sols à Manankazo-Tampoketsa*, mémoire de fin d'études, École supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, 69 pp.

RAZAFINDRAKOTO, M. A., 2004, *Évaluation de l'efficacité de diverses techniques biologiques de gestion conservatoire de la fertilité des sols*, thèse de docteur d'État, ES-Sciences physiques, département génie minéral, soutenue le 15 décembre 2004, ESPA, Université d'Antananarivo, 192 pp.

Dynamique des pertes agrochimiques dues à l'érosion et incidence sur la production au Moso (Burundi)

FERDINAND NTIBURUMUSI

Institut supérieur agronomique du Burundi (ISABU), Bujumbura, Burundi,
Tél. : +257 22 25 67, Fax : +257 22 57 98, Courriel : vubi2000@yahoo.fr

1. Introduction

Dans les expérimentations sur l'érosion des sols, nous constatons que dans des conditions écologiques et agronomiques identiques et sur une même culture, les rendements diffèrent en fonction de l'importance de l'érosion (cf. rapport annuel Isabu, 1989-1990 ; Rishirumuhirwa, 1993). En plus des mesures de pertes en terre et ruissellement que nous quantifions sur parcelles expérimentales, il est indispensable d'identifier plus objectivement la part que représente cette érosion dans la diminution de la fertilité. Étant donné le nombre important d'analyses de sol qu'il faut effectuer, seuls quelques résultats préliminaires seront exposés dans ce rapport.

2. Méthodologie

– Deux fosses pédologiques sont décrites et les échantillons prélevés avant le démarrage des mesures expérimentales (septembre 1990)

– Échantillons composites de surface de chacune des parcelles expérimentales, un an après le démarrage des mesures (septembre 1991)

P2 = parcelle de manioc d'une année, paillée : 2 échantillons (à mi-longueur et en bas de parcelle)

P3 = parcelle de manioc d'une année non paillée : 2 échantillons (*idem*)

– Échantillonnage de boues de récupération de l'érosion :

* Boues P1 = parcelle Wischmeier, prélevé le 2/01/91 après une pluie de 39 mm et d'agressivité forte R = 35

* P1 = parcelle Wischmeier (constamment nue), 3 échantillons en haut, à mi-longueur et en bas de parcelle)

* Boues P1 = parcelle Wischmeier, prélevé le 24/05/92 après une pluie de 15,2 mm et d'agressivité faible R = 4,5

* Boues P3 = parcelle de manioc (fin de cycle) non paillée, prélevé le même jour

3. Résultats

3.1. Caractéristiques des sols et des boues

Les résultats analytiques dont nous disposons sont très insuffisants pour tirer des conclusions définitives sur les pertes chimiques résultant de l'érosion des terres. Les interprétations qui vont suivre devront donc être confirmées par d'autres résultats ultérieurs.

Les analyses de sol (1 et 2) effectuées en ouverture donnent des propriétés granulométriques différentes de celles observées sur les parcelles expérimentales (respectivement 50-60 % d'argile au lieu de 80-90 %) mais il s'agit bien dans tous les cas du même type de sol à savoir un ferrisol eutrophe avec une CEC argile < 16meq/100 g (13,5 < CEC arg < 16)

Tableau 1. Résultats des analyses de sol et de boue des parcelles expérimentales du Moso.

Labo	N° Echantillon	PH H2O	Cond. en mmho/cm	C %	N %	Arg . %	<i>CATIONS BASIQUES S T</i> (meq/100 g de terre) (meq/100 g)						V %	P Ppm (o-d)	
							<i>Ca++</i>	<i>Mg++</i>	<i>K+</i>	<i>Na+</i>					
L283	(1)	0-25	5,8	0,010	1,36	0,13	51,7	6,78	3,64	0,11	0,04	10,57	11,46	92,27	3
L 384		25-50	6,1	0,005	1,32	0,11	60,2	6,83	3,35	0,09	0,04	10,30	11,47	89,8	3
L 385	(2)	>50	6,2	0,004	0,52	0,06	65,6	4,73	3,0	0,09	0,05	7,87	10,37	75,89	0
L 386		0-30	6,0	0,006	1,74	0,12	50,5	6,36	3,2	0,09	0,07	9,67	13,85	69,82	3
L 387		30-80	6,0	0,005	1,18	0,09	58,4	6,39	2,75	0,07	0,04	9,27	12,45	74,4	0
L 388		* 80	6,0	0,004	0,50	0,05	59,0	4,17	2,46	0,03	0,03	6,69	8,97	74,58	3
N 620	(3)	Haut	6,1	0,041	1,06	0,12	86,9	5,94	3,32	0,79	0,02	10,07	13,21	76,24	0
N 621		Milieu	5,9	0,040	1,24	0,13	87,8	4,55	3,03	0,63	0,01	8,25	11,97	68,76	8
N 622	P1	Bas	6,4	0,040	1,60	-	85,4	5,09	3,22	0,61	0,01	8,93	14,71	60,70	5
N 623	(4)	Milieu	6,0	0,028	2,07	0,19	79,6	8,07	4,12	0,98	0,03	13,20	17,75	74,35	10
N 624	P2	Bas	6,5	0,023	1,22	0,15	84,0	6,24	4,00	0,89	0,03	11,16	15,71	71,04	3
N 625	(5)	Milieu	6,5	0,023	1,6	0,15	86,7	6,55	4,14	0,91	0,02	11,62	15,56	74,70	10
N 626	P3	Bas	6,2	0,021	1,52	0,14	86,1	5,38	3,88	0,76	0,01	10,49	14,71	68,16	13
M 354	(6)	P1	5,9	0,023	1,63	0,14	-	5,96	3,53	0,91	0,10	10,49	14,85	70,67	5
P 845	(7)	P1	7,1	0,023	1,82	0,15	81,5	10,12	2,26	0,64	0,17	13,20	15,92	82,92	45
P 846	(8)	P3	7,0	0,057	1,74	0,18	85,4	10,29	4,15	0,80	0,23	15,47	20,13	76,88	15

Comparaison des parcelles P1, P2 et P3 entre elles un an après le démarrage des mesures (3 à 5) :

Peu de différence dans l'ensemble si ce n'est une variation de la teneur en carbone organique (1,1 à 2,1 %). La somme des cations basiques (S) varie entre 8 et 11 méq/100g avec un petit pic à 13,2 méq pour l'échantillon le plus organique (4 m). La parcelle nue (témoin Wischmeier) présente les plus faibles teneurs en Ca++ : entre 4,5 et 5,9 meq/100 g selon la situation dans la parcelle.

Comparaison des analyses de boues avec leur parcelle respective (P1 et P3 uniquement) :

Au démarrage des mesures, les caractéristiques analytiques des boues de la parcelle nue sont semblables à celles du sol qui la constitue. On pourrait avancer comme première hypothèse la faible érodibilité du sol en première année (14,8 T/ha/an, $K = 0,003$) qui s'explique par l'existence de bonnes propriétés organominérales et la présence d'un réseau racinaire primitif antérieur au défrichement (ancienne jachère herbacée à *Imperata* et *Loudetia*). Il s'agirait d'un simple processus mécanique au cours duquel le détachement et le charriage des matériaux se feraient au gré des variations de résistance du sol et des concentrations de ruissellement.

Au fil du temps, les fibres végétales se décomposent et les matières organiques se diluent. Le pH et la concentration organique des boues deviennent alors sensiblement plus élevés que les teneurs enregistrées sur le sol des parcelles respectives. Cette augmentation s'observe également au niveau du Ca^{++} et de CEC quelque soit la parcelle expérimentale (PW ou P3). Sans avoir tous les éléments en notre possession pour comprendre les mécanismes érosifs observés au Moso, nous pouvons néanmoins apporter une première explication qui devra être affinée par la suite : la constante « progressivité » des pertes en terre sans proportionnalité avec le ruissellement (cf. rapports annuels 90-91 et 91-92 et fiche opération 01.1.1.1) peut être interprétée suivant un processus de dégradation physico-chimique de la surface du sol. Les propriétés organominérales seraient affectées au fil des années par une décalcification lente et progressive dans laquelle des ions Ca^{++} et une certaine forme de matière organique agglomérés en complexe organométallique (de type humo-calcique) seraient entraînés sous forme de micelles < 2μ par dilution et ruissellement.

On peut émettre l'hypothèse qu'une déstructuration de la surface du sol croît au fur et à mesure que cette dégradation affecte les agents de liaison des agrégats.

Ce constat mériterait d'être vérifié d'une part par une série d'analyses complémentaires qui compareraient les caractéristiques de la CEC et de la matière organique de différentes fractions granulométriques des boues avec celles du sol et par des tests sur les propriétés mécaniques du sol avant et après dégradation du sol (stabilité structurale, limites d'Atterberg). Nous pouvons également avoir une vision plus globale de ce qui se passe, en procédant à une estimation pondérale des principaux constituants de l'horizon de surface (30 cm de profondeur) que l'on compare à ceux perdus par érosion (tableau 2)

n.b. : Le phosphore n'a pas été pris en considération en raison des écarts importants obtenus par la méthode de dosage d'Olsen-Dabin : les erreurs seraient considérablement amplifiées lors du calcul pondéral du phosphore.

Tableau 2. Répartition quantitative des principaux constituants des sols (sur 30 m) et des boues.

		C		N		Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		K ⁺	
		T/ha	%	T/ha	%	Kg/ha	%	Kg/ha	%	Kg/ha	%
RESERVES (SOL)	P.W	48,4	100	4,65	100	3872	100	1442	100	985	100
	P.3	58,0	100	5,4	100	4447	100	1813	100	1215	100
PERTES (*) (BOUES)	P.W 1ère année	0,24	0,5	0,021	0,45	17,8	0,46	6,4	0,44	5,3	0,54
	P.W 2è année	0,65	1,35	0,054	1,2	72,2	1,9	9,8	0,68	8,9	0,90
	P.3 2è année	0,23	0,40	0,024	0,44	27,0	0,61	6,6	0,36	4,1	0,34

(*) Érosion de PW = 14,8 T/ha/an en 90-91 (1^{re} année), et 35,6 T/ha/an en 91-92 (2^e année)

Érosion de P3 = 13,1 T/ha/an en 91-92 (2^e année)

P2 Non déterminée car érosion quasi absente suite au paillage expérimental

La charge en carbone et calcium des boues est plus élevée que leur sol d'origine. Pourtant, les valeurs pondérales montrent que nous sommes loin du scénario catastrophique auquel on aurait pu s'attendre. La perte des constituants de la parcelle nue en première année ne représentent par exemple que 0,5 % environ des réserves du sol, ce qui est plutôt faible pour une parcelle toujours dénudée de toute végétation. Certes ces valeurs augmentent en 2^e année, mais leur proportion reste encore très faible (1,3 % pour la matière organique et 2 % pour l'ion calcium).

Néanmoins, la perte d'éléments étant proportionnelle au tonnage des terres érodées, leurs quantités peuvent varier considérablement et les concentrations ioniques augmentent significativement. Cela est certainement le cas en 3^e année où les pertes en terre sur la parcelle nue ont atteint 120 tonnes par an, soit 3 fois plus que la 2^e campagne. Malheureusement nous ne disposons d'aucune analyse de boue pour estimer les pertes pondérales. Si les concentrations étaient restées égales la troisième année, les pertes en C organique par érosion auraient atteint 2,2t/ha/an, soit 4,5 % des réserves et les pertes en calcium 242 kg/ha soit 5,2 % des réserves du sol (sur 30 cm).

Au rythme des pertes chimiques par érosion (les boues et pas les eaux de ruissellement) ajoutées à celles des exportations par les cultures, il faudra probablement un très grand nombre d'années avant d'épuiser les réserves cationiques du sol (surtout en Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, un peu moins en K⁺). Sa richesse en cations basiques est en quelque sorte inépuisable. Il n'en est pas de même sur le plan de la matière organique et du phosphore assimilable qui peuvent rapidement devenir déficients et constituer une contrainte préoccupante après quelques années de culture intensive sans restitution organominérale. Cela pourrait partiellement expliquer la mauvaise récolte de maïs en 1993 qui fut précédée d'une récolte de manioc exceptionnelle (35,5 t/ha).

3.2 Mesures des pertes de terre, du ruissellement et des rendements par rapport à l'agressivité des pluies et aux cultures.

Les résultats des mesures faites sur la parcelle nue ainsi que sur les parcelles cultivées montrent que les pertes en terre sont plus importantes sur les parcelles non protégées par une couverture végétale qu'elle soit morte ou vivante. Il en est de même pour le ruissellement. L'association à la couverture végétale des différentes techniques culturales permet de réduire les charges solides perdues de 156 à 2,9 t/ha/an et le ruissellement de 10,3 à 1,8 % sur le maïs et le haricot non paillés.

4. Conclusion

4.1. Malgré les bonnes réserves en cations basiques, le sol étudié du Moso présente une réelle sensibilité à l'érosion au fur et à mesure que les eaux de ruissellement se chargent en colloïdes : cette sensibilité s'accroît au fil des années, surtout sur les parcelles où le sol reste dénudé.

4.2. Par contre les pertes en nutriments dans les sédiments érodés ont été modestes, de 0,5 à 5 % des stocks de nutriments de l'horizon exploré par les cultures annuelles (30 cm) : mais il faudrait y ajouter les pertes d'éléments solubilisés dans les eaux de ruissellement qui n'ont pas été évalués ici. Cette sensibilité est importante si on tient compte de la relative pauvreté en matière organique et en phosphore de ce sol et des risques importants de déstructuration qui affectent la surface du sol. L'essentiel des pertes de nutriments proviennent donc soit de l'exportation par les récoltes (nutriments) soit par la minéralisation des matières organiques du sol par la microflore. Tous ces constats ne sont certainement pas étrangers aux phénomènes de dégradation de la fertilité des sols que l'on observe dans la région.

4.3. Les résultats des mesures d'érosion sur les parcelles d'érosion donnent des renseignements particulièrement intéressants sur le mode de fonctionnement des aménagements biologiques, des principales techniques antiérosives déployées en milieu paysan. Les pertes en terre et les taux de ruissellement s'avèrent être de bons indicateurs permettant de tester l'efficacité agro-physique et économique des aménagements.

Références bibliographiques

- DUCHAUFOR, H., PARTY, J.-P., 1998, *Étude de la conservation des eaux et des sols dans le Mumirwa. Cas de deux bassins versants de Cirisha et Nyarumpongo (commune d'Isale)*, mission d'appui Technique à l'ISABU, 42 pp. + annexes + planches couleurs
- KOENIG, D., 1990, « Contributions des méthodes agro-forestières à la lutte antiérosive au Rwanda », *Bull. réseau Érosion ORSTOM*, Montpellier, 7 : 185 - 191
- NDAYIZIGIYE, F., 1990, L'aménagement des collines dans la zone d'altitude moyenne au Rwanda : Exemple de la région de Butare, *Bull. Réseau Érosion*, 7 : 173 - 184

COLLECTIF, *Rapport annuel ISABU*, 1989-1990 et 1992, partie érosion.

ROOSE, É., 1986, «Terrasses de diversion ou micro-barrages perméables, Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne», *Cah. ORSTOM Pédol.*, 25, 2 : 197-208

ROOSE, É., 1990, *Un programme national de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES)*, rapport de mission effectuée au Burundi du 26/02/1990 au 17/03/90, 30 pp.

SIMONART, T., 1992, *La Conservation des sols en milieu paysan burundais, Étude et Hiérarchisation des stratégies antiérosives*, Bujumbura, version corrigée et augmentée, octobre 1992, mémoire de fin d'études, UCL, Belgique, 120 pp.

SIMONART, T., DUCHAUFOR, H., BIZIMANA, M., MIKOKORO, C., 1994, « Hiérarchisation des stratégies antiérosives en milieu paysan burundais », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, n° 185 – 47^e année, janvier-mars 1994, *Revue de géographie de Bordeaux*, pp 49-64

3.

**Méthodes : indicateurs,
SIG, cartographie**

Des images de télédétection pour l'érosion

CHRISTIAN PUECH¹, DAMIEN RACLOT², ANDRES JACOME¹

¹UMR TETIS, Maison de la télédétection, 500, rue J.-F. Breton, 34093 Montpellier, cedex 5, France, Tél. : +33 (0)4 67 54 87 45,

Courriels : puech@teledetection.fr ; jacome@teledetection.fr

²UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1, France.

Tél. : +33 (0)4 99 61 22 51, Courriel : raclot@ensam.inra.fr

Introduction

Pour analyser et gérer un espace géographique il devient de plus en plus nécessaire d'avoir des informations numériques qui soient localisées dans l'espace. Dès lors deux questions se posent : comment obtenir de données précises pour cette description de l'espace ? Comment gérer et analyser la masse de données géographiquement localisée ? Les images de télédétection constituent une des réponses privilégiées à la question de l'obtention des données spatialisées tandis que de nombreuses tentatives de les intégrer dans les schémas ou modèles se développent.

On attend de ces données spatialisées une information neutre, objective, répétitive et précise. On cherche des informations immédiatement exploitables permettant :

- 1) des méthodes opérationnelles d'inventaire et de surveillance ou obtention d'indicateurs pour une aide à la décision;
- 2) la mise en œuvre de modélisation spatialisée : alimentation, assimilation des données dans les modèles, calage-validation;
- 3) un retour de connaissance sur les *processus* physiques, grâce à ces nouvelles façons d'observer la nature.

Cette présentation aborde l'utilisation des images de télédétection pour des problèmes d'érosion des sols. Après une revue rapide sur les types d'images disponibles, les facteurs spatiaux intéressant l'érosion et pouvant être extrait des images sont détaillés avec une illustration par des images sur des formes d'érosion en zones agricoles (bassin de l'Andelle dans l'Eure) et en zones de *bad-lands* (bassins expérimentaux de Draix, Alpes françaises). Pour finir quelques réflexions sur les problèmes générés par la mise en œuvre de modélisations spatialisées utilisant ces données sont abordées.

Les types d'images disponibles

Les images de télédétection pour l'observation de la terre sont nombreuses et en rapide développement. Trois grandes classes se rencontrent : les images optiques, thermiques ou radar. Les éléments de caractérisation de l'érosion sont principalement acquis à partir des données optiques. Toutefois les images radar permettent d'analyser quelques éléments, telle la rugosité des sols. Chaque type d'image est défini par ses résolutions : spatiale (taille du pixel et emprise de l'image), temporelle (faculté de repasser au même point) et spectrale (nombre de bandes d'observation et plage de mesure correspondante). Les satellites d'observation de la terre usuels ont des résolutions décimétriques (Landsat TM à résolution 30 m ; SPOT XS à 20 m) et l'analyse d'image est généralement automatisée notamment grâce aux classifications spectrales des images. Les données de MNT (modèle numérique de terrain) issus souvent d'imagerie spatiale complètent cette offre en données spatiales. Rappelons que tout traitement d'image s'accompagne normalement de connaissances locales (terrain) que les images permettent de généraliser à un territoire plus vaste.

La tendance actuelle vise à l'amélioration de toutes ces résolutions : spatiale (images THRS, à très haute résolution spatiale avec les satellites Quickbird (60 cm), Ikonos (80 cm) ou Spot 5 (2.5 m)), spectrale (ASTER, 14 bandes) ou temporelle grâce à des dépointages (satellites Pléiades). L'amélioration de la résolution spatiale introduit une certaine révolution dans l'utilisation de données de télédétection : la résolution métrique change profondément la vision du terrain en incluant la dimension verticale des objets détectés (bâtiments, végétation) et les ombres. Dès lors les techniques automatiques de classification d'image ne sont plus opérationnelles ; c'est l'analyse de formes basée sur des notions d'objet qui devient essentielle. Il est désormais primordial de se préoccuper de considérations sur la résolution optimale, et les notions d'échelle et d'analyse en multi échelle dans les logiciels récents d'analyse d'image tel e-Cognition. Du point de vue agronomique, ces mêmes résolutions permettent d'aborder des analyses intra parcellaires utiles pour l'agriculture de précision.

On note aussi un certain retour vers la prise de vue aéroportée : avions, ULM et même drones ce qui autorise des résolutions de quelques centimètres, mais sur des espaces restreints.

Les facteurs spatiaux de l'érosion visibles par imagerie spatiale

De nombreux travaux très disparates utilisent une grande variété d'images de télédétection pour la gestion, le suivi, l'analyse de l'érosion et la compréhension des *processus* élémentaires. Ces travaux concernent par exemple l'inventaire et la cartographie des zones érodées, des facteurs d'érodabilité, des pédopaysages, de la fertilité et la protection des sols agricoles à travers la biomasse, des ressources en sol, des états de surface, l'évaluation des dégâts (observation, suivi, recul des fronts d'érosion), l'évolution temporelle des ensembles érodés avec des tentatives d'évaluation directe de l'ablation. Ces travaux sont généralisés sur tous pays et

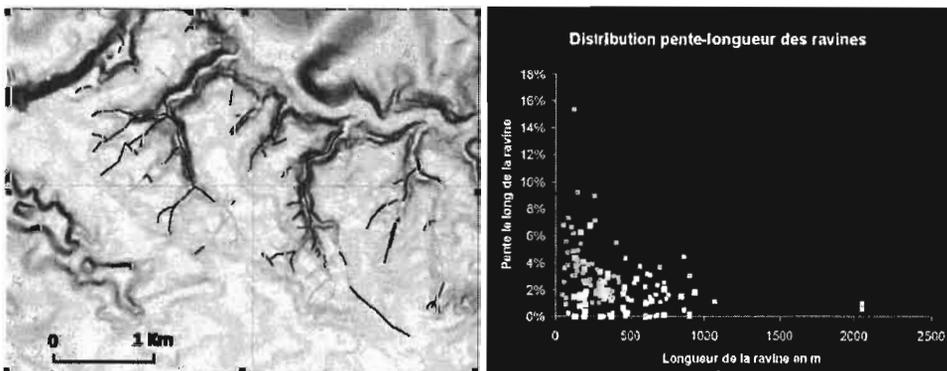
continents : par exemple Mexique, Inde, Turquie, France, Espagne, Tunisie, Madagascar...

On note l'opposition forte entre les travaux qui concernent la potentialité de l'érosion à travers les facteurs la contrôlant (morphologie, végétation, sol, état de surface), et ceux qui traitent de l'observation des manifestations de l'érosion (griffes, ravines...) à travers le développement de méthodes de caractérisation rapide et facilement reproductible.

Du point de vue des données spatiales utilisées, on note que les facteurs concernant les « états de surface » au sens large (c'est à dire la couche supérieure du terrain incluant végétation et sol), sont souvent analysés à partir d'images spatiales optiques, tandis que la morphologie du bassin versant (pentes, puissance hydraulique, cheminement de l'eau de surface) est analysée à partir de MNT (modèles numériques de Terrain), souvent issus de couples stéréoscopiques satellites ou aériens. Les manifestations de l'érosion profitent elles aussi de la complémentarité entre données images et MNT.

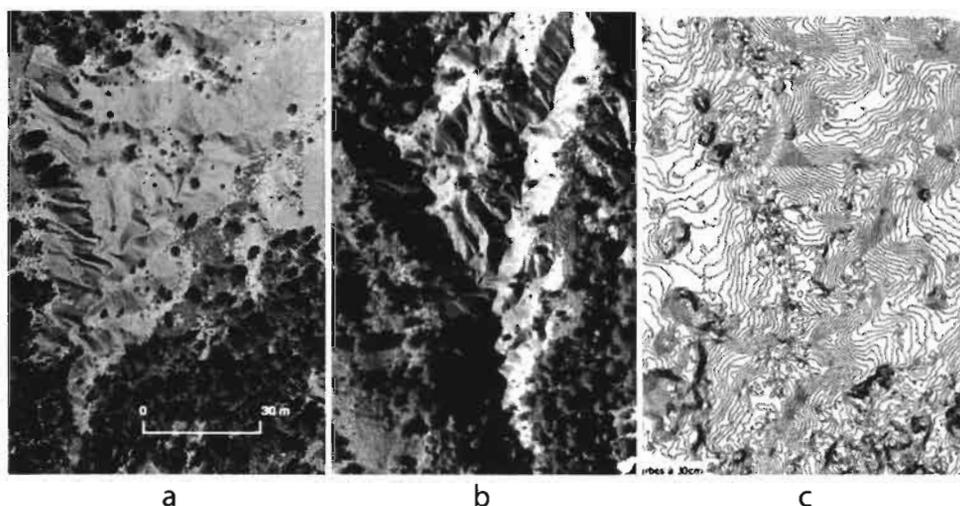
À titre d'illustration, voici deux cas d'utilisation de données spatialisées pour l'analyse de l'érosion traités par l'UMR TETIS. Le premier cas concerne le bassin agricole de l'Andelle (Eure, France). Il s'agit d'une caractérisation automatisée des ravines élémentaires (Bailly 2002) à partir de modèles numériques de terrain permettant par exemple d'en tirer une typologie de ravines par analyse statistique. L'illustration choisie montre la distribution des pentes-longueurs de ravine (figure 1).

Figure 1. Ravines élémentaires et leur distribution statistique. Bassin de l'Andelle (Bailly, 2002).



Le deuxième cas montre des images d'une ravine élémentaire dans des zones de bad-lands de Draix (Alpes françaises) acquises par drone avec des résolutions au sol de 5 cm (figure 2). L'imagerie montre la complémentarité des informations en provenance de photographie en couleurs naturelles, de photographie infrarouge couleur et du modèle numérique de terrain construit à partir de couples stéréoscopiques issus de la même série de photographies (Raclot et al 2005).

Figure 2. Ravines de Draix (Alpes françaises, exemple de photographies couleur naturelle (a), infrarouge (b) et courbes de niveau issues de couple stéréoscopique (c) . (Raclot et al, 2005).



Des facteurs descriptifs de l'érosion aux modèles spatialisés

Si l'imagerie spatiale permet une cartographie des potentialités ou manifestations de l'érosion, elle peut également être utilisée pour analyser le fonctionnement du système au niveau du bassin versant. Les thèmes « états de surface » et « morphologie » sont alors utilisés pour la mise en œuvre de modélisations spatialisées de l'érosion. En effet pour valider et alimenter en données les très gourmands modèles numériques spatialisés de l'érosion tels que KINEROS, EUROSEM, CASC2D-SED, WEPP, ces méthodes de caractérisation par imagerie spatiale sont fortement recherchées.

Mais la pertinence du couplage entre données spatialisées et modélisation est délicate.

Dans le prolongement des approches de Wischmeier qui a proposé la formule universelle de l'USLE, beaucoup de modélisations utilisent des relations empiriques de production élémentaire de l'érosion s'inspirant d'expérimentations sur des parcelles agronomiques qui sont ensuite agrégées au niveau du bassin versant. Généraliser ces utilisations des modèles sur des ensembles naturels pose

donc problème. Ainsi, ce n'est pas parce qu'on a des données pour alimenter un modèle qu'on doit se passer de la l'étape de réflexion sur la pertinence du modèle. En particulier il faut noter que, pour une utilisation saine et efficace de la géomatique, il faut que les raisons de l'accord entre modèle et réalité ne soient pas uniquement numériques mais qu'elles soient aussi physiques : « pour qu'un modèle soit bon, il ne suffit pas qu'il donne de bons résultats il faut encore que ce soit pour les bonnes raisons » (Klimes, 1986).

Par ailleurs les images ne donnent pas directement les paramètres requis par les modèles. Il y a forcément une étape de transformation qui peut être délicate : par exemple passer d'une image à un taux de couverture, à un coefficient de freinage hydraulique sur versant. Ce couplage pose donc des difficultés et entraîne des interrogations: les données sont-elles adaptées au modèle ? Faut-il changer les données ? Faut-il changer de modèle ou même construire de nouveaux modèles, adaptés aux données spatiales ?

Ainsi on retrouve les problématiques de modélisation spatialisées de l'environnement qui posent des questions très délicates, génériques de l'utilisation des données de télédétection dans les modèles hydrologiques distribués :

- non-adaptation des échelles de travail et des échelles de concepts ;
- observation indirecte des variables et difficulté d'assimilation de donnée souvent qualitative ;
- sur paramétrisation par suite d'observations hydrologiques de terrain parcimonieuses, qui conduit à des modèles insuffisamment contraints donc à des jeux de paramètres « équilibraux » ;
- le problème majeur reste dans tous les cas celui de la validation des modèles (Bonn, 2004) : les modèles de pertes de terre sont développés sur des mesures localisées or le changement d'échelle par agrégation exige une validation spatiale, qui n'est quasiment jamais mise en œuvre du fait de son extrême difficulté pratique.

Comme le dit F. Bonn : « Ces techniques de télédétection et SIG permettent d'aider à la cartographie de la dégradation de terres et d'indicateurs de pollution diffuse agricole. Mais il reste beaucoup de travail à faire pour intégrer l'hydrologie, l'érosion et la pollution diffuse d'origine agricole dans les approches spatialisées et la télédétection. » (Bonn, 2004).

Conclusion, perspectives

L'imagerie spatiale permet d'accéder à la cartographie d'un certain nombre de manifestations et facteurs érosifs sur un grand territoire : états de surface, végétation, sol, morphologie. Les techniques sont nombreuses pour des images extrêmement variées en formats, résolutions, répétitivité...

Cette connaissance cartographique localisée et précise entraîne un fort développement de modélisation spatialisée de l'érosion. Les enjeux de cette spatialisation sont une meilleure connaissance des problèmes de l'érosion d'un terri-

toire (position, importance, évolution), pour une meilleure aide à la décision. Mais l'utilisation des données spatialisées pour la modélisation de l'érosion pose des questions non résolues notamment en validation.

Les nouvelles tendances de l'imagerie concernent l'utilisation de la THRS avec des travaux intra-parcellaire, actuellement développés pour des questions d'agriculture de précision. Ceci ouvre la gamme des caractérisations possibles ce qui peut, à terme, conduire à une description multi échelle des manifestations et facteurs érosifs.

Références bibliographiques

- BAILLY, 2002, *Intérêt d'une approche spatialisée pour le diagnostic et la gestion d'ouvrages contre l'érosion*, rapport de projet ENGREF Montpellier
- BONN, F., 2004, Fifth Annual Brace Water Symposium, Montréal 2004, comm. orale
- KLEMES, V., 1986, « Dilettantism in hydrology : transition or destiny », in *Water Resources, Res* 22, 9. : pp. 177-188
- RACLOT, D., PUECH, C., MATHYS, N., ROUX, B., JACOME, A., ASSELINE, J., BAILLY, J. S., 2005, « Photographies aériennes prises par drone et Modèles numériques de terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix », in *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 2005, n°1, pp. 7-20

Automatisation de l'estimation de la perte de terre

HERINIRINA IARIVO NARY

FTM, Lalana Dama-Ntsoa RJB, Ambanidia, B. P. 323, Antananarivo, Madagascar
Tél. : +261 (32)4 814 49 ; Courriel : narynini@yahoo.fr

1. Problématique et objectif de l'étude

L'érosion étant un phénomène spatial, plusieurs études ont été menées pour mettre en place un système d'information géographique (SIG) pour l'expliquer et l'analyser. Pour cela, certains auteurs ont utilisé le modèle numérique de terrain pour faire la différence de volumes et de surfaces entre deux dates [1], d'autres ont travaillé sur des SIG matriciels [2], d'autres ont utilisé la télédétection. De même plusieurs modèles sont mis en place pour quantifier et estimer l'érosion.

Pour notre part, le but de ce travail est de mettre en place un applicatif permettant d'une part de simplifier l'utilisation du SIG dans l'étude de l'érosion, et d'autre part d'utiliser des données déjà disponibles et faciles à mettre à jour. Nous nous limitons à l'érosion en nappe et en utilisant le modèle de prévision USLE de Wischmeier. En effet ce modèle est largement utilisé dans le monde, surtout en Afrique.

Nous avons choisi une zone de la commune d'Alasora, située au Sud-Est d'Antananarivo, pour servir d'exemple d'application. Cette zone est caractérisée par de nombreux phénomènes d'érosion, en particulier les *lavaka*. Toutefois nous ne considérons que l'érosion en nappe. Plusieurs études ont été menées sur cette zone, les données disponibles sont assez conséquentes.

Ce document présente donc les principes et méthodes de la mise en place des facteurs entrant dans l'expression de l'USLE et de leur spatialisation, ainsi que l'estimation de la perte en sol. Le résultat sera donc la cartographie de chacun de ces facteurs.

2. la méthode

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le modèle de Wischmeier sera utilisé dans notre étude.

$$A = 2,24 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [3]$$

Où

A = pertes en terres en tonne par hectare

2,24 = coefficient permettant d'utiliser le système métrique

R = indice-pluie qui intègre l'énergie cinétique de la pluie et l'intensité maximales en trente minutes (exprimé en unité américaines)

K = indice-sol qui caractérise la sensibilité d'un sol à l'érosion

LS = indice de pente (longueur et pourcentage) ou facteur topographique

C = indice de culture

P = Indice des traitements anti-érosifs

Chacun des facteurs ci-dessus correspondra à une couche géographique.

2.1. L'érodibilité du sol (K)

Ce facteur dépend surtout de la composition du sol. Nous avons donc repris le nomographe conçu par Wischmeier, Johnson et Cross en 1971 [4]. Au lieu de trouver une fonction mathématique permettant d'avoir une approximation, nous avons directement introduit ces différentes courbes dans un logiciel de SIG. Nous les avons densifiées afin d'avoir toutes les valeurs de compositions possibles. Par exemple, les courbes des taux de sable sont au départ espacées de 5 % puis de 10 %. Après la densification, ces courbes existent toutes les 1%.

Par des intersections géométriques de droites avec ces courbes, on peut obtenir les valeurs de K sur toute la couche géographique correspondantes. Il est ainsi possible de cartographier la couche sol. On peut faire ainsi le calcul de K point par point ou considérer une zone entière, tel qu'un bassin versant, ou micro-bassin.

Ainsi donc, moyennant un fichier contenant la composition du sol, taux de sables, taux de sable fins et de limons, taux de matières organiques, code de structure et code de perméabilité, avec les coordonnées (GPS par exemple), il est possible d'estimer la valeur de K pour chaque point et de les spatialiser. Ce cas a été possible lors de notre travail car des analyses étaient déjà faites dans cette zone [5]. Dans le cas où l'utilisateur n'a pas les coordonnées, par contre il peut identifier les zones d'analyse sur un support géoréférencé une orthophoto notre étude, ou une carte, etc., il lui est possible de saisir les variables utiles, comme précédemment, et en faire le calcul de K.

Le résultat que nous avons obtenu est le même que ce qu'on lit directement sur le nomographe. Le résultat que nous avons trouvé par le calcul (0,17 en 2000) est également comparable avec celui qui a été calculé sur le haut-plateau malgache : entre 0,13 en 1967-68 ; 0,12 en 1969 sur des parcelles standards [3]. L'avantage est que les données sont directement spatialisées donc on peut faire la cartographie de l'indice de sol.

2.2. L'indice de pente

L'indice de pente est déterminé par l'expression :

$$LS = (L^{1/2} / 100).(0,76+0,53S+0,076S^2)$$

Où

L = longueur de pente en pieds

S = pente en pourcent

Cette expression est utilisée pour l'expérimentation réalisée au CENDARU en 1976 [3].

Avec les courbes de niveaux, nous avons généré un modèle numérique de terrain sous la forme des triangles de Delaunay [6 ; 7]. La pente est obtenue automatiquement et la longueur calculée par la formule classique

$$L = 2 Sf / Bs$$

Où

Sf = Surface du triangle

Bs = côté de faible pente

Ainsi L est la hauteur correspondant à la plus grande pente. Connaissant tous les facteurs qui entrent dans l'expression de LS, il est possible de cartographier le facteur de pente.

Dans le calcul que nous avons fait, nous sommes parti d'une couche de courbes de niveau issues de la restitution photogrammétrique en travaillant à grande échelle.

Par contre, il est bien possible d'utiliser des courbes issues de la base de données génériques existantes, comme la BD100¹, issu de la carte de base de Madagascar. En effet, cette échelle correspondra bien à une surface plus grande comme le bassin-versant [8, 9].

2.3. L'indice de culture C

En ce qui concerne l'indice de culture, une carte d'occupation du sol est nécessaire. Des valeurs déjà utilisées ultérieurement par le CENDARU sont reprises. Cette valeur est minimale pour la forêt dense, et maximale pour la jachère travaillée, *lavaka* et sol nu [3]. Ces valeurs ne sont pas très différents de celles proposées pour l'Afrique occidentale (Roose, 1994) [4].

Pour ce faire, nous l'avons tout simplement introduit dans une base de données. Le principe est de faire la comparaison les deux données, c'est-à-dire l'occupation

¹ BD100 : base de données géographiques mise en place par l'Institut géographique et hydrographique national (FTM), contenant les données topographiques, en particulier les courbes de niveau, à partir des cartes de base de Madagascar, à l'échelle du 1/100 000.

du sol réelle et l'occupation du sol pour laquelle les facteurs C sont connus. Dans le cas où l'utilisateur veut introduire directement la valeur correspondante à C, à l'aide d'une boîte de dialogue.

Pour le cas de notre calcul, nous avons numérisé l'occupation du sol à partir d'un orthophoto, ainsi nous avons travaillé en grande échelle. Mais, notre objectif est de pouvoir utiliser les données déjà existantes sur l'ensemble du pays. Pour cela, il est possible de travailler avec la base de données de l'occupation du sol, dénommée BD200².

2.4. L'indice de pluie

Comme la surface concernée est assez petite, nous l'avons considéré constante sur la zone. D'autre part, les stations de pluies sont assez éloignées l'une de l'autre. L'expression reprise est :

$$R = E_g I_m / 173560$$

où R est l'indice d'agressivité climatique.

Le premier facteur entrant dans l'expression de R est E_g , l'énergie globale en tonne-mètre / km²

$$E_g = \sum E_h$$

avec

$$E_h = (1214 + 890 \log I_h) \cdot q$$

E_h étant l'énergie de la tranche d'intensité homogène I_h en mm/h et q la quantité de pluie en mm.

Le second facteur entrant dans l'expression de R est I_m , intensité maximale de pluie en mm / heure, et

$$I_m = 2 \times I_{30}$$

I_{30} = Intensité maximum en 30 minutes.

Ces expressions ont été utilisées par le CENDARU³ en 1976 [3]. Sur six années, de 1991 à 1996, nous avons trouvé une valeur moyenne de 437,6. Les données météorologiques ont été recueillies auprès du service météorologique d'Antananarivo.

2 BD200 : base de données géographiques contenant particulièrement l'occupation du sol, issue du traitement d'images satellitales LANDSAT TM, et disponible en deux versions, 1990-1992 et 1998-2000. Les données sont généralisées pour avoir la précision d'une carte 1/200 000. Ainsi, les thèmes de surfaces faibles sont confondus avec ceux qui les contiennent

3 CENDARU : Centre de développement agricole et rural

2.5. L'indice de protection antiérosive (P)

Dans les calculs que nous avons faits, nous avons supposé qu'il n'y pas de protection anti-érosive. Ainsi, ce facteur est égal à 1. En effet, d'après les enquêtes ont montré que jusqu'à 63 % des parcelles n'ont aucune structure de protection antiérosive, sur l'ensemble de Madagascar. Et les structures les plus utilisées sont canaux de protection, jusqu'à 17 % et les moins utilisés les brise-vents juste 1% [10].

2.6. Perte en sol

La perte en sol est calculée par la superposition de ces couches. Ainsi la méthode d'analyse spatiale utilisée est l'intersection entre les couches précédentes pour obtenir une nouvelle couche géographique ayant comme attribut la perte en terre, dont on peut donc faire la cartographie. Le problème est que les surfaces ainsi obtenues peuvent être minuscules pour certaines. Pour résoudre ce problème, il suffit d'agréger le résultat par classe de perte en sol.

3. Conclusion sur l'appliquatif créé

Cet applicatif permet donc de :

- assister l'utilisateur pour créer les couches nécessaires si elles n'existent pas encore ;
- assister l'utilisateur pour calculer ou pour saisir les valeurs de chaque facteur entrant dans le calcul de perte en terre ;
- cartographier la perte potentielle en terre et cibler les zones prioritaires pour instaurer les structures antiérosives ;
- utiliser des données qui existent déjà.

En effet, le premier facteur qui varie est les données météorologiques. Or, ce facteur est régional. Puis, les parcelles généralement ne changent pas de forme, mais peuvent changer de culture ou de techniques culturales. Il suffit donc de mettre à jour leur occupation et par la suite la valeur de C. De même pour le facteur topographique, la mise à jour n'est utile qu'après plusieurs années sauf si l'érosion est catastrophique. En effet, l'équidistance des courbes à grande échelle est de 5 mètres et avec la BD100, 25 mètres. Or, la perte en sol même importante, 15 à 30 t/ha/an la perte en hauteur n'est que de 1 à 2 mm [4].

D'après la conclusion sur l'utilisation de l'USLE en Afrique[4], des problèmes surviennent à l'échelle régionale. Or, dans le cas présent, les données sont sur des petites parcelles après intersection lors des calculs.

Références bibliographiques

- 1 RAKOTOMALALA, H. O., 2001, *Mise en place d'un système d'information géographique pour la détermination précise d'un du phénomène d'érosion hydrique*, mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, ESPA
- 2 MORSCHER, J., FOX D., 2004, « Une méthode de cartographie du risque érosif: Application aux collines du Terrefort lauragais »
- 3 MALVOS, C., SARRAILH, J. M., BAILLY, C., RAKOTOMANANA, J. L., RAMPANANA, L., RAMANAHADRAY, F.,

1976, Étude de la susceptibilité à l'érosion des sols de Madagascar

4 ROOSE, É., 1994, «Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)», *Bull FAO des sols*, 70, 420 pp.

5 RAKOTOSAMIMANANA, T. H., 2000, *Recherche de méthodes d'évaluation de l'intensité d'érosion à Madagascar*, mémoire en vue d'obtention du diplôme d'études supérieures spécialisées (DESS) « Les outils d'observation de la terre et la gestion de l'information géographique et de l'environnement », CFSIGE

6 JULIEN, P., 1994, *Traitement altimétrique (modèles numériques de terrain)*, cours de DEA SIG (Sciences de l'information géographique), IGN, service de la recherche, laboratoire MATIS

7 COLLECTIF, *Surface Modelling with TIN*, 1991, Surface Analysis and Display, ESRI, Inc.

8 STAUFFACHER, M., 1994, *Système d'information géographique et télédétection comme outil de compréhension et de gestion de l'environnement : exemple de leur application à l'estimation du potentiel pollutif diffus des zones agricoles du bassin versant de Lemman*, doctorat ès sciences de la terre

MABIT, L., LAVERDIERE, M. R., BERNARD C., «L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France», *Cah. Agricultures*, 11, 3 :195-206

MINTEN, B., RALISON, É., 2003, «Durabilité de l'environnement, agriculture et pauvreté à Madagascar», conférence « Agriculture et Pauvreté », 20 mars 2003, Antananarivo

Les SIG, outils de traitement des données et d'aide à la prise de décision pour la gestion des sols et de l'érosion

SOLOFO RAKOTONDRAOMPIANA¹, CLAUDE COLLET²,
SIMONE RATSIVALAKA³

¹Université d'Antananarivo, Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo (IOGA), laboratoire de géophysique de l'environnement et télédétection, B. P. 3843, 101 Antananarivo, Madagascar, Tél. : +261 22 253 53, Courriel : sorako@univ-antananarivo.mg

²Université de Fribourg, Institut de géographie, chemin du musée, 4, CH-1600, Fribourg, Suisse, Tél. : +41 26 300 023, Fax : +41 26 300 9746, Courriel : claude.collet@unfr.ch

³Université d'Antananarivo, faculté des lettres et des sciences humaines, département de géographie, B. P. 907 Ankatso, 101 Antananarivo, Madagascar, Tél. : +261 22 235 63, Courriel : baratsiv@wanadoo.mg

1. Introduction

L'érosion des sols a été de tout temps un problème majeur à Madagascar. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le fleuve Betsiboka. Le Betsiboka est le plus grand fleuve de Madagascar. Il draine une grande partie des hautes terres centrales avant de se jeter en mer près de la ville de Mahajanga sur la côte Nord-Ouest.

De nombreux modèles de prédiction de perte en terre existent. Mais, aucun ne peut être utilisé pour modéliser le mécanisme des *lavaka* (Rakotoson, 1998). On peut utiliser alors une approche non analytique basée la corrélation entre la répartition des manifestations actuelles du phénomène et celle de certains paramètres physiques ou anthropiques. Cette approche a été utilisée pour la prédiction des zones à risque de glissement de terrain en Europe et en Asie (Gupta & Joshi, 1990; Odajima *et al.*, 1998 ; Cardinalli, *et al.*, 2002).

Nous proposons ici d'adapter une méthode d'aide à la décision spatiale utilisée avec les SIG en mode image (*raster*) au cas de l'érosion en *lavaka* (Collet, 1992 ; Eastmann, 1993). Cette méthode a pour avantage de pouvoir fonctionner même dans une situation où certaines données ne sont pas disponibles. L'objectif est de pouvoir délimiter les zones à risque.

2. Zone d'étude et données utilisées

La zone d'étude est le bassin versant de la Sahasarotra, un bassin versant typique des HTC. Elle se trouve à une centaine de kilomètres au nord d'Antananarivo. Le re-

lieu est de type collinaire avec des formes convexes. L'altitude varie entre 1 270 m et 1 590 m. On y observe de nombreuses figures d'érosion en *lavaka* surtout au nord de la zone. Au centre, on observe une bande de terrain presque vierge de figure d'érosion.

Du point de vue géologique, les roches appartiennent au groupe d'Ambatolampy avec des migmatites granitoïdes et des granites migmatitiques (Rantoina, 1966). Le sol est ferrallitique avec parfois des altérites épaisses. Le climat y est de type tropical d'altitude à deux saisons contrastées. La pluviosité annuelle moyenne est de 1 200 mm. La végétation est essentiellement constituée de pseudo-steppe, de quelques forêts de reboisement et de rares reliquats de forêts primaires (Randriamanga *et al.*, 2003).

Les données dont on dispose sont : une carte topographique au 1/100 000, une carte géologique à la même échelle, une série de photographies aériennes. À partir de ces données initiales, on a construit un système d'information géographique avec différentes couches d'informations dont : un modèle numérique de terrain (MNT), des couches « occupation des sols » et « géologie »

3. Traitements des données

L'approche est faite en deux étapes. D'abord, un inventaire des facteurs susceptibles d'influer sur le déclenchement des *lavaka* suivi de l'évaluation de l'influence de chaque facteur.

Pour évaluer l'influence de chaque facteur, on croise la couche *lavaka* rendue binaire avec chacune de ces couches. On récupère ainsi les valeurs des facteurs pour chaque pixel *lavaka*. On les reporte ensuite sur un histogramme.

La deuxième étape consiste à évaluer les actions combinées des facteurs par une approche multicritère. Cette seconde phase se base sur les résultats de la phase précédente et sur les caractéristiques tirées des zones actuellement connues comme étant érodées.

La combinaison des influences des différents facteurs se fait par attribution de notes pour chaque facteur et pour chaque pixel de la zone d'étude. Chaque note traduit l'influence du facteur sur le pixel considéré. L'histogramme montrant la fréquence relative d'apparition du facteur considéré (fréquence d'apparition à l'intérieur des *lavaka* sur sa fréquence d'apparition globale) traduit l'influence qu'exerce ce facteur dans le phénomène d'érosion. L'histogramme est normalisé et donne la note à affecter à chaque valeur du facteur. D'où une nouvelle couche d'information « notes » pour chaque facteur.

Chaque facteur n'a pas la même influence sur le phénomène d'érosion. Ces influences différentes peuvent se traduire par des pondérations différentes à appliquer à la note de chaque facteur (analogie avec le système de notation scolaire). Le choix des coefficients sera la traduction des connaissances qu'a l'homme d'étude sur le phénomène et sa zone de travail. Une méthode pouvant être utilisée pour trouver ces coefficients de pondération est la méthode AHP (Saaty, 1977). Il s'agit d'une comparaison par paire des facteurs. La sensibilité totale à l'érosion

est donnée par la note pondérée totale obtenue par chaque pixel. Plus la note est élevée, plus le pixel est sensible à l'érosion.

Le principal grief que l'on peut porter envers cette approche est la compensation qui existe entre les notes. Un pixel obtenant une note élevée pour un facteur, et donc ayant une forte sensibilité à l'érosion, peut voir cette sensibilité « repêchée » par une « mauvaise » note obtenue pour un autre facteur, alors que dans la réalité le risque peut exister dès lors qu'un ou plusieurs facteurs favorisent le phénomène.

Pour atténuer ce phénomène, on adopte une approche qui consiste à ordonner les facteurs pondérés (OWA : *ordered weighted averaging*, Collet, 1992). Ceci consiste à affecter une nouvelle série de poids aux notes déjà pondérées précédemment. Cette fois-ci l'attribution des poids pour un pixel se fait suivant les notes obtenues par chaque facteur. Le facteur n°1 sera celui qui a obtenu la meilleure note pour ce pixel. Le dernier étant celui qui a la plus faible note. La somme des poids doit être égale à 1.

Le choix des poids, cette fois encore, traduit la vision qu'a l'homme d'étude du phénomène. Une série de poids telle que « 1,0, 0,...,0 » est une vision « prudente » du phénomène. Il suffit qu'un facteur soit favorable au phénomène pour que le pixel soit déclaré « à risque ». Ceci correspond au « ou logique » en raisonnement booléen. On peut évidemment choisir les poids pour décrire des approches intermédiaires.

4. Résultats

Plusieurs couches thématiques ont été produites : une couche « villages », une couche « voies de communications », une couche « géologie » et une couche montrant les *lavaka* recensés et identifiés dans le bassin versant.

Les facteurs jugés comme ayant une influence sur le déclenchement de l'érosion sont la forme du relief, la nature des sols, la tectonique, l'hydrographie et les activités humaines. Des couches d'information initiales, on a dérivé des nouvelles couches :

- « pente », dérivée première de la surface topographique suivant la ligne de plus grande pente ;
- « direction pente », direction des lignes de plus grande pente ;
- « courbure verticale », courbure de la surface topographique suivant un plan vertical ;
- « courbure perpendiculaire », courbure de la surface topographique suivant un plan perpendiculaire au plan précédent ;
- « linéaments », emplacement des linéaments tectoniques susceptibles de jouer ;
- « villages », emplacement des lieux d'habitation ;
- « routes », emplacement des voies de communication ;
- « hydrographie », emplacement du réseau hydrographique ;
- « distance aux linéaments », distance au linéament tectonique le plus proche ;

- « distance aux lieux d'habitation », distance par rapport au village le plus proche ;
- « distance aux voies de communication », distance par rapport à la piste la plus proche ;
- « distance au réseau hydrographique », distance par rapport au cours d'eau le plus proche ;
- « altitude » ;
- « géologie », nature géologie des roches.

Après la première phase de la méthode, on a éliminé de la liste des facteurs pertinents la distance aux linéaments et la direction de la ligne de plus grande pente. Les histogrammes correspondant ne présentent pas de variation notable (Rakotondraompiana *et al.*, 2003).

La première série de poids, obtenue par la méthode AHP, est le reflet de la vision des différents spécialistes ayant participé à cette étude. Pour trouver la seconde série de poids, on a utilisé la carte de répartition des *lavaka*. Les poids sont obtenus par la procédure des essais-erreurs jusqu'à ce la carte obtenue reflète celle de répartition des *lavaka* actuels. On considère alors qu'on a la carte prédisant le niveau de risque d'érosion de chaque pixel. La validité de cette carte est faite à partir des pixels actuellement soumis à l'érosion.

5. Discussions

L'algorithme donne des résultats appréciables même dans le cas où les données disponibles seraient en nombre insuffisant, comme c'est généralement le cas dans les pays en développement. Il pourra être utilisé pour orienter les projets d'aménagement de bassin versant. Il a l'avantage de pouvoir fonctionner même dans le cas où certaines données viennent à manquer. Plus on dispose de données, plus la précision de la prédiction est bonne. D'autres approches multicritères existent (ex. Schärli, 1985), mais leur adaptation pour la résolution d'un problème spatial reste encore non résolue.

Ce travail a reçu un appui financier de l'AUF (ARP-Téledétection et géorisques à Madagascar).

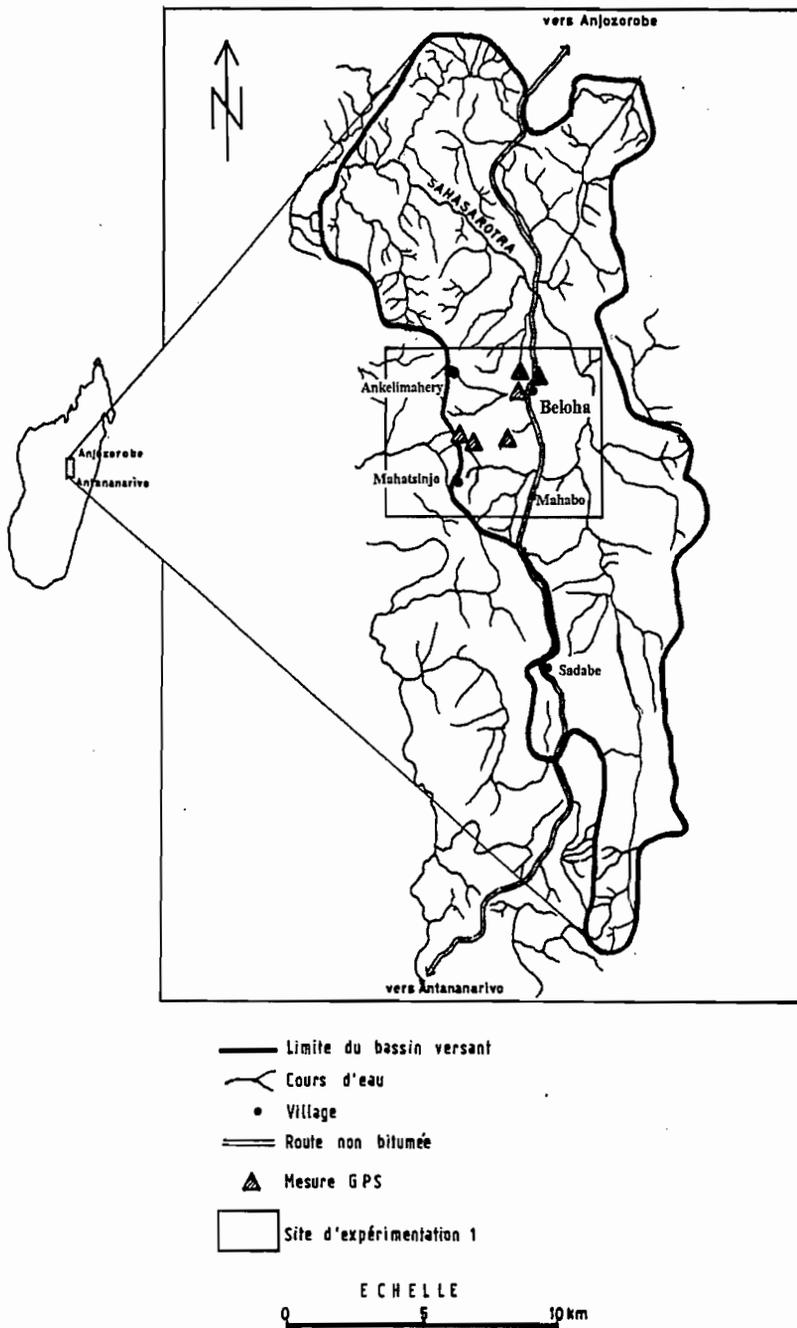
Références bibliographiques

- CARDINALI, M., REICHENBACH, P., GUZZETTI, F., ARDIZZONE, F., ANTONINI, G., GALLI, M., CACCIANO, M., CASTELLANI, M., SALVATI, P., 2002, «A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, central Italy», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n° 2 : 57-72
- COLLET, C., 1992, *Systèmes d'information géographique en mode image*, Presses polytechniques et universitaires romandes, (PPUR) Lausanne, Suisse, pp. 139-162
- EASTMAN, R., 1993, *Idrisi version 4.0 et 4.1, un SIG en mode image*, traduction française des manuels IDRISI par C. Collet, Publication du CRIF, 1995, (R. Caloz, C. Collet, dir.), EPFL, Lausanne, Suisse, 634 pp.

3. Méthodes : indicateurs, SIG, cartographie

- GUPTA, R. P., JOSHI, B. C., 1990, « Landslide hazard zoning using the GIS approach, A case study from the Ramganga catchment, Himalayas », *Engineering Geology*, 28 : 119-131
- ODAJIMA, T., TSUCHIDA, S., YAMAGUCHI, Y., KAMAI, T., SIAGIAN, Y., SUGALANG, 1998, « GIS and remote sensing based analysis of landslide in Cianjur, West Java, Indonesia », *proceedings of the International Symposium on Application of Remote Sensing and GIS to Disaster Reduction*, pp. 185-190
- RAKOTOSON, E., 1998, *Modèles d'érosion pour l'aménagement de bassin versant, Cas du bassin versant de Menaloha*, mémoire de fin d'études, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 80 pp.
- RAKOTONDRAOMPIANA, S., RANDRIANARISON, T., COLLET, C., 2003, « Caractérisation des zones d'érosion hydrique à partir des paramètres géomorphométriques : cas d'un bassin versant des hautes terres de Madagascar », *Télétection*, 3, 1 : 59-67
- RANDRIAMANGA, S., COLLET, C., RAKOTONDRAOMPIANA, S., RANDRIANARISON, L. T., 2003, « Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjozorobe, Madagascar », *Télétection*, vol. 3, n° 2-3-4 : 131-149
- SAATY, 1977, « A scaling method for priorities in hierarchical structures », *J. Math. Psychology*, 15 : 234-281
- SAHA, A. K., GUPTA, R. P., ARORA, M. K., 2002, « GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (ganga) valley, Himalayas » *Int. Jour. Remote Sensing*. 23, 2 : 357-369
- SCHÄRLIG, A., 1985, *Décider sur plusieurs critères, Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), Lausanne, Suisse, 304 pp.

Localisation de la zone d'étude



Application de la télédétection et des SIG dans la gestion des sols d'un bassin versant des Hautes Terres centrales malgaches

SIMONE RANDRIAMANGA¹, HAJA MAMINIRINA ANDRIANAVALONA MIARINJATOVO²

département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo, B. P. 907, Antananarivo, 101, Madagascar

Tél. : +261 (20) 22 235 63 ; Courriel : ¹baratsiv@wanadoo.mg ;

²hajandrianaivalona@yahoo.fr

1. Contexte de l'étude et problématique

L'érosion des sols est la cause majeure de la régression des systèmes de production agricole à Madagascar. Elle revêt de multiples formes. Ce sont des mouvements de masse telles les coulées de blocs rocheux ou les glissements de terrain sur des sols argileux, plastiques à forte pente, ou des formes de solifluxion ou de reptation sur des sols déstabilisés des versants montagneux, des ravines tels les *sakasaka* dans l'ouest malgache et les *lavaka* sur les hauts plateaux de Madagascar.

Dans le bassin versant de Sahasarotra, au nord est d'Antananarivo sur les Hautes Terres centrales, les formes d'érosion les plus fréquentes sont : l'érosion en nappe, les rigoles et les *lavaka*. Mais si l'érosion est une des plus évidentes, les mécanismes sont encore loin d'être bien compris. Notre hypothèse de départ considère ces différentes formes d'érosion comme principales causes des pertes en terres cultivables pour les paysans, donc cause de la persistance de leur pauvreté.

Notre questionnement est de savoir quels *processus* caractérisent les formes d'érosion du bassin versant de Sahasarotra ? Quelles sont les attitudes que le paysan adopte face à l'érosion ? Quels sont ses modes de gestion et quelles améliorations peut-on y apporter ?

2. Présentation de la zone d'étude

La Sahasarotra est un affluent du Jabo dont la réunion avec l'Amparihibe constitue le cours supérieur de la Betsiboka. Cette dernière forme avec la Mahajamba le plus grand bassin fluvial de Madagascar couvrant 63 450 km² (Chaperon P. *et al*, 1993).

Le bassin versant de Sahasarotra s'étend sur une superficie de 193,27 km². C'est une région de collines convexe-concaves, qui culmine au sud à 1590 m. Son altitude moyenne est de 1380 m. La partie centrale est moins élevée (1270 m). Les vallées sont encaissées dans la partie nord, monotones et entrecoupées par des crêtes granitiques dans la partie sud.

La région repose sur un socle cristallin, d'âge précambrien appartenant au système du graphite du groupe d'Ambatolampy (Hottin, 1976). Il est constitué de roches migmatites granitoïdes, de granites migmatitiques et migmatite gneissique.

Les sols du bassin versant de Sahasarotra sont des sols ferrallitiques jaune sur rouge, perméables, de texture limoneuse, très acides, à faibles capacités d'échange, fortement désaturés et pauvres en bases échangeables. Ces sols manquent de cohésion et sont très sensibles à l'érosion (Randriamanga *et al.* 2001). Ces sols sont en général épais, anciens et fortement altérés. Trois classes de sols ont été observés et mis en relation avec les composantes du milieu naturel : les sols ferrallitiques des sommets ou des bas de pente, les sols peu évolués d'érosion des pentes raides et les sols hydromorphes des bas fonds (Randriamboavonjy J. C., 2005). Le bassin versant est doté d'un climat tropical d'altitude à deux saisons contrastées : une saison sèche et fraîche de mai à octobre et une saison chaude et humide de novembre à avril. Elle reçoit une lame d'eau annuelle d'environ 1235 mm.

Les forêts originelles ont quasiment toutes disparu. Le domaine forestier est donc d'origine anthropique. Il s'agit essentiellement de reboisements d'*Eucalyptus robusta* et *Eucalyptus camaldulenses*, entourés de pseudo-steppes ou steppes à *Aristida rufescens* ou à *Hyparrhenia rufa* (Randriamanga *et al.* 2001) qui servent de pâturage, ce qui explique la sensibilité aux incendies et la vulnérabilité à l'érosion du couvert forestier.

Le réseau hydrographique est dense. De direction générale sud nord, la pente est forte de l'ordre de 10 m/km (Chaperon *et al.* 1993). Aussi les cours d'eau ont-ils une forte puissance de transport. Les rivières sont encaissées par endroits et dessinent des méandres sur les surfaces planes. La résurgence de la nappe phréatique s'effectue au niveau des bas fonds sous forme de source. Le drain est dirigé vers le canal de Mozambique, à l'ouest.

La densité de la population est élevée : 76 à 93 habitants au km² contre 35 dans les autres parties de l'île. L'activité principale de la population est la riziculture irriguée pratiquée dans les zones de bas-fonds sur des sols hydromorphes. Les plantes maraîchères sont cultivées sur les terrasses alluviales et en bas de versant. Le maïs et le manioc occupent les flancs des collines et les reboisements, les sommets.

Quatre sites tests représentatifs des différentes formes d'érosion rencontrées dans le bassin versant de Sahasarotra ont été choisis pour l'étude. Il s'agit des communes rurales de Mangatany Nord, Beloha, Mahabo et Sadabe.

3. Objectifs

Deux objectifs principaux guident les travaux : étudier les possibilités qu'offrent la télédétection et le SIG dans la gestion des sols d'un bassin versant, et développer un modèle de gestion du bassin versant de Sahasarotra.

4. Matériel utilisé

Nous avons disposé de différentes cartes : cartes topographiques au 1/100 000 Ambohimanga (1969) et Ambatomena (1954), du Foiben Taosarintany Madagas-

car (FTM), cartes géologiques au 1/100 000 Ambohimanga (1965) et Ambatomena (1965) du Service des mines de Madagascar et différentes cartes thématiques du bassin versant de Sahasarotra : carte d'occupation des sols tirée de la photo-interprétation de dix couples stéréoscopiques de photographies aériennes de 1949, carte des types de *lavaka*, carte morphopédologique et carte des vocations des sols élaborées dans le cadre de programmes de recherche précédents, dix mesures de résistivité effectuées dans le secteur de Beloha, d'une image satellitale de la fin du mois de septembre 1994, acquise par le capteur TM de LANDSAT, des résultats d'enquêtes et différents logiciels de traitement d'image et de SIG.

5. Méthode de recherche

Les étapes de la recherche passent par une phase diagnostic pour inventorier et analyser les *processus* d'érosion par télédétection spatiale, une phase d'analyse, d'observation et d'enquêtes sur terrain pour une meilleure compréhension des *processus* de production et des pratiques paysannes de défense des sols et par une phase d'intégration des données au sol et de télédétection dans un SIG pour fabriquer un modèle de gestion et d'aménagement du bassin versant afin de suggérer des attitudes de gestion et d'aménagement du dit bassin.

Le traitement des images satellitales passe par les différentes étapes propres au traitement numérique d'image de télédétection optique : visualisation des canaux bruts, amélioration de l'image, création de néo-canaux avec calcul des indices de brillance et de végétation, analyse en composantes principales, création d'une nouvelle composition colorée, classification de l'image, création de la signature spectrale pour chaque classe d'objet obtenu, validation.

Des mesures GPS (*Global Positionning System*) ont été réalisées pour positionner les zones de prise d'échantillon et d'observation des sols.

Les profils de sols ont été étudiés sur le terrain à partir de fosses pédologiques d'environ 50 cm de profondeur, ouvertes le long des toposéquences au sommet, sur le flanc des collines et dans les bas fonds. Les observations et l'analyse de chacun des horizons des sols ont porté sur les aspects physiques : couleur, épaisseur des couches, texture et structure..., le mode d'enracinement et les activités biologiques des sols. Les caractéristiques géotechniques et les propriétés physico chimiques des sols ont été analysées au laboratoire à partir de 26 échantillons de sols prélevés dans 12 points d'observation.

Deux types d'enquêtes ont été réalisés : enquêtes ménages, semi structurées effectuées à Mangatany Nord et Beloha, sur un taux d'échantillonnage égal à 10 %. Elles ont porté sur les systèmes de production et les modes de gestion paysanne des terrains de cultures pour la compréhension des rapports homme/milieu naturel. Les échantillons ont été choisis suivant la fonction, le rôle et la classe d'âge des villageois pour une meilleure représentativité et étendre la simulation sur l'ensemble de la population du village.

Les entretiens de type aléatoire faits au hasard des rencontres ont été réalisés auprès des paysans de Mahabo et de Sadabe pour la recherche d'information sur l'érosion. Ils ont été faits pour compléter et valider les réponses obtenues par les enquêtes dites «par quota» précédentes.

La restitution des données s'est déroulée suivant la méthode participative.

La constitution de la base des données géographiques a débuté par l'importation de l'image TM du bassin versant de la Sahasarotra dans IDRISI 32 qui a été géoréférencée à partir de quatre points de contrôle de la carte topographique. On a intégré ensuite au SIG les données de la télédétection : cartes d'occupation des sols de 1949 et de 1994 obtenues par photo interprétation des photographies aériennes de 1949 et la classification de l'image de 1994, carte des types de *lavaka* fabriquée à partir de la vectorisation de l'image classée de 1994 ainsi que les données exogènes issues des observations, analyses et mesures sur le terrain telles les données pédologiques et les résultats d'enquête ou encore la carte géologique numérisée. La base de données géographiques (BDG) ainsi constituée décrit les objets spatiaux : leur localisation, leur forme et les caractéristiques thématiques ou attributs de ces objets : potentialités des sols... Ce sont ces données qui vont être utilisées pour l'analyse spatiale.

On procède à divers croisements et à l'interrogation de la BDG. Le croisement des couches thématiques à l'exemple de la carte géologique et la carte des types de *lavaka*, est fait pour caractériser l'érosion en *lavaka*. La compréhension des processus d'érosion est obtenue à travers différentes requêtes du type : quelle est la nature du sol à l'endroit des *lavaka* ? Sur quel type de terrain se concentrent les *lavaka* ?

Cette étape est nécessaire pour la fabrication d'autres couches thématiques qui entrent dans l'élaboration du modèle de gestion et d'aménagement théoriques du bassin versant de Sahasarotra. L'élaboration du plan de gestion consiste à classifier les données des cartes suivant différents niveaux de vocation, d'aptitude et de risques érosifs des sols.

Différentes cartes sont générées par croisement des données : carte des pentes, des zones à risque de *lavaka*, carte des vocations des sols... Les manipulations ont conduit au modèle de gestion et d'aménagement du bassin versant de Sahasarotra.

6. Résultats de l'étude

Nous avons caractérisé les formes et les processus d'érosion du bassin versant de Sahasarotra en particulier les *lavaka*. Quatre types de *lavaka* ont été répertoriés suivant leur localisation : *lavaka* sur les flancs de colline en forme d'entonnoir, *lavaka* à proximité d'une rivière à base largement ouverte, *lavaka* à proximité d'un cours d'eau et sur le flanc d'une colline, pour la plupart dendritiques et *lavaka* près d'une piste aux formes plus ou moins digitées. Deux processus caractérisant l'érosion en *lavaka* ont été identifiés : *lavaka* résultant d'affouillement basal et *lavaka* par glissement rotationnel.

Les observations, enquêtes et interviews sur le terrain ont fait ressortir différentes pratiques paysannes de défens des sols contre l'ensablement et les *lavaka* : utilisation de canaux antiérosifs rudimentaires pour pallier à l'action du ruissellement, abandon du champs et migration du paysan quand le sol ne produit plus. Mais en général le paysan du bassin versant de Sahasarotra semblent s'accommoder de la présence d'un *lavaka* et continuent à cultiver à proximité. En réalité les pratiques agricoles sont souvent antérieures au *lavaka*. Le paysan continue

d'exploiter la terre tant que celle-ci est utilisable.

Différentes couches thématiques et matricielles ont été fabriquées et diverses cartes produites : carte des pentes, carte géologique, carte des types de *lavaka*.

Le croisement des cartes a permis de dresser le modèle de gestion du bassin versant de Sahasarotra. Huit zones d'action sont ainsi identifiées :

- zone pouvant être aménagées en rizières ;
- zones de cultures vivrières de bas de pente ou cultures maraîchères, ne nécessitant pas de protection antiérosive ;
- zone agricole pouvant accueillir des cultures vivrières ou fruitières sur les flancs de collines avec un minimum de protection ;
- zone agricole à usages multiples : reboisement de production, pâturage et culture fruitière ;
- zone destinée à un reboisement de production ou de protection ;
- zone nécessitant une protection absolue à vocation forestière avec reboisement de protection ou réembroussaillement ;
- zone de *lavaka* nécessitant des mesures correctives et dont l'évolution peut encore être stoppée ;
- zone de *lavaka* où la protection doit être absolue avec mesures de stabilisation.

7. Discussion et conclusion

Ainsi deux attitudes, quant aux mesures de protection pour les *lavaka* sont suggérées : mesures correctives de protection absolue et de stabilisation.

Le modèle de gestion ainsi défini sera par la suite mis à profit dans des prochaines études pour élaborer le schéma d'aménagement et de gestion du bassin versant de Sahasarotra, compte tenue des moyens disponibles, des objectifs des paysans, de leurs possibilités et contraintes.

Cette étude a montré qu'à partir de la télédétection on peut appréhender l'érosion dans un bassin versant et disposer d'un système de collecte rapide d'informations sur le milieu naturel. L'intégration des informations issues de la télédétection et d'autres sources dans un SIG permet de mettre en place un mécanisme de gestion efficace des sols. Le SIG couplé à la télédétection, s'avère être une bonne base de travail pour la cartographie, l'aménagement et la gestion des terres.

Mots clefs : Madagascar ; érosion ; *lavaka* ; Télédétection ; SIG ; gestion de la terre ; développement durable.

Références bibliographiques

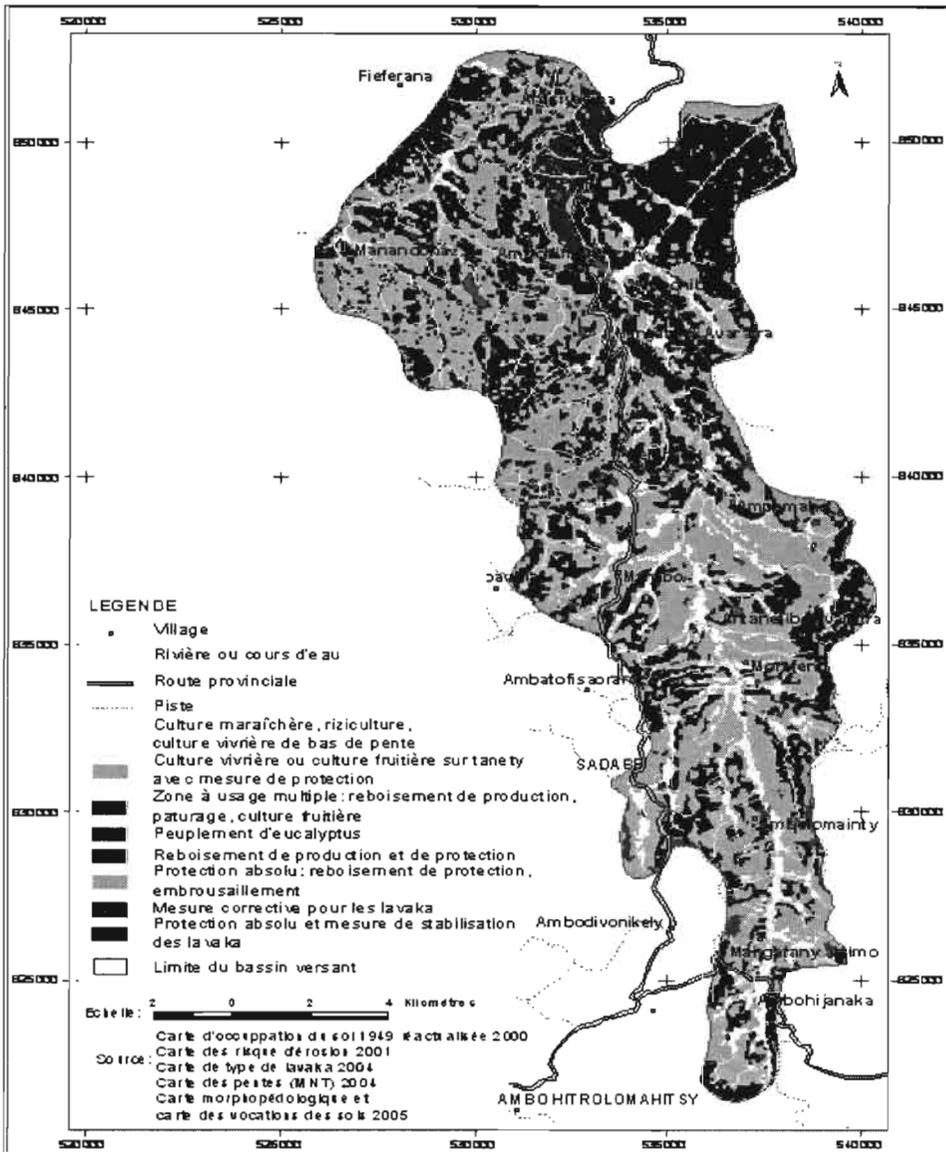
- CHAPERON, P., DANLOUX, J., FERRY, L., 1993, *Fleuves et Rivières de Madagascar*, IRD Éditions, ministère de la Recherche scientifique Madagascar, ministère des Transports et la Météorologie, Paris, 874 pp.
- HOTTIN, G., 1976, « Précambrien de Madagascar », *Bull. BRGM*, IV, pp. 151-199
- RAKOTONDRAOMPIANA, S., RANDRIANARISON, T., COLLET, C., 2002, « Caractérisation des zones d'érosion à partir des paramètres géomorphologiques : cas d'un bassin versant des hautes terres de Madagascar », in revue *Télédétection*, Vol. 2 n° 2-3 (2003), pp. 55-67

RANDRIAMBOAVONJY, J. C., 2005, *Pédomorphologie du bassin versant de Sahasarotra*, rapport technique d'étude pédologique, projet CORUS 200 1 00 22 00, composante 04, « Transformation et gestion des paysages à Madagascar », Antananarivo, 21 pp.

RANDRIAMANGA, S., COLLET, C., RAKOTONDRAOMPIANA, S., RANDRIANARISON, L.-T., 2003, « Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjozorobe », in revue *Télédétection* Vol. 3 n° 2-3 2003, pp. 131-149

RANDRIAMANGA, S., RAKOTONDRAOMPIANA, S., RAHARIJAONA RAHARISON, L. J., RAZAFY FARA, L., RANDRIANARISON, L. T., RATOVO, H. M., 2001, *Télédétection et érosion à Madagascar, le cas du bassin versant de la Sahasarotra*, comm. affichée, MINESUP/DR, Mahajanga octobre 2000

Suggestion de plan pour la gestion du bassin versant de Sahasarotra



Potentiel comparé des données de Météosat seconde génération (MSG) et de l'imagerie *radar wide swath* au suivi des crues et de l'envasement du lac Alaotra

LOVA TAHINA RANDRIANARISON¹, FANJA NIRINA HANITRA RAMAHATODY², LAURENT BEAUDOIN³, JEAN-PAUL RUDANT⁴, SOLOFO RAKOTONDRAOMPIANA⁵, JEAN-BRUNO RATSIMBAZAFY⁶, MPARANY ANDRIAMIANINA⁷

¹Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo, centre commun de ressources géomatique. B. P. 3843, 101, Antananarivo, Madagascar,
Tél. : +261 (20) 22 253 53, Fax : +261 (20) 22 301 82,
Courriel : lova_tahina@univ-antananarivo.mg

²département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo, 101, Antananarivo, Madagascar.
Tél. : +261 (33) 14 198 73

³Acquisition et Traitement des Images et Signaux, École supérieure d'informatique électronique automatique, 94200, Ivry-sur-Seine, France.
Tél. : +33 (0)1 49 59 09 41, Courriel : beaudoin@esiea.fr

⁴Institut francilien de géosciences, Université de Marne-la-Vallée, 77454, Marne-la-Vallée, France, Tél. : +33 (0)1 49 32 90 71, Courriel : rudant@univ-mlv.fr

⁵Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo, centre commun de ressources géomatique, B. P. 3843, 101, Antananarivo, Madagascar,
Tél. : +261 (20) 22 253 53, Fax : +261 20 22 301 82,
Courriel : sorako@univ-antananarivo.mg

⁶Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo, centre commun de ressources géomatique. B. P. 3843, 101, Antananarivo, Madagascar,
Tél. : +261 (20) 22 253 53, Fax : +261 (20) 22 301 82, Courriel : jbratsim@wanadoo.mg

⁷département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo, 101, Antananarivo, Madagascar, Tél. : +261 (33) 11 899 57.

Le lac Alaotra est le plus grand lac de Madagascar s'étendant sur 191 km², il est logé sur le flanc oriental des hautes terres malgaches au fond d'une dépression lacustre à 750 m d'altitude. Caractérisé par une profondeur moyenne faible de moins de 1,50 m, le lac est alimenté par plusieurs affluents et n'a qu'un seul exutoire, le Maningory. Son niveau est influencé par le régime de son émissaire et de ses affluents. Limitée par un passage en gorge, l'évacuation par le Maningory est insuffisante lors des pluies abondantes (Raunet, 1984).

Les fortes pluies d'une zone de convergence intertropicale du 1^{er} au 7 mars 2005 ont causé une extension beaucoup plus importante du lac Alaotra par rapport à la normale. Le cumul de pluie de ces sept jours représente les 75 à 100 % de la quantité normale de pluie qui tombe dans la région d'Alaotra-Mangoro au mois de mars (Rabefitia, 2005). Cette répartition irrégulière au niveau de la précipitation mensuelle a conduit à l'inondation de quelques zones à la périphérie immédiate de la zone marécageuse. Deux régions ont été touchées : les communes de Vohitsara et d'Anororo. La catastrophe a laissé un triste bilan de 7 000 sinistrés dont 3 500 sans-abri sur une population de 7 318 habitants pour la commune rurale de Vohitsara, 8 853 sinistrés dont 4 500 sans-abri sur 10 000 habitants pour la commune d'Anororo, ces informations ont été recueillies auprès des autorités locales.

Notre propos est donc de comparer la potentialité des images de MSG et de l'imagerie radar à l'étude de l'extension de ce lac après ces intempéries.

Méthodologie

Météosat 8 ou Météosat seconde génération (MSG) est la nouvelle génération de satellite météorologique géostationnaire. Ses applications majeures sont la prévision du temps, la climatologie et l'étude des changements climatiques terrestres. Mais d'autres applications possibles sont le suivi de l'occupation des sols, des cultures et des cycles de végétation ainsi que la gestion des risques et catastrophes. Les images de MSG présentent un intérêt majeur pour cette étude, elles sont acquises toutes les quinze minutes et permettent un suivi à quasi-temps réel de l'évolution de la situation.

Dans cette étude, nous l'avons utilisé pour la surveillance des crues du lac Alaotra et de l'inondation dans la région d'Alaotra-Mangoro. Ceci est rendu possible par l'utilisation d'indices classiques en télédétection : l'indice de végétation connu sous le sigle NDVI et de l'indice de brillance ou IB. Pour cela il faut échantillonner les bandes pertinentes et les images présentant très peu de nuages. Nous avons fait un seuillage des histogrammes des différents néo-canaux et avons obtenu des images binaires eau/non-eau qui serviront pour déterminer les zones humides. Les échantillons de données utilisées ont été obtenus auprès de l'École supérieure d'informatique électronique automatique, (ESIEA), en France, dans le cadre d'une collaboration de travail.

L'imagerie radar fait partie de la télédétection active, l'antenne se comporte à la fois comme émetteur et récepteur de signaux. L'image est le résultat du traitement des signaux captés, retrodiffusés par les objets terrestres. Avec une résolution plus importante de 100 m, elle est capable de cartographier plus en détail la limite des zones touchées par l'inondation ainsi que les zones très susceptibles à l'érosion et à l'ensablement. Comme les images radar sont des images « tout temps », on peut s'en servir lorsque les images optiques sont noyées dans les nuages (ESA, 2002).

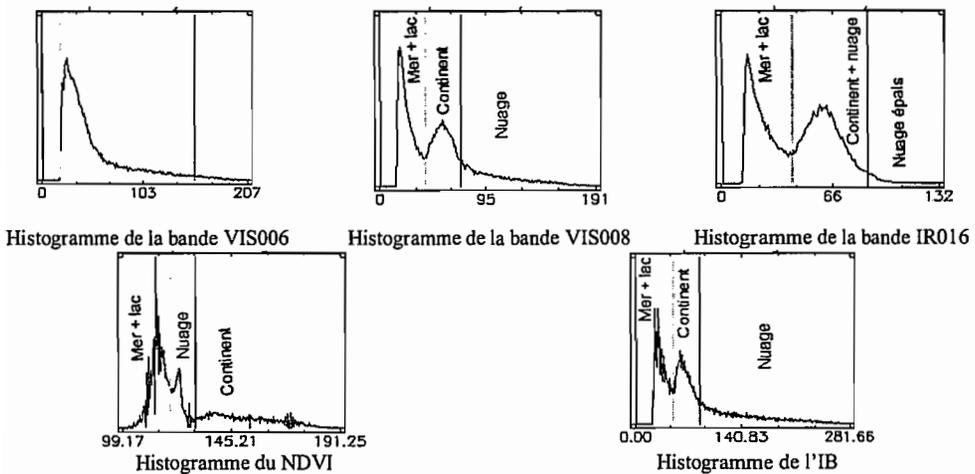
Les images radar sont en provenance du capteur ASAR du satellite ENVISAT de l'Agence spatiale européenne dans le cadre du projet TIGER. Les 4 images en mode *Wide Swath*, et pour l'instant en résolution dégradée, ont permis de compléter les informations sur l'inondation. Nous jugeons que les images en pleine résolution donneront plus de détails sur le problème de l'érosion et de l'envasement. Sur le plan agricole, nous verrons à quel point l'étude de la rétrodiffusion peut être utile pour estimer le rendement agricole après cette catastrophe.

Résultats et interprétation

Potentialité de MSG

L'indice de végétation obtenu à partir des images de MSG permet en général de cartographier et de suivre la dynamique des couvertures végétales du milieu continental. Une analyse de l'histogramme a permis de distinguer 3 objets sur l'image : la mer avec les grands lacs, le nuage et la couverture végétale dans le continent (figure 1). La binarisation de l'image ne pose donc pas de problème, il suffit de saturer les deux classes « mer-eau » et « nuage » à 0 et la classe « continent » à 255. Il y a évidemment une corrélation entre les objets et le seuillage seul ne suffit pas pour la distinction des zones inondées.

Figure 1. Comparaison de l'histogramme des différents canaux et indices avec ses différents modes.



Pour l'indice de brillance, deux modes sont bien nets sur l'histogramme, celui des eaux et celui des continents. Mais de plus, les nuages ont une valeur radiométrique plus élevée sur l'image de cet indice qu'il est plus facile de distinguer l'eau des pôles minéral et végétal.

Les bandes du visible 0,8 μm (VIS008) et du proche infrarouge 1,6 μm (IR016) présentent les mêmes histogrammes que l'indice de brillance (figure 1), IR016 sépare mieux les lacs et la mer des sols et nuages. L'histogramme de la bande du visible 0,6 μm (VIS006) est unimodale et ne présente aucun intérêt dans cette étude. Les mêmes remarques qu'au NDVI sont valables sur la binarisation de l'IB et des bandes spectrales.

La cartographie des lacs a été facilitée par la composition colorée des deux indices et de la bande proche infrarouge (1,6 μm). Cette composition colorée consiste à mettre au canal rouge de l'écran d'affichage l'image binaire de NDVI, au canal vert l'image binaire de IB et au canal bleu l'image binaire de la bande infrarouge. La mer et les lacs sont alors saturés en noir, le continent en blanc et les nuages en cyan. Les nuages peu épais sont colorés en vert à cause de la sensibilité de l'indice de brillance au nuage. Les zones marécageuses et les zones littorales sont plutôt en rouge car le NDVI est très susceptible aux faibles couvertures végétales ou en jaune quand il y a des nuages peu épais.

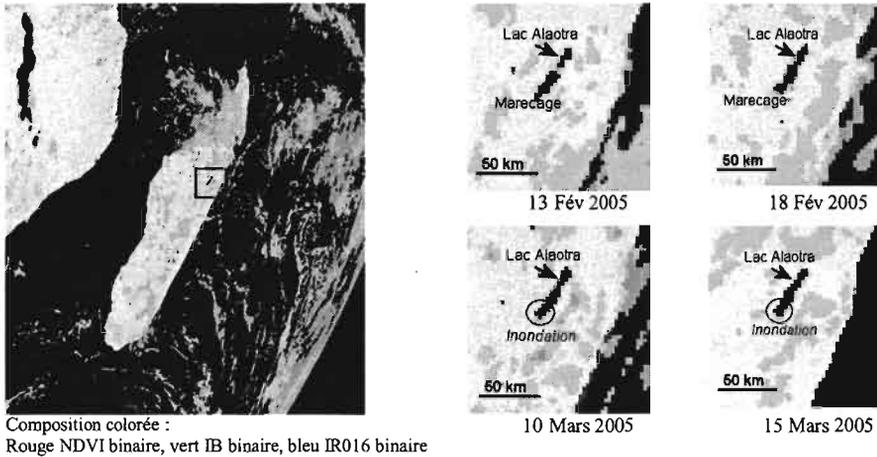
Les mêmes procédures ont été appliquées sur tous les échantillons de données de MSG et ont permis de suivre l'évolution de la crue du lac Alaotra entre février et mars 2005. Les résolutions de MSG pour Madagascar varient de 2,5 à 8 km en x et de 2,5 à 4 km en y, le lac Alaotra ne fait qu'une dizaine de pixels sur l'image. On peut constater sur la figure 2 l'évolution des crues du lac en si peu de temps et l'apparition de l'inondation dans le Sud-Ouest du marécage. Il s'agit des périmètres rizicoles. Les causes essentielles de cette catastrophe sont le débordement des canaux d'irrigation à cause de l'ensablement et surtout de l'importance de la pluie dans la région d'Alaotra-Mangoro ainsi que la faible évacuation à l'exutoire du lac.

Outre le suivi de ce phénomène, les images de MSG pourront servir à la prévision et le suivi des perturbations atmosphériques (orage, zone de convergence intertropicale, cyclone). Il est aussi possible de les utiliser pour l'estimation de la quantité de pluie tombée (*rainfall estimation*) dans un bassin versant et donc pour l'étude du bilan hydrique (Alfari I. *et al.*, 2001). Bref, ces images aideront beaucoup pour la gestion et la conservation de l'eau. Particulièrement pour le cas du lac Alaotra, elles éclaircit les autorités et les organismes dans leur action d'aide humanitaire.

Potentialité des images radar

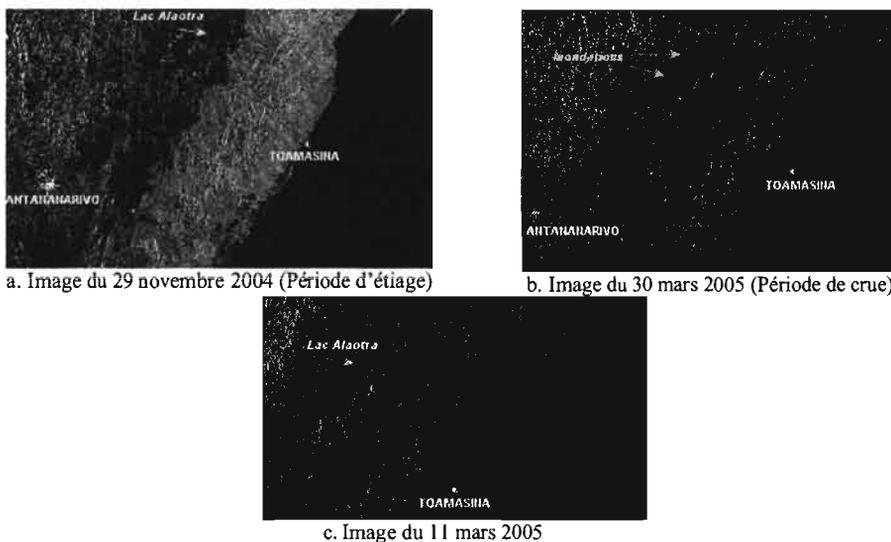
Une étude comparative avec les images radar nous permet de compléter les informations obtenues avec le MSG. Les images en aperçu (*quicklook* en anglais) d'une résolution dégradée de ASAR *Wide Swath* nous renseignent un autre cas d'inondation dans la partie centrale Ouest du lac en plus du cas au Sud du marécage. Ceci correspond à l'inondation de la commune d'Anororo.

Figure 2. Évolution des crues du lac Alaotra et de l'inondation entre février et mars 2005.



L'image du 11 mars 2005 est tout particulièrement intéressante, nous pensons qu'elle illustre la turbidité de l'eau et donc l'importance des sédiments charriés par l'écoulement des eaux vers le lac (figure 3c). Cette potentialité pourrait servir pour l'étude de l'envasement du lac qui, d'après les mesures bathymétriques faites aux mois de octobre 2004 et de mars 2005, n'est profond que de moins de 1,50 m en moyenne.

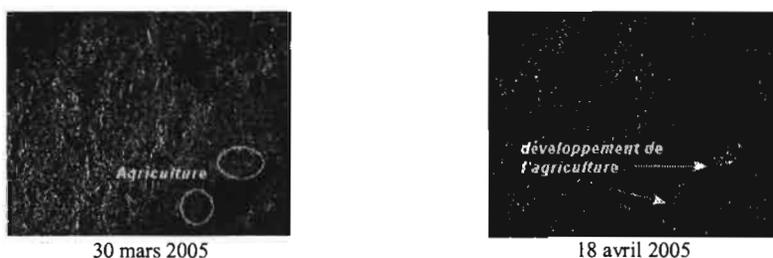
Figure 3. Crue du lac Alaotra et inondations dans la région d'Alaotra-Mangoro.



Les zones claires dans la partie Nord de la zone inondée et dans la partie Sud-Ouest du marécage de l'image du 18 mars 2005 correspondent à des plaines rizicoles, non inondées. Les réponses du radar nous renseignent un développement de la culture appréciable (figure 4).

On peut coupler l'utilisation des images radar avec d'autres bases de données géographiques pour une meilleure estimation des sinistrés, de dégât au niveau de l'agriculture et de l'infrastructure (Aichouche B. A. *et al.*, 2002). Toutefois, son exploitation n'est pas au moment du cataclysme mais un peu retardé car il faut attendre encore plusieurs jours voire quelques semaines pour acquérir les images. Comme il s'agit d'un satellite héliosynchrone qui capte les images, les données ne correspondent pas forcément aux dates voulues pour les études.

Figure 4. Évolution de l'agriculture après l'inondation



Références bibliographiques

- AICHOUCHE, B. A., MOSTEFA, B. A., RADJAA, K., 2002, « Fusion contextuelle d'images RSO (ERS1) et TM Landsat 5 », actes des IX^e Journées du réseau Télédétection. pp. 152-153
- ALFARI, I., DJABY, B., ANDRÉA, D. V., MARACCHI, G., 2001, *Use of meteosat derived rainfall estimates to monitor sahel vegetation, Environmental applications of Meteosat*, Section 4.2, pp. 106-112
- EUROPEAN SPACE AGENCY, 2002, *Envisat ASAR Product handbook*, issue 1.1, ESA Decembre 2002
- RABEFITIA, Z., 2005, Saison cyclonique 2004-2005, Gestion des risques et catastrophes, Catholic Relief Service, Madagascar
- RAUNET, M., 1984, *Région du lac Alaotra Madagascar : milieu physique, système et structure*, IRAT Montpellier, France

Prévision des zones sensibles à l'érosion à partir des données à références spatiales - démarche de base

MINONIAINA RAZAFINDRAMANGA

département eaux et forêts de l'École supérieur des sciences agronomiques de l'Université d'Antananarivo, B. P. 175, 101, Antananarivo, Madagascar,
Tél. : +261 (20) 22 316 09/261 20 22 611 84,
Courriels : mino.razafindramanga@univ-antananarivo.mg ;
m.razafindramanga@simicro.mg

Résumé

Pour un développement rural durable, l'étude approfondie des conditions du milieu, dont les conditions pédologiques, est indispensable. Les zones à risques et les zones favorables aux activités agricoles devront être détectées. Pour ce faire, cette étude essaie de définir une méthodologie d'approche basée sur l'analyse spatiale. Cette méthode est testée pour la première fois dans la région Nord-Est de Madagascar.

La démarche adoptée comprend cinq étapes :

- l'analyse des données disponibles ;
- la production des cartes intermédiaires ;
- l'élaboration de cartes des sous régions naturelles ;
- les travaux de terrain ;
- et la cartographie des sites sélectionnés.

L'analyse des données disponibles consiste à réfléchir sur les possibilités de leur utilisation dans le cadre de la présente étude. Il s'agit des données analogiques telles les cartes topographiques et les cartes géologiques au 1/100 000, l'image spatiale numérique LANDSAT TM (158/70 du 21/11/94) et les cartes IEFN au 1/200 000. Les autres données numériques à disposition sont les bases de données (BD 500) du FTM. Vu l'échelle et la qualité des produits à fournir, 1/200 000, 1/100 000 le choix des matériels à utiliser s'est orienté aux données analogiques.

L'étape suivante concerne l'élaboration des cartes intermédiaires au 1/200 000. L'examen et la superposition manuelle de ces documents ont permis de déduire les cartes d'occupations de sol, les cartes géologiques simplifiées, les cartes des unités physiques et les cartes des pentes.

L'établissement des cartes préliminaires des zones à risques d'érosion au 1/200 000 s'est fait à partir de la superposition des cartes résultantes de la phase précédente. Le produit ainsi obtenu a été corrigé et digitalisé dans un SIG après confrontation avec d'autres données exogènes.

Les travaux de terrain ont permis le recouplement cartes élaborées avec les réalités du milieu. C'est ainsi que les cartes définitives des zones à risques ont pu être réalisées.

Mots clés : Érosion ; méthodologie ; risques ; télédétection ; SIG

Références bibliographiques

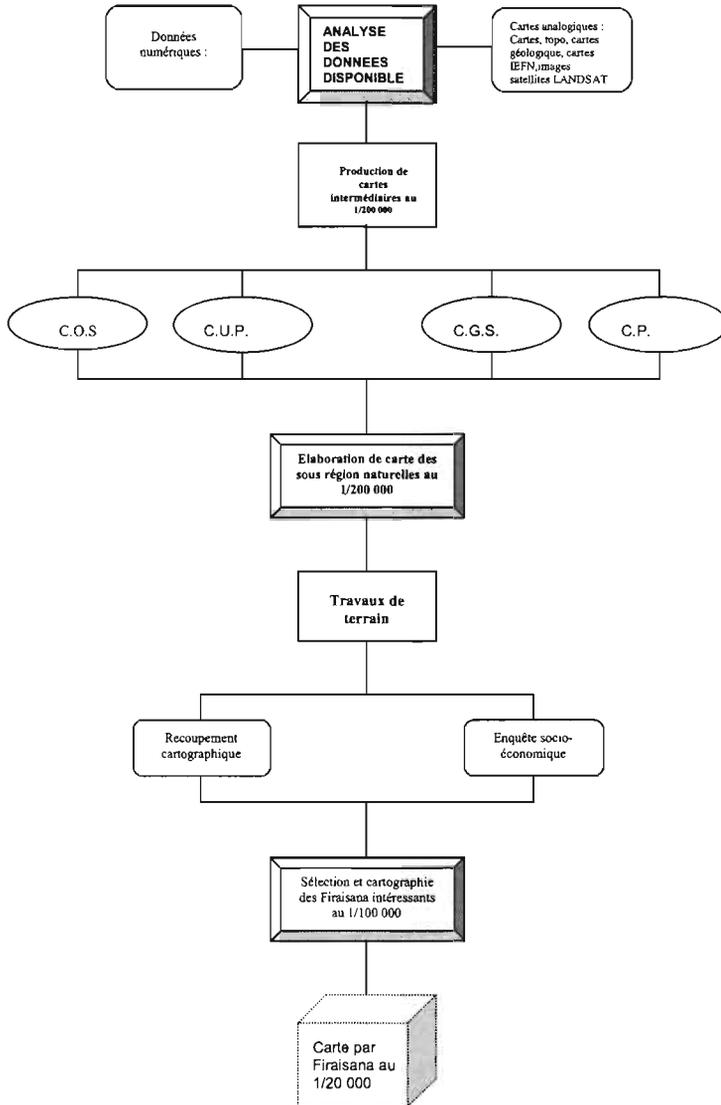
- BURROUGH, P. A., 1992, *Principle of Geographical Information System for Lands Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford, 193 pp.
- CABINET ADAPT, 2000, « Étude régionale de la SAVA », *rapport global 2^e phase*, 34 pp.
- RANAIVOARISON, R., 1999, *Conception et Élaboration des outils de gestion durable des ressources naturelles dans le département d'Ambatolampy par l'utilisation du SIG*, mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, ESSA-Forêts, 92 pp.
- RANDRANTSIZAFY, I., 2004, *Proposition de mise en valeur des sols d'une commune en utilisant l'outil SIG, Cas de la commune de Tsinjoarivo*, mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, ESSA-Forêts, 79 pp.
- RAZAFINDRAMANGA, M. L., RANDRIAMBOAVONJY, J.-C., 1990, *Élaboration de la carte pédomorphologique du Firaisana d'Ambalavao*, ESSA-Forêts, 81 pp.
- RAZAFINDRAMANGA, M. L., 1994, « Zonage de l'occupation des sols en Imerina à partir de la télédétection » *in rev. Akon'ny Ala* n° 14, ESSA-Forêts, pp. 19-31

Tableau 1 Portées et limites des cartes établies.

Portées	Limites
<ul style="list-style-type: none"> - Les cartes sont dressées à partir des données à échelles plus proches (1/100 000 et 1/200 000) de celle prévue (1/200 000). Ce qui présente plus de précision par rapport à l'agrandissement des données au 1/500 000. - L'utilisation des cartes analogiques produites sur papier calque favorise les discussions entre les membres de l'équipe et la démarche participative (croisement des cartes plus aisées) - Par rapport au nombre de cartes analogiques utilisées (9 cartes topographiques, 7 cartes géologiques et 2 cartes d'occupation des sols), la méthode adoptée paraît être plus rapide puisque la numérisation de ces différentes cartes exige encore beaucoup de temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les cartes analogiques doivent encore être numérisées. - La superposition manuelle combinée au caractère "thermolabile" du papier calque risque de produire un léger décalage entre les unités cartographiques. Ce défaut aurait dû être corrigé sur terrain à l'aide d'un GPS. - Les cartes produites jusqu'ici ne couvrent pas toute la région de travail (SAVA) sur tout pour les fivondronana de Vohémar, et d'Antalaha

Figure 1. Schéma de l'itinéraire méthodologique

C.O.S. : carte d'occupation de sol ;
C.U.P. : carte des unités physiques ;
C.G.S. : carte géologique



Utilisation d'un appareil simple, mais précis, pour mesurer l'érosion en conditions extrêmes à Mayotte

JEAN-MICHEL SARRAILH

Cirad, 7 chemin de l'IRAT, 97410, Saint-Pierre, La Réunion,
Tél. : +262 49 92 52 ; Courriel : sarrailh@cirad.fr

Introduction

Dans le cadre d'un programme d'étude sur les mangroves, le département de l'agriculture et de la forêt (DAF) a demandé au Cirad d'évaluer l'évolution de l'érosion des bassins versants à Mayotte (figure 1).

En effet le lagon de Mayotte est soumis à un fort envasement provoqué par l'érosion intense qui s'exerce sur les bassins versants. Pour faire une estimation de l'érosion à l'échelle de bassins versants, à l'amont des mangroves, nous avons utilisé le modèle de l'érosion USLE, en fournissant à ce modèle les données nécessaires sur la pluviométrie, les sols, les couvertures végétales (photos aériennes) et les pentes.

Si le modèle fonctionne assez bien pour les reliefs modérés, il n'est adapté ni aux sols nus dénommés localement *padza* ni aux terrains en fortes pentes cultivés en manioc.

Un appareil de terrain a été élaboré pour mesurer l'érosion dans ces conditions extrêmes, qui occasionnent l'essentiel des départs de terre. Il offre l'avantage d'être très bon marché (70 euros), simple à utiliser, et facilement transportable quelle que soit la configuration du terrain.

Il s'agit d'un montage constitué d'une règle de maçon en aluminium de 2 mètres de long, sertie de 10 tubes espacés de 20 cm, chacun supportant une aiguille amovible en aluminium de 50 cm à 1 m de long et de 6 mm de diamètre (figure 2). Un système de charnière au milieu du dispositif permet de réduire l'encombrement (déplacement possible en moto).

Le but de ce dispositif est d'obtenir un profil du sol à intervalles réguliers (les mesures peuvent être prises après chaque épisode pluvieux intense ou arbitrairement toutes les deux semaines) avec la plus grande précision possible (de l'ordre du millimètre). Pour cela, il est nécessaire, après avoir déterminé les différentes typologies dont nous évaluerons l'érosion, de placer sur ces sites des fers à béton qui soient suffisamment bien enfoncés dans le sol pour être considérés comme fixes durant toute la période de collecte de données (saison humide).

L'appareil doit être systématiquement utilisé avec la même méthode :

- fixation des fers à béton profondément dans le sol, espacés d'environ 1,90 m, 20 à 50 cm dépassant du sol (un niveau plus élevé est envisageable pour les sols très accidentés ou les buttes de manioc parfois supérieures à 50 cm). Les broches des fers devront être orientées vers le bas de pente ;

- mise à niveau de la règle par ajustement plus fin des fers à béton.

Ces deux étapes sont effectuées lors de la première étape d'installation du dispositif.

Il est aussi nécessaire au préalable de marquer les aiguilles pour repérer une partie haute et une partie en contact avec le sol.

Un certain nombre de précautions sont à prendre comme ne jamais marcher sur le terrain en amont du dispositif, et de caler la règle selon le repère extérieur gauche (en ayant les tubes face à soi)

Des mesures de répétitivité permettent de s'assurer de la précision de l'appareil. En répétant les mesures 5 fois de suite, on observe une moyenne d'erreur inférieure à 1 mm, soit une précision correspondant à 10 m³/ha de sol (figure 3).

Sur les *padza* de Mtsangamouji dans le nord de l'île, on a mis en place 10 transects en les répartissant suivant l'orientation, la situation sur la pente, ainsi que sur des ravines ou des zones d'atterrissement. Sur le *padza* de Dapani, 9 transects ont été observés dans les mêmes conditions. L'érosion sous champ de manioc a donné lieu à la mise en place de 7 transects à Ouangani.

Les mesures ont été réalisées pendant les mois les plus arrosés de la saison des pluies 2003-2004, ce qui a permis d'estimer l'érosion sur les terrains soumis à une érosion intense (figure 4). Ces données obtenues ajoutées à celles évaluées à partir du modèle de l'érosion USLE permettent d'extrapoler l'érosion à l'échelle de bassins versants débouchant sur des mangroves.

Le suivi de l'évolution des couvertures végétales, par photos aériennes sur une cinquantaine d'année, va donc donner des indications sur l'évolution de l'érosion sur ces bassins que l'on peut corréliser avec l'évolution des mangroves (figure 5).

On constate que malgré une diminution forte des surfaces occupées par la forêt primaire, l'érosion à l'échelle du bassin versant n'augmente pas de façon inquiétante. Ceci grâce aux techniques mises en œuvre par l'agriculture (fort pourcentage d'agroforesterie), et aux travaux d'aménagement des *padza* (plantations d'*Acacia mangium*).

De même, il n'y a pas de grandes modifications de surface occupées par les mangroves, à l'exception de Dapani et de Soulou, sans que l'on puisse relier ces modifications à une évolution des apports terrigènes.

Mots clefs : mesures de l'érosion ; Comores.

Figure 1. Schéma morpho-pédologique de l'île de Mayotte et sites d'expérimentation.

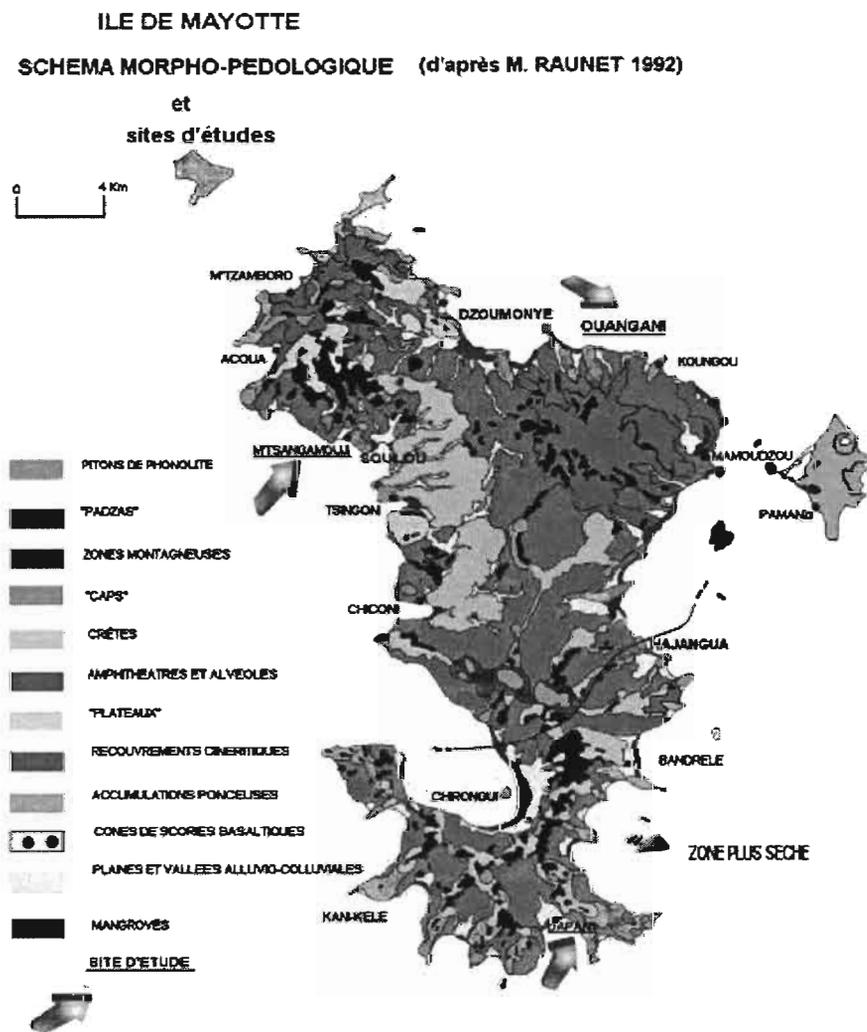


Figure 2. Schéma du dispositif de mesure de l'érosion.

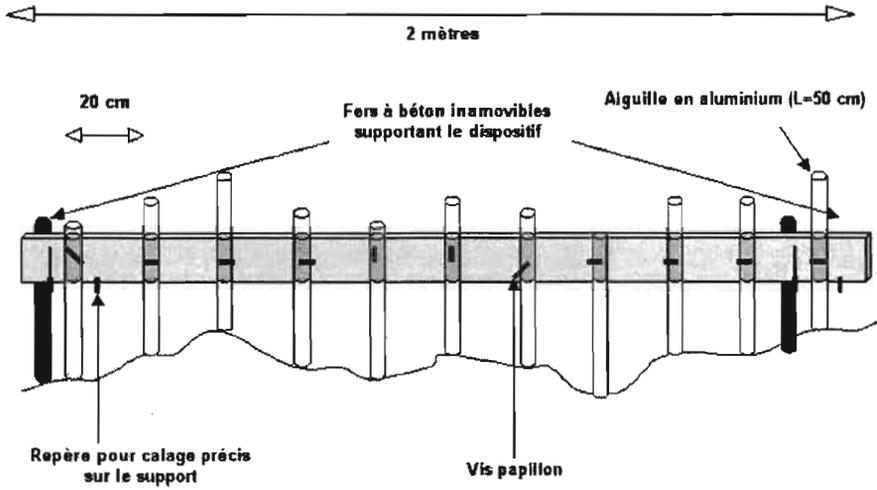


Figure 3. Moyenne et écart type des mesures de répétitivité avec l'E.D.A. sur 5 séries avec démontage.

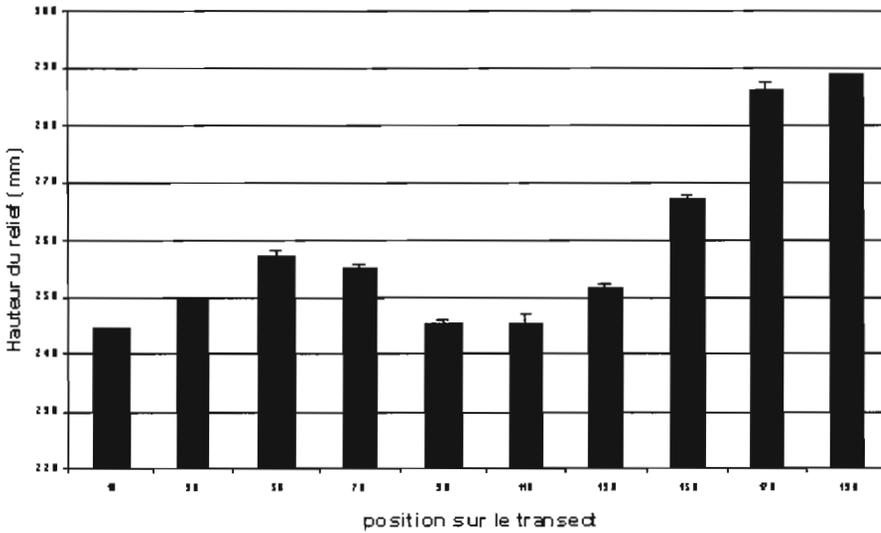


Figure 4. Évolution des transects par rapport au profil initial à Dapani.

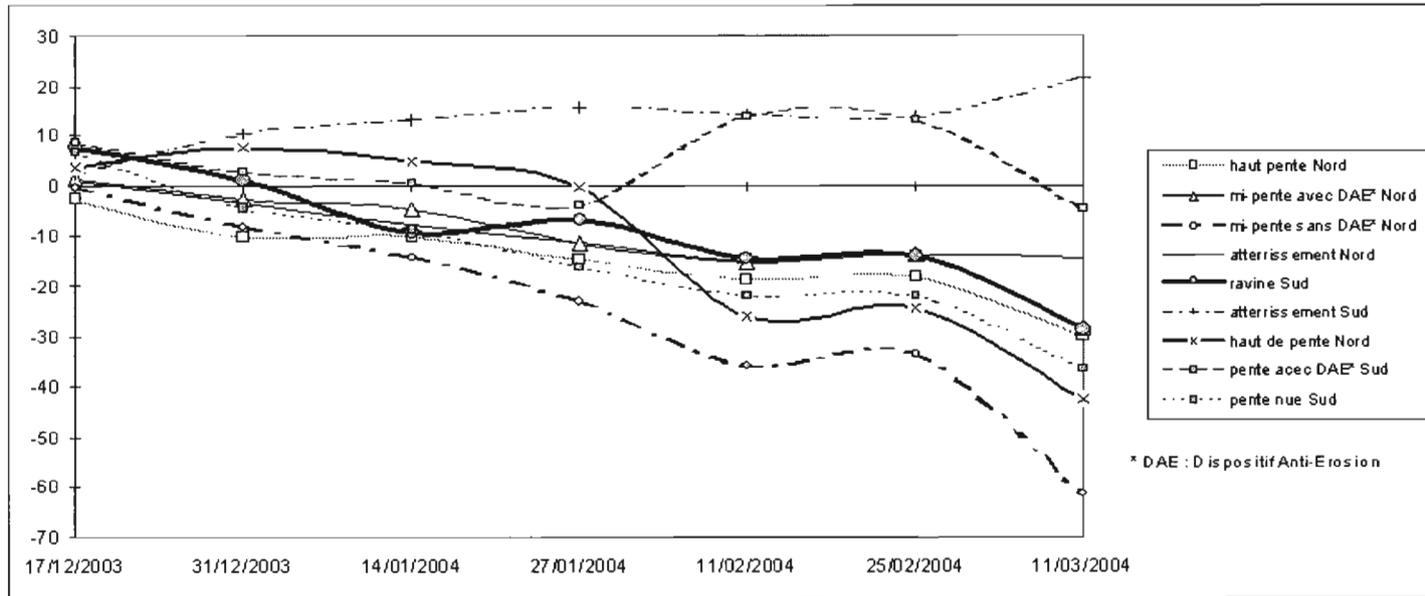
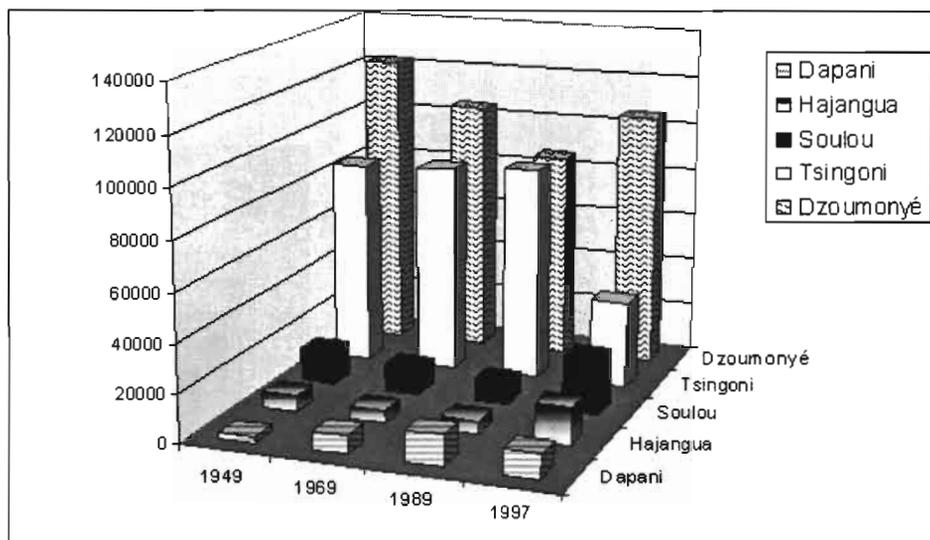


Figure 5. Évolution de l'érosion sur 5 bassins versants modèles (en tonnes par an).



Implications de l'érosion hydrique dans l'aménagement du bassin versant d'Antsaharatsy, Hautes Terres centrales de Madagascar

HAJA MAMINIRIANA ANDRIANAVALONA MIARINJATOVO¹,
SIMONE RANDRIAMANGA²

département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo, B. P. 907, Antananarivo, 101, Madagascar.

Tél. : +261 (20) 22 235 63

Courriels : ¹hajandrianavalona@yahoo.fr, ²baratsiv@wanadoo.mg

Problématique

L'amplification de l'érosion s'avère être aujourd'hui un problème majeur dans la mise en valeur et la gestion de l'espace à Madagascar. Le bassin versant d'Antsaharatsy, situé à 40 km d'Antananarivo, reflète le type de paysage rencontré sur les hautes terres centrales. Il est composé de bas fonds comportant des traces d'accumulation de sédiments et des collines souvent multiconvexes rongées par l'érosion en nappe et entaillées par des *lavaka*. Ces formes d'érosion ont l'eau comme principal agent érosif. Néanmoins, d'autres facteurs dont les activités de l'homme interviennent dans l'évolution du *processus*. D'où la problématique de cette étude : dans quelle mesure l'érosion hydrique affecte-t-elle un territoire et quelles mesures de protection doit-on adopter pour l'atténuer ?

La finalité des travaux est de proposer des mesures de protection adéquates dans le cadre d'un schéma d'aménagement. Les objectifs sont d'un côté d'expérimenter la programmation relative à l'équation universelle de perte en terre et de mettre en application cet outil de gestion d'un bassin versant. Deux éléments essentiels sont à considérer pour atteindre ce but : les conditions naturelles et la communauté locale. Cette dernière n'entre en jeu que dans l'identification des actions à mener dans le schéma d'aménagement. L'efficacité d'un projet d'aménagement dépend en effet de la connaissance de la population de la zone cible et des paramètres du milieu naturel.

Les travaux de terrain commencent par l'observation, l'inventaire des formes d'érosion, et la description des sols. Les principales formes d'érosion observées sont localisées par *Global Positionning System* (GPS). Des enquêtes semi structurées ont été réalisées auprès des ménages. Le modèle de Wischmeier a été choisi pour évaluer l'importance de l'érosion des sols et pour définir les modes de conservation pouvant l'atténuer. Le système d'information géographique est dans ce cas un outil de gestion des bases de données et de cartographie pour

l'application du modèle. Les valeurs des paramètres de l'équation universelle de perte en terre sont issues des résultats des travaux menés par le Centre technique forestier tropical (CTFT) et le *Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampanandrosoana ny Ambanivohitra* (FOFIFA) sur l'érosion à Madagascar et des mesures réalisées dans le site d'étude. L'absence des données relatives à l'intensité horaire des précipitations nous a conduit à corréliser les données climatologiques de la station pluviométrique de Sadabe et celles d'Antananarivo pour l'indice d'agressivité climatique R évalué à 370_{usa} , une valeur utilisée pour la station de Nanisana, Antananarivo. Tiré des valeurs proposées par le CTFT, l'indice de culture C a été modifié suivant le taux de couverture et la nature de la végétation. L'indice de K a été calculé suivant la nature du sol. La structure, la texture et la porosité des sols ont été évaluées sur terrain par des observations. Les pourcentages en limon, en matière organique et en sable ont été recueillis dans les rapports du Projet inventaire des ressources naturelles terrestres (IRNT, 1992) et les travaux de F. Bourgeat (1972). Ainsi, la valeur de K est égale à 0,069 pour le sol ferrallitique rouge sur migmatite, et 0,066 pour le sol ferrallitique jaune sur rouge de basse colline à petites concrétions. Le facteur pente LS est calculé à partir d'un modèle numérique de terrain obtenu après la numérisation des courbes de niveau. Comme l'évolution du paysage à Antsaharatsy est surtout marquée par le feu de brousse, la simulation des pertes en terre a été opérée avec les paramètres sol et végétation.

Les *lavaka*, l'érosion en nappe et les rigoles composent les formes d'ablation dans le bassin versant d'Antsaharatsy. Les formes d'accumulation y sont représentées par l'ensablement des bas-fonds et l'accumulation des sables au niveau des barrages naturels des cours d'eau. On y distingue aussi deux types de sols : un sol rouge à texture limono-argileuse et à structure polyédrique et un sol jaune rouge à texture sablo-argileuse également à structure polyédrique. La transcription sur carte des relevées des points GPS a montré que la partie est, à plus de 1350 m d'altitude, est dominée par l'érosion en nappe affectant tout le modèle du relief. On y rencontre aussi des *lavaka* anciens. Les *lavaka* fonctionnels et l'érosion en nappe composent le paysage de la partie ouest du bassin versant avec les ensablements des bas-fonds et les rigoles. L'érosion en nappe constitue la forme d'érosion prédominante de cette zone. Elle résulte de l'intensité du ruissellement diffus. Elle prédomine là où la couverture végétale est moindre et se manifeste par un décapage important de l'horizon supérieur du sol. La présence d'une couverture végétale plus dense limite considérablement cette forme d'érosion. L'accumulation des matériaux facilement transportables du sol au pied des touffes d'herbes témoigne de l'ampleur du phénomène. L'ensablement des bas fonds et l'accumulation des sédiments au niveau des bas de pente en sont les conséquences. Les rigoles sont la conséquence des modes d'occupation des sols et des activités de l'homme. Elles résultent des passages fréquents des paysans, des charrettes et du bétail sur un axe.

Le bassin versant d'Antsaharatsy est une zone où l'agriculture prédomine. Pra-

tiqué par plus de 90 % de la communauté, la culture d'oignon constitue la principale source de revenus des habitants d'Antsaharatsy. Toutefois, la riziculture irriguée fait aussi bien l'objet d'une attention particulière que cette culture maraîchère. Les soins accordés aux terrasses maraîchères montrent l'importance de cette activité dans le mode de vie de la population. Situées en aval des points de rupture des pentes, ces terrasses constituent un moyen efficace pour lutter contre les effets du ruissellement. Néanmoins, l'insuffisance des ressources en eau en période d'étiage et la diminution de la fertilité des sols après les passages des feux de brousses n'ont pas favorisé l'extension des cultures maraîchères. La pression anthropique est moindre dans cet espace suite au problème d'insécurité depuis le milieu des années 80 jusqu'à la fin des années 90. La densité de la population est apparemment faible à Antsaharatsy.

L'érosion a pour conséquence la perte de surface cultivable et la désorganisation de la communauté locale au niveau social et économique. Elle a favorisé la notion de salariat agricole au détriment des pratiques ancestrales basées sur l'entraide. Ainsi, la perte annuelle d'un ménage sur les parcelles de culture maraîchère est estimée à 320 000 ariary. A cela, il faut ajouter la perte en fertilité des sols réduisant considérablement les rendements agricoles. Face à ces problèmes, les agriculteurs tentent de récupérer quelques *lavaka* stabilisés pour la culture sèche et la riziculture là, où l'eau est facile d'accès. Les *lavaka* fonctionnels sont perçus par les paysans comme une fatalité. Aucune mesure de protection ou de stabilisation n'est entreprise pour stopper leur progression.

Trois scénarii sont proposés pour le choix des actions à entreprendre dans le schéma d'aménagement du bassin versant d'Antsaharatsy. Ils nous rendent compte des possibilités de variation des risques moyens d'érosion en modifiant le type de couverture du sol, c'est-à-dire le mode et le type de culture. Le premier cas représente l'état actuel du paysage. Le second cas consiste à simuler le feu de brousse avec ses conséquences. Le troisième scénario montre l'évolution de la perte en terre dans le cas où les pressions humaines sont absentes. Ainsi la perte en terre est estimée à 2,1 t/ha/an avant le passage du feu et à 4,1 t/ha/an après le passage du feu contre 0,4 t/ha/an dans le cas où les pressions sont absentes. Toutefois ces valeurs varient beaucoup en fonction de la topographie.

Les aménagements pour atténuer la perte en terre doivent alors porter sur la protection du sol contre le ruissellement et sur la gestion des activités des agriculteurs. La conservation des ressources en eau et en sol du bassin versant d'Antsaharatsy doit porter sur la promotion des techniques de conservation du sol nécessitant peu de moyen, et sur l'éducation de la communauté locale. Ces opérations visent à la fois l'amélioration de la productivité, celles des sources de revenus de la population, la dissipation de l'énergie des gouttes de pluies et l'infiltration de l'eau dans le sol.

Mots clés : Madagascar, paysage, bassin versant, érosion, communauté locale

Références bibliographiques

- ANDRIAMAMPINANINA, N., 1985, « Les lavaka malgaches : leur dynamique érosive et leur stabilisation », *Madagascar Revue de géographie* n° 46, janvier-juin 1985, pp. 69-85
- BAILLY, C., MALVOS, C., RAMANANDRAY, F., RAMPANANA, L., RAKOTOMANANA, J.L, SARRAILH, J.-M., 1976, *Étude de la susceptibilité à l'érosion des sols de Madagascar. Expérimentation en parcelles élémentaires*, Centre technique forestier tropical, Antananarivo, 27 pp.
- BAILLY, C., GOUJON, P., 1979, *Conservation des sols au Sud du Sahara*, Centre technique forestier tropical, collection « Techniques rurales en Afrique », 296 pp.
- BOURGEAT, F., 1972, *Sols sur socle ancien à Madagascar, Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire*, mémoire ORSTOM n° 57, Paris, 335 pp.
- DONQUE, G., 1975, *Contribution à l'étude du climat de Madagascar*, thèse de doctorat d'État, Tananarive, 478 pp.
- LE BOURDIEC, F., 1974, *Hommes et Paysage du riz à Madagascar, Étude de géographie humaine*, thèse de doctorat, FTM, Antananarivo, 468 pp.
- MIETTON, M., 1998, « Érosion dans le massif de l'Ankarafantsika et sur ses marges, Gestion des savanes incluses », *Conservation International*, PCDI Ankarafantsika, 22 pp.
- NARY HERINIRINA, I., 2000, *Mise en place d'un système d'information géographique pour la détermination précise des phénomènes d'érosion : création d'un logiciel de calcul de perte en terre, ADD-ON sur Arc View, et mise en place des données entrée*, mémoire d'ingénieur, ESPA, 150 pp.
- RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 1995, Chair de la terre, Œil de l'eau... paysannerie et recomposition des campagnes en Imerina (Madagascar), Édition ORSTOM, coll. « À travers champs », Paris, 235 pp.
- RAUNET, M., 1997, *Bilan et évaluation des travaux et réalisation en matière de conservation des sols à Madagascar*, vol. I, Étude des facteurs d'érosion, ONE, projet Conservation des sols, mars 1997, 190 pp.
- RIQUIER, J., 1963, « Formules d'évapotranspiration », *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique* n° 4, 1963, pp. 33-50
- ROOSE, É., BLANCANEUX, P., DE FREITAS, P. L., 1993, « Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples », *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. XXXVIII, 1993, pp. 413-419
- SUTER, C., 1997, « Utilisation des sols, production et valorisation des produits agricoles dans le fokontany d'Avaratrambolo, hautes terres de Madagascar », *Cahiers Terre-Tany* n° 5, fév. 1997, FOFIFA GDE/GIUB, Antananarivo, 99 pp.
- ULLA GEAMPERLI, 1997, « L'organisation du travail dans le fokontany d'Avaratrambolo, hautes terres de Madagascar », *Cahiers Terre-Tany* n° 4, fév. 1997, FOFIFA, GDE/GIUB, Antananarivo, 102 pp.

Tableau 1. Répartition et évolution des pertes en terre suivant l'intensité de la pente à Antsaharatsy

Pente (%)	≤ 2	2 - 12	12 - 36	≥ 36
Perte avant feu (t/ha/an)	0,07	0,40	1,69	9,16
Perte après feu (t/ha/an)	0,15	0,74	3,28	17,23
Perte probable sans feu (t/ha/an)*	0,01	0,07	0,32	1,65
Surface (%)	25,7	6,5	54,9	12,9

(*) Une perte en terre simulée dans le cas où la couverture végétale devienne de plus en plus dense.

Tableau 2. Taux de couverture moyenne du sol par type de végétation

Type de végétation	(%)
Savane herbeuse	80 à 90
Savane herbeuse dégradée et pseudo steppe	60 à 80
Reboisement	65
Forêt galerie	95 à 98

Source : Haja A., d'après les observations sur terrain, Nov.-Déc. 2004

Photo 1. Type d'aménagement de l'espace à Antsaharatsy

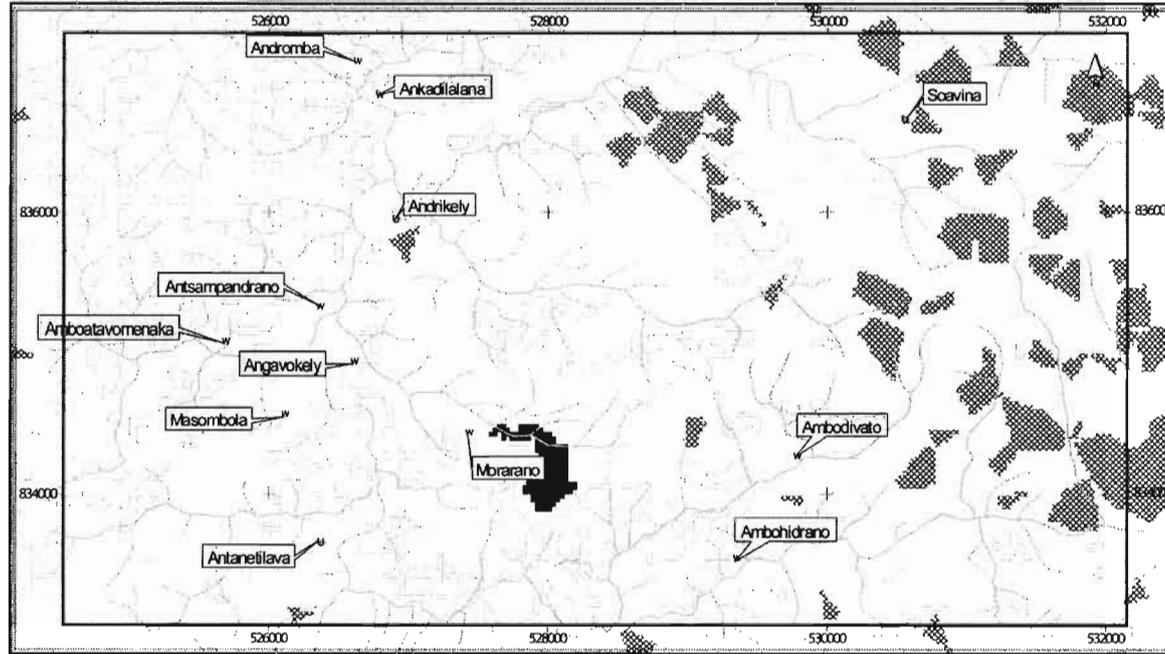


Source : Haja A., novembre-décembre 2005

Les terrasses maraîchères dans le bassin versant d'Antsaharatsy se situent en aval du point de rupture des pentes des versants convexes.

Carte des aménagements à préconiser dans le bassin versant d'Antsaharatsy

158



LEGENDE

- w Chef-lieu-lokontany
- v Village
- Rivière ou cours d'eau permanente
- - - Cours d'eau intermittent

Type d'aménagement pour la conservation des sols contre l'érosion

- Valorisation et conservation de la forêt
- Densification du peuplement d'eucalyptus

- Reboisement ou couverture permanente du sol
- ▨ Culture en terrasse ou reboisement
- ▨ culture permanente

- ▨ Culture permanente et mesure de protection
- ▨ Protection et exploitation rationnelle des sols
- ▨ Rizière

Source:
Fond de carte: SCAN 100, FTM ANDRIANAVALONA, d'après analyses des pentes, de l'occupation du sol et du savoir faire de la communauté locale

Echelle: 1 0 1 Kilomètres

Utilisation des marqueurs radioisotopiques pour l'étude de l'érosion à diverses échelles spatiales et temporelles

CLAUDE BERNARD (IAEA), LIONEL MABIT (IAEA), MARC LAVERDIÈRE
(IRDA)

IAEA, Soil and Water Management and Crop Nutrition Section, Wagramer Strasse 5,
P. O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria
Tél : +43 (1) 2600 21693, Courriel : C.Bernard@iaea.org

Introduction

L'érosion hydrique constitue une des plus sérieuses formes de dégradation des sols agricoles. Ce phénomène contribue à réduire la productivité des sols affectés et constitue en outre une source importante de pollution des eaux de surface en milieu agricole. Cependant, on constate dans la plupart des pays une rareté des données sur ce phénomène : son importance réelle, sa distribution géographique, les conditions édaphiques, topographiques et agronomiques les plus vulnérables, etc.

Les mesures en parcelles, pour répondre à ces interrogations, constituent une référence utile, mais longue et coûteuse. En effet, elles doivent être poursuivies pendant plusieurs années, afin d'intégrer les fluctuations climatiques interannuelles. Le nombre de parcelles requises peut également devenir très élevé, si l'on désire estimer les risques d'érosion sous une variété de conditions édaphiques et agronomiques. De plus, dans les pays nordiques, l'érosion nivale, résultant de la fonte de neige, doit être prise en considération, même si sa mesure est difficile à réaliser. Enfin, des parcelles de quelques dizaines de m² ne peuvent reproduire l'ensemble des *processus* qui ont cours dans des champs dont la superficie peut atteindre des dizaines d'hectares. D'autres approches présentent aussi diverses limitations. Les tiges de mesures d'érosion sont rapides et peu coûteuses à installer et à suivre. Elles ne révèlent cependant que la valeur ponctuelle de l'érosion ou de la sédimentation. Les mesures indirectes telles que la mesure des charges de matières en suspension à l'échelle du versant ou du petit bassin sont soumises aux mêmes contraintes temporelles que les mesures en parcelles. De plus, ces mesures révèlent la production nette de sédiments du bassin, mais n'apportent pas d'éclairage sur la variabilité spatiale de l'érosion et donc sur l'origine des sédiments.

Dans ce contexte, l'utilisation de marqueurs persistants peut apparaître comme un complément efficace aux méthodes conventionnelles. Des divers isotopes qui ont été suggérés comme traceurs du *processus* d'érosion, le césium-137 (^{137}Cs), le plomb-210 (^{210}Pb) et le béryllium-7 (^7Be) s'avèrent particulièrement intéressants.

Les premiers travaux utilisant le ^{137}Cs comme indicateur des mouvements de sol ont été réalisés aux États-Unis, dans les années 60. Depuis, de nombreuses études exploitant cette technique ont été réalisées en Amérique du Nord, en Europe, en Océanie ainsi que, dans une moindre mesure, en Amérique du Sud, en Asie et en Afrique. Ces diverses études couvrent une vaste gamme de sols, de pentes, de cultures et de pratiques culturales. Bien que la plupart aient été conduites à l'échelle du champ, la taille de l'unité expérimentale a varié de la parcelle au bassin versant.

1. Les radio-marqueurs d'intérêt : origine et comportement environnemental

Le ^{137}Cs , avec une demi-vie de trente ans, provient des produits de la fission de l'uranium-235, de l'uranium-238 et d'autres matières fissibles. Cet isotope artificiel a été introduit dans l'environnement suite aux essais d'engins thermo-nucléaires, à compter de 1952. Les débris radioactifs de ces essais ont atteint la stratosphère, où ils ont circulé globalement, pour retomber graduellement au sol avec les précipitations. Le maximum de retombées a été enregistré en 1963, principalement dans l'hémisphère Nord, puisque la plupart des essais nucléaires atmosphériques ont eu lieu sous les moyennes latitudes septentrionales. Après le traité d'interdiction des essais de 1963, les retombées radioactives furent considérablement réduites. En 1986, l'accident survenu à Tchernobyl, en Ukraine, a introduit de nouvelles quantités de ^{137}Cs , mais de façon plus localisée, l'émission des substances radioactives étant survenue au niveau du sol.

Le ^{210}Pb (demi-vie de vingt-deux ans) est un isotope naturel qui se forme dans le sol, à partir du ^{222}Rn gazeux. Cette formation est constante dans le temps. Dans les sols, une partie du ^{222}Rn parvient à diffuser vers l'atmosphère où il se transforme en ^{210}Pb , lequel retombe à la surface du sol avec les précipitations. Il s'établit ainsi à la surface du sol un «excès» de ^{210}Pb dont les déplacements avec le sol peuvent être quantifiés et qui peut ainsi servir de marqueur d'érosion/sédimentation. Le ^{210}Pb offre une alternative intéressante au ^{137}Cs pour les régions où les retombées de ce dernier ont été faibles, rendant son usage un peu plus compliqué.

Le ^7Be est également un isotope naturel qui se forme dans la troposphère et la stratosphère, suite au bombardement d'atomes d'oxygène et d'azote par les rayonnements cosmiques. Le ^7Be formé retombe au sol avec les précipitations. Cette formation est constante dans le temps. Contrairement aux deux autres isotopes, la demi-vie du ^7Be est courte (cinquante-trois jours). Cet isotope sert donc pour des études portant sur le court-terme, par exemple pour mesurer l'impact immédiat d'un changement de pratique agricole (ex : adoption du semis direct) sur la perte de sol.

2. Comportement environnemental des trois radioisotopes

Une fois retombés au sol avec les précipitations, les trois isotopes sont rapidement et fortement adsorbés par les particules du sol, en particulier par les fractions fines. Des études ont démontré que ces isotopes sont par la suite pratiquement nonéchangeables dans les environnements physicochimiques normalement rencontrés. La redistribution spatiale de ces radioisotopes dans l'environnement se fait donc essentiellement par des *processus* physiques, comme le travail du sol et l'érosion, qui les redistribuent à l'intérieur des agrosystèmes et des agrosystèmes vers les hydrosystèmes. Voilà donc pourquoi on peut considérer ces trois radioisotopes comme d'excellents marqueurs des mouvements de sol.

Avantages et limitations des radioisotopes comme indicateurs des mouvements du sol

Les principaux avantages de ces trois radioisotopes comme marqueurs des déplacements de sol sont :

a) les retombées de ces radioisotopes étant universelles, la technique peut en principe être utilisée partout, à des échelles spatiales variant de la parcelle expérimentale au bassin versant ;

b) rapidement fixés aux particules de sol, leur redistribution spatiale dans l'environnement reflète les mouvements de sols ;

c) en raison de leurs demi-vies variables, l'utilisation des trois radioéléments permet d'estimer les mouvements de sols ayant eu cours pendant des périodes variant de trente jours (^7Be), à quarante ans (^{137}Cs) et même jusqu'à environ cent ans (^{210}Pb) ;

d) les mesures de radioisotopes révélant l'ensemble des mouvements de sol, entraînant aussi bien que dépôt, il est possible d'établir un bilan pour la zone étudiée révélant l'emplacement et l'intensité des arrachements et des dépositions, ainsi que la production nette de sédiments ;

e) ces bilans peuvent être réalisés à partir d'un seul échantillonnage de sol, évitant ainsi de devoir faire un suivi en continu de la zone d'intérêt.

Toutes les techniques de mesure de l'érosion comportent leurs avantages et limitations. La technique des radioisotopes ne fait pas exception. Parmi les limitations reconnues de cette technique, signalons :

a) dans l'hémisphère Sud, les retombées de ^{137}Cs ont été beaucoup moins importantes que dans l'hémisphère Nord, rendant son utilisation un peu plus difficile en raison des niveaux plus faibles dans les sols et des temps de comptages beaucoup plus longs alors requis ;

b) l'utilisation de cette technique requiert du matériel de détection relativement sophistiqué et un personnel bien entraîné pour son fonctionnement adéquat ;

c) les mouvements de sol estimés à partir des mesures de radioisotopes intègrent tous les mouvements, sans discriminer en fonction de l'agent érosif (outils de travail du sol, eau, vent, autres sources) ;

d) les mouvements de sol estimés sont la résultante de l'ensemble des épisodes érosifs survenus pendant la période couverte par l'isotope utilisé et il est impossible de préciser l'impact de quelque événement individuel ;

e) dans certaines régions d'Europe et d'Asie occidentale, les retombées de Tchernobyl ayant modifié la relation existant entre les pertes de sol cumulées depuis 1963 et celles de radio-césium, celles-ci doivent donc être prises en considération dans l'interprétation des mesures de radioisotopes en termes de mouvements de sol ;

f) le ^{137}Cs et le ^{210}Pb révélant l'érosion en cours depuis plusieurs dizaines d'années, leur utilisation est difficile pour mettre en évidence l'impact à court terme de l'introduction de nouvelles pratiques agricoles ;

g) le choix du modèle d'interprétation des mesures de radioisotopes en termes de mouvements de sol doit être approprié aux conditions agroenvironnementales du site étudié.

3. Échantillonnage des sols et mesure de radioisotopes

Pour pouvoir estimer les mouvements de sol à partir des mesures d'un radioisotope, il faut mesurer le stock de ce radioisotope présent dans les sols de la zone d'étude. Des sites dits de « référence », *i.e.* n'ayant subi ni érosion ni déposition pendant la période couverte par l'isotope utilisé, doivent aussi être échantillonnés. Dans ces milieux non perturbés, le radioisotope est habituellement concentré dans les premiers centimètres du sol et décroît de façon exponentielle avec la profondeur. L'échantillonnage des sites de référence peut donc être fait par incréments de faible épaisseur (10 cm par exemple), jusqu'à une profondeur suffisante pour permettre l'évaluation de tout le stock de radioisotope. Le labour répété homogénéise la teneur du sol en radioisotope sur la profondeur de labour. Pour les sites cultivés, il est donc possible de ne prélever qu'un échantillon représentatif de toute la couche labourée et d'autres dans les strates sous-jacentes, toujours dans le but de pouvoir évaluer la totalité d'isotope présent dans le sol. Les sols échantillonnés sont séchés à l'air et tamisés à 2 mm. La fraction fine est alors analysée par spectroscopie gamma pour quantifier sa teneur en radioisotope. L'activité spécifique totale du sol (Bq m^{-2}), qui sert aux calculs d'érosion et de déposition, est calculée par le produit de l'activité pondérale du sol (Bq kg^{-1}), telle que mesurée, par sa masse volumique apparente et l'épaisseur de la couche échantillonnée.

4. Estimation des mouvements de sol

L'importance des mouvements de sol est estimée en comparant l'activité spécifique en radioisotope (Bq m^{-2}) des sites étudiés à celle des sites témoins non érodés. Une activité inférieure à celle des sites témoins est interprétée comme reflétant une perte nette de sol, alors qu'une activité supérieure indique un apport net de sol. Plusieurs modèles d'interprétation des fluctuations de l'activité des sols en radioisotopes en termes de mouvements de sol ont été proposés. Une discussion commentée de ces modèles est disponible dans les références citées à la fin du document.

Exemples d'utilisation du ^{137}Cs

A- Bassin de Vierzy (France)

Le bassin versant de Vierzy, situé en Picardie, couvre une superficie de 180 ha. Il est intensément cultivé, les principales productions étant le blé, les betteraves à sucre, les pommes de terre et les pois. La topographie du bassin est peu accidentée avec une dénivelée totale de 26 m. Des échantillons de sol ont donc été prélevés sur 93 stations, 80 à l'intérieur des limites du bassin versant et 13 dans des sites témoins situés dans la proche périphérie du bassin. Les 80 mesures de ^{137}Cs ont révélé des mouvements de sol variant d'une perte de 17 t ha⁻¹ an⁻¹ à un dépôt de 18 t ha⁻¹ an⁻¹. La spatialisation des données à l'ensemble du bassin a permis d'évaluer que 45 % du bassin a subi une perte nette de sol de l'ordre de 6,3 t ha⁻¹ an⁻¹ et 14 % du bassin une accumulation nette de sol de 7 t ha⁻¹ an⁻¹. Enfin, on conclut à un bilan nul pour 41 % de la superficie du bassin. En conséquence, les sorties nettes de matériel du bassin sont estimées à 1,9 t ha⁻¹ an⁻¹, ce qui représente 59 % des matières érodées à l'intérieur du bassin. De plus, une relation entre la teneur du sol en ^{137}Cs et celle de matière organique a été mise en évidence, indiquant le rôle de l'érosion dans la redistribution du carbone dans le milieu.

Figure 1. Zones de mouvements de sol dans le bassin

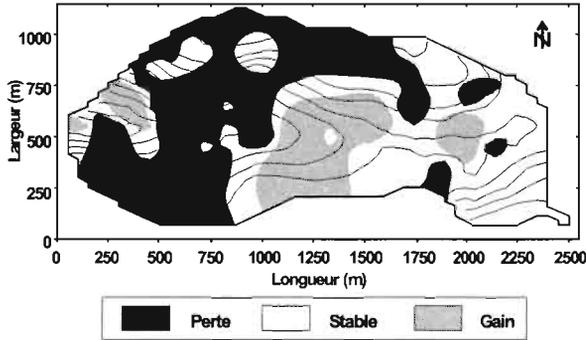
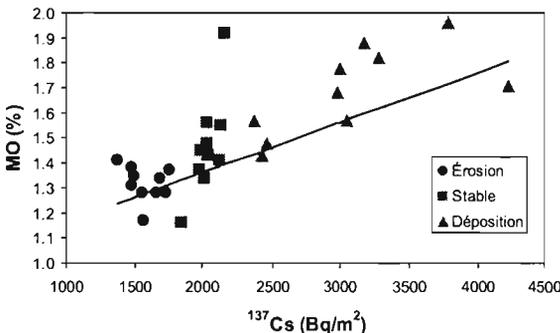


Figure 2. Teneur du sol en ^{137}Cs et MO dans le bassin



B- Île d'Orléans (Canada)

L'île d'Orléans est une importante zone de production maraîchère près de Québec. Plusieurs facteurs rendent ce milieu sensible à l'érosion: topographie prononcée, précipitations relativement abondantes (près de 1200 mm an⁻¹) dont 20 à 25 % tombent sous forme de neige qui fond rapidement au printemps, nature des cultures horticoles qui laissent le sol sans protection pendant de longues périodes, notamment à l'automne et au printemps. Quelque soixante-trois champs, sélectionnés de façon à représenter les diverses conditions de sols, de pente et de cultures ont été échantillonnés selon une maille régulière pour en déterminer la teneur résiduelle en ¹³⁷Cs et estimer la sévérité de l'érosion. L'érosion moyenne, mesurée à l'échelle du champ, est de 5,7 t ha⁻¹ an⁻¹. Le type d'agriculture influence considérablement la perte de sol, qui passe de 3 t ha⁻¹ an⁻¹ sous exploitation laitière à plus de 11 t ha⁻¹ an⁻¹ en production maraîchère. L'inclinaison de la pente joue également, la perte moyenne de sol étant de 4, 7 et 8 t ha⁻¹ an⁻¹ pour des pentes de 0-2, 2-5 et 5-9 % respectivement. Les résultats montrent aussi qu'en production laitière, les situations d'érosion sont moins fréquentes et les taux moins élevés qu'en production horticole, alors que les occasions de redéposition sont plus fréquentes et les taux plus importants. Le même raisonnement vaut pour l'influence de la pente. Une augmentation de l'inclinaison se traduit par un accroissement de la fréquence et des taux d'arrachement et une diminution des occasions de redéposition (voir tableau).

Figure 3. Taux d'érosion et de déposition à l'île d'Orléans

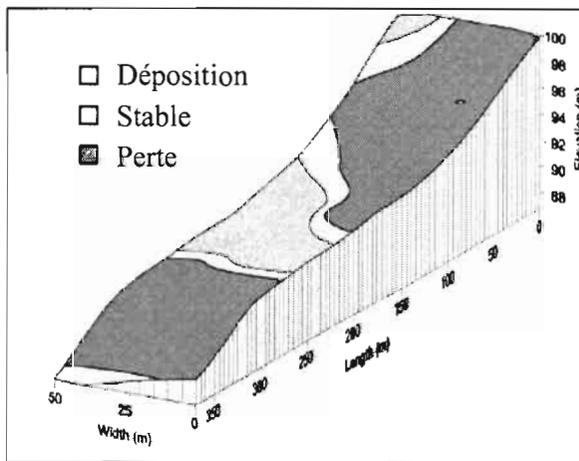
Occupation du sol	Dépôts			Perte brute		Perte nette
	Pente (%)	Fréquence (%)	Taux (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Fréquence (%)	Taux (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Taux (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Laitier	---	39	8,3	61	10,0	2,8
Horticole	---	21	6,4	79	16,6	11,6
---	0-2	39	6,7	61	10,1	3,6
---	2-5	31	8,1	69	13,3	6,7
---	5-9	28	9,8	72	14,6	7,8

C- Bassin de la rivière Boyer (Canada)

La rivière Boyer draine un territoire de 217 km². Les derniers kilomètres du lit de la rivière abritent une frayère où se reproduit une importante population d'éperlans arc-en-ciel (*Osmerus mordax*), un petit poisson jouant un rôle important dans l'écosystème de l'estuaire du Saint-Laurent. Or, cette population a décliné de façon dramatique depuis les années 70, suite à des problèmes de sédimentation excessive dans la frayère et de dégradation générale de la qualité de l'eau, notamment au niveau du phosphore. La taille du bassin interdisait un échantillonnage systématique du territoire. L'approche retenue a plutôt favorisé l'échantillonnage de champs choisis de façon à représenter les différentes combinaisons sol-pente-

culture rencontrées dans le bassin. Les champs, choisis aléatoirement à l'intérieur de chacune des catégories identifiées, ont été étudiés de façon détaillée. Il a ainsi été possible de ventiler le risque d'érosion et le potentiel de production nette de sédiments selon les principales conditions agroenvironnementales rencontrées dans le bassin, ainsi que par sous-bassin. La production nette de sédiments des champs étudiés s'établit entre 0,1 et 13 t ha⁻¹ an⁻¹, avec une moyenne de 5,2 t ha⁻¹ an⁻¹. La production nette de sédiments en provenance des champs cultivés, pour l'ensemble du bassin, a ainsi été estimée à 2,8 t ha⁻¹ an⁻¹, soit une arrivée de près de 61 000 tonnes de matériel à l'exutoire de la rivière. Des mesures additionnelles ont aussi permis d'estimer qu'environ 75 % des sédiments atteignant l'exutoire proviennent des champs, et environ 25 % de l'érosion des berges. Suite à ces travaux, il sera possible de diriger les correctifs vers les secteurs prioritaires et d'adapter la nature de ces correctifs aux conditions agroenvironnementales des secteurs concernés. Ceci devrait permettre d'optimiser les retombées positives des interventions réalisées.

Figure 4. Zones de mouvements de sol dans un champ du bassin



5. Conclusion

L'analyse de la redistribution spatiale des radio-isotopes ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb et ⁷Be permet d'estimer l'importance des mouvements de sol (pertes et dépôts) sur une période variant de trente jours à cent ans, d'évaluer les superficies concernées par ces mouvements, de les localiser dans l'espace et enfin de dresser un bilan de ces mouvements révélant à la fois les redistributions internes et les exportations hors des limites des superficies étudiées.

Les exemples présentés, ainsi que l'abondante littérature sur l'utilisation de ces isotopes comme indicateurs de mouvements de sol, illustrent comment ceux-ci s'inscrivent en tant qu'outil additionnel pour les études portant sur l'érosion des

sols. De plus, ils sont particulièrement bien adaptés pour la réalisation d'inventaires sur de grandes superficies.

Certaines précautions doivent toutefois être prises dans l'interprétation des résultats, notamment dans le choix d'un modèle d'interprétation approprié aux conditions de l'étude. En conclusion, le dosage des radio-isotopes environnementaux produit rapidement et économiquement des informations qui complètent de façon intéressante celles obtenues par des techniques plus conventionnelles.

Références bibliographiques

- ANSPAUGH, L. R., CATLIN, R.J., GOLDMAN, M., 1988, « The global impact of the Chernobyl reactor accident », *Science*, 242 : 1513-1519
- BERNARD, C., MABIT, L., LAVERDIÈRE, M. R., WICHEREK, S., 1998, Césium-137 et érosion des sols, *Cahiers Agricultures* 7 : 179-186
- BERNARD, C., MABIT, L., WICHEREK, S., LAVERDIÈRE, M. R., 1998, « Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from 137Cs data », *J. Environ. Qual.*, 27 : 1178-1183
- BERNARD, C., LAVERDIÈRE, M. R., 1992, « Spatial redistribution of Cs-137 and soil erosion on Orléans Island », Québec, *Can. J. Soil. Sci.*, 71 : 543-54
- 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 : 265-77
- MABIT, L., BERNARD, C., LAVERDIÈRE, M. R., 2002, « Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 data », *Can. J. Soil Sci.*, 82 : 423-431
- MABIT, L., BERNARD, C., 1998, « Relation entre les pertes de sol (estimées par le 137Cs) et de matière organique dans un petit bassin versant de grandes cultures », *C.R. Acad. Sci.*, 327 : 527-532
- QUERALT, I., ZAPATA, F., GARCIA-AGUDO, E., (édit.), 2000, « Assessment of soil erosion and sedimentation through the use of 137Cs and related techniques », *Acta Geologica Hispanica*, vol. XXXV, n° 3-4 (special issue), 367 pp.
- RITCHIE, J. C., RITCHIE, C. A., 2005, Bibliography of publications of 137cesium studies related to erosion and sediment deposition, <http://hydrolab.arsusda.gov/cesium/Cesium137bib.htm>.
- 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 : 215-33
- WALLING, D. E., QUINE, T. A., 1990, « Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data », *Land Degrad. Rehab.* 2 : 161-75
- WALLING D. E., QUINE, T. A., 1991, « Use of 137Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK : potential applications and limitations », *J. Soil. Sci.*, 42 : 147-65
- WALLING, D. E., HE Q., QUINE, T. A., 1995, « Use of caesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigations », *In: Tracer technologies for hydrological systems*, Wallingford : IAHS publ, n° 229 : 163-72
- ZAPATA, F., (édit.), 2003, « Field application of the Cs-137 technique in soil erosion and sedimentation studies », *Soil Till. Res.*, vol. LXIX, n° 1-2 (special issue), 188 pp.
- ZAPATA, F., (édit.), 2002, *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*, Kluwer Academic Publ, 219 pp.

Indicateur de risques d'érosion et les états de surface du Nord Vietnam

SIMON POMEL¹, HA PHAM QUANG²

¹directeur de recherche, CNRS, UMR 5185 ADES-DyMSET - Université de Bordeaux III ;
France

Courriel : spomel@ades.cnrs.fr

²Institut des sols et des fertilisants (NISF) ; Dong Ngac Tu liem, Hanoi,
Vietnam

Courriel : pqha-nisf@hn.vnn.vn

1. INTRODUCTION

L'érosion est délicate à quantifier car ses manifestations sont multiples et multiscalaires et ses indicateurs souvent imprécis. La difficulté réside dans la définition d'indicateurs intégrés qui caractérisent des taux d'érosion valables à l'échelle régionale. L'étude de nombreux indicateurs, comme les indicateurs morphologiques, a été négligée au profit d'indicateurs quantifiables dans des parcelles et dont les mesures sont transposables au niveau du bassin-versant. Cette étude n'a donc pas pour objectif de préciser les *processus* d'érosion mais de se concentrer sur les indicateurs hydriques, de faire le point sur les différents indicateurs disponibles et de réfléchir sur des indicateurs plus fiables et plus intégrés de l'érosion hydrique au Nord Vietnam. La mise au point d'indicateurs spécifiques plus globaux est devenue nécessaire, car les indicateurs classiques sont très hétérogènes et souvent peu fiables. De nombreux indicateurs pédologiques sont ainsi utilisables. La notion d'indicateurs (Maire & Pomel, 1994 ; Maire, Pomel & Salomon, 1994) fait référence à des critères qualitatifs pour préciser le déclenchement de *processus*. Elle est indissociable de celle de seuils de fonctionnement. Elle permet de définir des échelles élémentaires de déclenchement des *processus*. Dans le domaine de l'érosion, la notion d'indicateurs recouvre à la fois des causalités et des méthodologies d'étude. C'est pourquoi elle doit être au cœur du débat scientifique dans le cadre du réseau Érosion-GCES de l'AUF. Les états de surface ont été définis dans différents types d'usage du sol à partir de photographies au sol d'environ 1 m², d'observation des terrains et de topographie et d'analyses d'images pour établir une cartographie des risques d'érosion au niveau de petits bassins versants. Les études complémentaires des histoires d'utilisation de territoires sont également réalisées par la méthode de questionnaires participatifs.

2. RÉSULTATS & DISCUSSION

2.1. L'étude des états de surface des sols : des instantanés du sol pour évaluer l'érosion

Les états de surface des sols représentent une mémoire immédiate des sols. La surveillance de ces surfaces élémentaires permet d'étudier la fixation et la déstabilisation des sols et d'évaluer l'érosion. La surface des sols est occupée par une mosaïque d'états qui traduisent le fonctionnement aux échelles spatio-temporelles élémentaires (Pomel, 2004). Ces instantanés du sol enregistrent les déstabilisations du sol, assurent aussi une fonction de fixation des paysages et sont indicateurs des types de gestion. Les états de surface permettent de dresser une cartographie à plusieurs échelles spatiotemporelles. Les « bioconcentrations » par la microflore et la microfaune jouent un rôle fondamental dans la décomposition de la matière organique. Les « duriconcentrations » (ou concentrations minéralogiques) procèdent de *processus* minéralogiques avec formation de croûtes salées, sulfatées, carbonatées, ferrugineuses ou siliceuses. Les « satuconcentrations » (ou concentrations en turbides) sont des concentrations hydriques d'argiles et de limons. Les « abruconcentrations » (ou concentrations par érosion) se définissent par un amaigrissement de la surface du sol en éléments fins et par une concentration relative des éléments grossiers. Les « phytoconcentrations » (ou concentrations végétales) procèdent de nécroses végétales, les « thanato » ou « rhizoconcentrations ».

Le PICS franco-allemand du CNRS n° 521 dirigé entre 1997 et 2000 a permis d'établir que l'érosion est mesurable à partir des états de surface (POMEL, 2004). Photographies au sol, mesures de l'épaisseur de la perte en sol par an dans les différentes formations et calculs de surface à partir d'une analyse d'images sont la base de la méthode. Un exemple est donné dans le bassin-versant de l'oued Nakhla, dans le Rif occidental marocain (Programme PROTARS II n° 21/08) (Moukhchane et Pomel, 2003). Les taux d'érosion sont variables : moins de 2 t/ha/an sous forêt dense stable, de 2 à 13 t/ha/an sous forêt de résineux ou forêt dégradée, de 10 à 50 t/ha/an sous matorral dense, 50 à 60 t/ha/an sous matorral dégradé, 160 à 320 t/ha/an sous jachères et cultures à couverture saisonnière, 320 à 600 t/ha/an sous culture de cannabis et dans les zones surpâturées. Sous matorral ou sous forêt de feuillus, l'érosion est contrebalancée par les apports en litière et une redéposition des particules fines (Pomel, 2003). Ces chiffres sont comparables à ceux établis dans le cadre du Programme PREM (PREM, 2002). Les chiffres sont sans doute assez élevés si l'on parle d'érosion en nappe et les mesures ne portent pas sur un temps assez long. Le lac montre en moyenne une perte de 18 t/ha/an dont les 2/3 lié au ravinement et à l'érosion des berges (Sabir *et al.*, 2004). Mais ces mesures sur les remplissages du lac donnent un état moyen qui n'exclut pas d'extrêmes différences suivant les zones. De plus, il est difficile de faire la part des dépositions dans ce système de mesures (Bouhlassa *et al.*, 2000). Une étude comparée est en cours avec des mesures Cs137, des mesures des minéraux magnétiques et des mesures sur les parcelles Wischmeier (thèse d'État de Khadija Hassouni au laboratoire de chimie isotopique de Rabat). Un suivi plus long est aussi nécessaire

pour calibrer la méthode. L'étude comparée avec les sédiments doit permettre de distinguer l'érosion en nappe de l'érosion le long des berges.

2.2. Les états de surface du Nord Vietnam

Les états de surface ont été définis dans différents types d'usage du sol à partir de photographies au sol d'environ 1 m² et d'analyses d'images pour établir une cartographie des risques d'érosion au niveau de petits bassins versants. L'étude des états de surface doit permettre de définir la couverture au sol afin de mieux définir le rôle joué dans l'érosion hydrique dans les zones montagneuses du Nord Vietnam. L'étude des états de surface doit aussi permettre de mieux définir le rôle joué par les différentes pratiques agroforestières des minorités ethniques (Jean-Christophe Castella & Dang Dinh Quang, 2002). Les études de la dégradation des sols à partir d'une couverture Landsat (Mai Van Trinh *et al.*, 2005) ne sont guère fiables en termes de représentativité scalaire. Les échelles d'observation ne sont pas adaptées et les index végétaux ne sont pas mesurés au niveau de la surface des sols. Les états de surface doivent aussi permettre de préciser la genèse des types de sols dans la classification des sols du Vietnam (Nguyen Van Bo *et al.*, 2002). Dans le cadre du projet AUF, (convention AUF P2-2092 RR 521), l'étude des états de surface au Nord Vietnam est réalisée dans 4 secteurs représentatifs.

2.2.1 Secteur d'Hoa Binh, programme MSEC

Les sols de la région sont des couvertures forestières décapées par l'érosion et la troncature d'anciens horizons Bt argileux. La définition de la couverture au sol à partir des états de surface, doit permettre d'améliorer le modèle hydrologique défini dans le cadre du Programme MSEC (Modèle PLEIR). En effet, pour l'instant, la couverture est définie par un index de végétation qui n'est pas mesuré au niveau du sol et dont la valeur est purement théorique. Les états de surface dans 7 types d'usages du sol ont été observés sur le terrain :

- dans la zone 1, friche d'un an, les abruconcentrations occupent moins de 10 % des surfaces, les bioconcentrations 10 % et quelques % de satuconcentrations ;
- dans la zone 2, sous manioc, les abruconcentrations occupent de 90 à 100 % de la surface du sol ;
- dans la zone 3, ancienne zone forestière en friche, on observe d'importantes remontées biotiques (25 %), l'érosion est faible (< 5 %) ;
- dans la zone 4, sous manioc on observe une érosion de 3-5 cm, sans doute par an ;
- dans la zone 5, sous fourrage à herbe à éléphant, l'érosion est importante sur 90 % de la surface du sol, avec une érosion linéaire et un déchaussement des racines de 15-20 cm ;
- dans la zone 6 à fourrage à *Brachiaria*, l'érosion est très faible, la couverture au sol étant proche de 100 % ;
- dans la zone 7, zone forestière plantée à *Acacia mangium*, on observe une érosion linéaire, avec une érosion sous la litière (30 à 40 % d'abruconcentrations), la litière est évacuée sans doute au cours des événements pluviométriques les plus importants.

2.2.1 . Région de Phu Tho

Sept types d'usages ont été observés dans le terroir du village de Chan Mong.

– Site 1, dans un système agro-forestier à cannelle de huit ans, thé et plantes médicinales, avec une couverture au sol de litière et de graminées couvre-sol. On observe des croûtes biotiques sous litière, avec une érosion des croûtes de 1 à 3 mm. On observe 3 générations de croûtes biotiques : une génération ancienne ± érodée ; une génération récente et une autre collée (présence de polysaccharides) aux particules de litière en voie de décomposition. Les abruconcentrations représentent moins de 5 % des surfaces.

– Site 2, cannelle, thé, litchee, ananas, plantation de trois ans qui succède à une plantation d'eucalyptus. On observe de nombreuses remontées biotiques de termites, une seule génération de croûtes biotiques et pas de polysaccharides sous la litière. Les remontées biotiques alimentent quelques satuconcentrations et les abruconcentrations représentent moins de 5 % des surfaces.

– Site 3, plantation de thé avec présence de litière (échantillon 3) et activité de la pédofaune (> 5 %) qui alimente une redistribution du matériel fin par des satuconcentrations (>10 %).

– Site 4, plantation d'eucalyptus avec thé de deux ans, succédant à une forêt de bambous (bambous durant cinq ans, puis coupe à blanc). Erosion linéaire et plus de 20 % d'abruconcentrations, avec un peu de bioconcentrations et de satuconcentrations.

– Site 5, eucalyptus de deux ans, sans thé, importante zone de départ, avec des abruconcentrations sur 25 à 30 % et une érosion de 5 à 8 mm/an.

– Site 6, sous forêt de vingt-cinq ans, forêt coupée à blanc puis repousse naturelle, avec restes de souches. Pas d'érosion sous l'abondante litière. Début de formation d'un sol brun forestier, mais sans horizon Ah ancien du fait de la déforestation. Prélèvement de la litière, du mycélium et de l'horizon grumeleux et racinaire (échantillon 6). On observe la structuration suivante sur 10 cm :

* 0-1 cm : horizon Af à feuilles peu ou pas décomposées ;

* 1-2 cm : horizon Am à mycélium ;

* 2-3 cm : horizon Ar racinaire ;

* 3-5 cm : horizon Agh racinaire avec des grumeaux et la présence de polysaccharides

* 5-10 cm : horizon Ah humifère.

– Site 7, manioc et *green peas* (légumineuse) avec plantation en ligne de rideaux végétaux à eucalyptus et *china tree*. On observe une érosion latérale entre les rangées de manioc, avec des abruconcentrations limitées du fait de la pente faible. 20-30 % des surfaces sont érodées et l'érosion en microrelief des abruconcentrations grossières est de 1 à 3 mm.

– Dans le bas-fond on observe une retenue sédimentaire avec sur 25 cm, la sédimentation suivante :

* 0-6 cm : niveau argileux à gley et matière organique ;

* 6-15 cm : niveau sableux grossier représentant probablement l'érosion annuelle ;

* 15-25 cm : niveau à gley argileuse.

2.2.3. Sites NOMARC région de Yen Bai Town

Les sites gérés par la NOMARC permettent d'observer différentes pratiques à base de plantes fourragères.

– Site 8, à *Paspalum astatum*, on observe une érosion de 2 à 3 mm/an et des abruconcentrations de 10 %, des bioconcentrations de 10 %, 20 % de litière et 10-20 % de phytoconcentrations et de plantes.

– Site 9, à *Panicum maximum*, on observe 25-30 % de satuconcentrations liées à l'épandage de lisier de porc, 25 à 35 % d'abruconcentrations et 10-20 % de litière.

– Site 10, à *Bracharia brisanta* et arbres fruitiers, on observe 10 % de bioconcentrations, 10-15 % de satuconcentrations, 30 % d'abruconcentrations et 20-30 % de litière avec la place occupée par les plantes. Prélèvement d'un échantillon de sol.

– Site 11, culture en bandes avec soja. On observe 40 % d'abruconcentrations et 25 % de satuconcentrations, avec une érosion mesurée sur les restes de croûtes biotiques de 8 à 5 mm/an ou plus.

– Site 12, avec fumure de chèvres et *Bracharia* coupé, 70-80 % de bioconcentrations, même sous fortes pentes.

– Site 13, différentes parcelles de riz de montagne avec une érosion linéaire d'environ 10 %, et des abruconcentrations de moins de 30 %, comme dans les parcelles d'érosion Wischmeier qui ne fonctionnent pas avec des pluies inférieures à 60 mm.

– Site 14, plantation de café Arabica de huit ans, avec abruconcentrations 10 %, 10 % de remontées biotiques, 10 % de satuconcentrations et 20-30 % de litière.

– Site de jachère proche de la plantation de café, prélèvement de sol et observation des états de surface.

2.2.4. Région de Van Chan

Dans la région de montagne, de nombreux systèmes de cultures des minorités ethniques existent principalement Muong, Dao et Mong. Les zones basses sont plutôt exploitées par les minorités Thai. La pratique courante est une jachère de sept ans, avec du riz de montagne deux ans, du maïs de deux à trois ans et du manioc deux ans.

– Site 15, village de Suoi Bu, culture du maïs, abruconcentrations 40-60 %, satuconcentrations 40 % avec dessiccation et érosion de 1 à 1,5 cm/an. Dans la région de la rivière Ban Hoc, on observe une importante érosion en nappe.

– Site 16, dans la zone d'altitude (vers 1000 m, sommets vers 1500-1600 m) on observe la culture du maïs, des longan, des litchis et du manioc sur très fortes pentes dans des zones karstiques à lapiez. Dans le secteur, le maïs est cultivé sur des sols bien drainés et le soja a besoin de sols à plus forte rétention en eau. On observe également des plantations de thé anciennes, de plus de cent ans dans les terroirs du village de Suoi Giang.

– Site 17, différentes parcelles d'érosion sous culture du maïs avec ou sans *mulching* de maïs ou de riz. Sous parcelle de maïs sans *mulching*, les états de surface sont de 40-60 % pour les abruconcentrations, 10 % pour les bioconcentrations, 20 % pour les satuconcentrations, avec une érosion linéaire. Avec *mulching* de

maïs, on observe, 10 % d'abruconcentrations, 40 % de mulch et 10-20 % de bioconcentrations. Il convient de disposer les tiges de maïs perpendiculairement à la pente pour éviter l'érosion linéaire et de préférence utiliser le *mulching* de riz plus efficace et plus fin. Dans les parcelles avec *mulching* de riz, on observe une litière mieux décomposée avec mycelium et une érosion linéaire et de surface plus faible que sous *mulching* de maïs. Il serait intéressant de comparer les mesures de l'érosion sur ces parcelles, avec les observations concernant les états de surface.

3. CONCLUSION et PERSPECTIVES

Cette présentation permet d'extraire des thèmes qu'il serait souhaitable de développer dans le réseau Érosion de l'AUF.

L'étude de surface est relativement simple à réaliser et peut servir à intégrer des indicateurs plus globaux de l'érosion : états de surface, lapiez couverts et remplissages de l'endokarst, collets racinaires des arbres (avec prudence). Elle sera complétée par des études microbiologiques, des études comparées GIS et des cartographies réelles (comparaison couvertures aériennes et satellitaires diachroniques). Enfin, il faudra :

- cartographier les formes, les volumes et l'historique de l'érosion dans les zones montagneuses surtout à partir des indicateurs morphologiques (ravinelements et mouvements de masse, cartographie et méthodes de mesure des volumes)
- définir des indicateurs bien adaptés à chaque *processus* et faciles à évaluer sur le terrain (simulation de pluies [réaction du sol et états de surface]), mesure des états de surface de chaque micro-bassin, formation végétale et zone d'occupation des sols, cartographie SIG, si possible diachronique ...

Références bibliographiques

- BOUHLASSA, S., MOUKHCHANE, M., AIACHI, A., 2000, « Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using 137Cs technique and calibration models », *Acta Geologica Hispanica*, 35, 3-4 : 239-249
- CASTELLA, J. C., DANG DINH QUANG (édit.), 2002, *Doi Moi in the Mountains, Land use changes and farmers livelihood strategies in Bac Kan Province, Viet Nam*, The Agricultural Publishing House / IRD Éditions, Ha Noi, Viet Nam, 283 pp.
- MAI VAN TRINH, NGUYEN DINH DUONG, VAN KEULEN, H., 2005, « Using Landsat Images for studying Land Use Dynamics and Soil Degradation, Case study in Tamduong District, Vinhphuc Province, Vietnam », *International Journal of Geoinformatics*, 1, 1: 157-164
- MAIRE, R., POMEL, S., 1994, « Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone Tropicale », In : Maire, R., Pomel, S., Salomon J.N., (édit.) - *Enregistreurs et Indicateurs de l'environnement en zone tropicale*, Presses universitaires de Bordeaux, coll. « Espaces Tropicaux », 13 : 11-26
- MOUKHCHANE, M., POMEL, S., 2003, « Quantification de l'érosion hydrique dans un bassin versant et son impact sur la pérennité des ressources en eau et en sols (cas du bassin versant Nakhla) résultats préliminaires », *Rapport au Projet PROTARS II*, n° 21/08, 24 pp.
- NGUYEN VAN BO, BUI DINH DINH, HO QUANG DUC, BUI HUY HIEN, DANG THO LOC, THAI PHIEN, NGUYEN VAN TY, 2002, *The basic information of Main Soil units of Vietnam*, Theogioi Publ. Hanoi, 158 pp.
- POMEL, S., 2004, « Les instantanés du sol pour mesurer l'érosion », *Journal du CNRS* n° 173 (sous presse)
- SABIR, M., BARTHES, B., ROOSE, É., 2004, « Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc) », *Sécheresse*, 15, 1 : 105-110

Cartographie de l'érosion des terres Application à l'île de Mayotte

S. GUILLOBEZ¹, J.-F. DESPRATS², J.-C. AUDRU³

¹CIRAD, Montpellier, Courriel : serge.guillobez@cirad.fr

²BRGM Montpellier, Courriel : jf.desprats@brgm.fr

³BRGM Mayotte, Courriel : jc.audru@brgm.fr

Résumé

À Mayotte, la cartographie de l'aléa érosion a été favorisée par l'existence de nombreuses données spatiales. La démarche a été axée initialement sur une modélisation. Les paramètres ont été déduits des lois de l'hydraulique. La calibration de la formule a été effectuée en fonction des observations. La précision cartographique demandée étant insuffisante ; l'interprétation finale a été réalisée à l'écran en tenant compte : des observations, et des données.

1. Introduction

Le développement récent des moyens d'observation de la terre à partir des satellites les plus récents ; la spatialisation sous forme numérique des données de type altimétrique conjointement avec l'amélioration des logiciels de SIG et de traitement d'image permettent d'envisager une élaboration rapide de documents dérivés.

2. L'érosion des sols

2.1. L'équation de perte en terre

Il existe une équation permettant de modéliser, c'est celle proposée par Wischmeier (1965) aux États-Unis ; elle prend en compte plusieurs paramètres qui ne sont pas toujours disponibles. La détermination de l'agressivité des pluies nécessite l'enregistrement de la pluie à l'aide d'un pluviographe dont le dépouillement reste fastidieux. La détermination du facteur « pente/longueur » est aisée grâce au Modèle numérique de terrain (MNT). Les autres paramètres, liés au sol et aux pratiques, nécessitent de longues années d'études selon un protocole rigoureux ; les travaux entrepris à Mayotte par J. Lapègue (1993) ne sont pas utilisables pour l'ensemble de l'île ; car l'équation n'est plus valable pour des pentes supérieures à 18 % Wischmeier (1965). Il est difficile d'extrapoler à Mayotte les résultats obtenus en Afrique de l'Ouest (É. Roose en Haute-Volta et en Côte d'Ivoire, 1977). Des travaux récents en région tropicale (Z. Boli Baboulé *et al.*, 1996; au Cameroun, S.

Guillobez et R. Zougmore au Burkina Faso, 1999) ont montré que le travail du sol favorisait la perte en terre et non le contraire. La nécessité d'utiliser un modèle adapté aux conditions locales nous a orienté vers une démarche déterministe.

2.2. Ruissellement et érosion

Lors d'une réflexion théorique sur le ruissellement et l'érosion basée sur l'exploitation des lois de l'hydraulique (S. Guillobez, 1990) nous avons développé une série d'équations concernant le ruissellement d'une nappe d'eau sur un plan incliné. L'une lie la vitesse d'écoulement de la nappe d'eau en fonction de l'intensité de la pluie, sa durée, la vitesse de filtration de l'eau dans le sol, la rugosité globale au sol et la pente. La formule a été simplifiée en prenant en compte les précipitations. Comme les sols ne résistent pas tous de la même façon à l'arrachement ; la vitesse d'écoulement doit être pondérée par un facteur sol. Au niveau de l'année il nous semble loisible de proposer une formule de type :

$$\text{Indice d'érosion} = (\text{rugosité})(\text{pente en } \%)^{1/2}(\text{pluviosité en mm})^{1/2}(\text{sol})$$

La pluviosité annuelle reflète l'intensité moyenne des pluies qui peut être considérée comme une donnée présentant de faibles variations à Mayotte (374 km²) et le nombre d'événements pluvieux. Cette formule doit être paramétrée en fonction des données existantes.

3. Le milieu

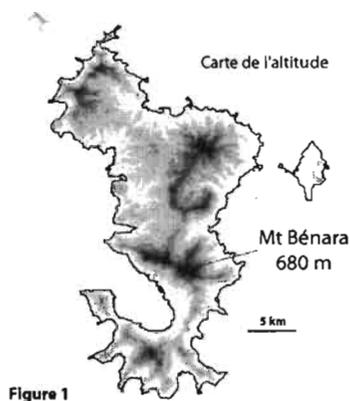
La formule nécessite d'avoir des informations cartographiques de : la rugosité globale au sol, la pente, la pluviosité, les types de sols. Au niveau de l'île les données spatialisées numérisées sont nombreuses : carte topographiques IGN (1/25 000); photographies aériennes (1/25 000); carte morphopédologique de E. Latrille (1981 -1/50 000); MNT et pentes ; carte de la pluviosité de M. Raunet (1992). Image satellite récente SPOT et ses images dérivées dont l'image classée de la végétation réalisée dans le cadre de cette étude par J.-F. Desprats (BRGM) à la suite d'observations de terrain.

3.1. La rugosité globale du sol

À Mayotte du fait de la faible utilisation agricole du sol la rugosité dépend essentiellement de la végétation. L'image classée obtenue par J.-F. Desprats a été retenue, car elle sépare nettement les grands types d'occupation du sol, des *padza* aux mangroves en passant par les forêts naturelles et les villes.

3.2. La pente

Elle dérive du MNT disponible (figure 1) .



À Mayotte les altitudes les plus élevées sont supérieures à 600 m. Les teintes sont d'autant plus foncées que l'altitude est élevée.

3.3. La pluviosité

La carte de M. Raunet prend bien en compte l'effet de l'altitude (figure 2). Il existe trois gradients, un Nord-Sud le second Ouest-Est ; le troisième est lié à l'altitude. La pluviosité dans le Sud de l'île paraît sous-estimée (il y a peu de postes météorologiques).

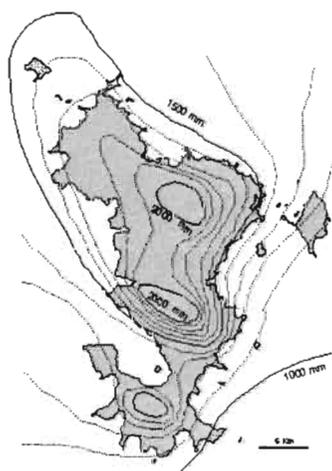


Figure 2. Carte climatique, d'après M. Raunet.

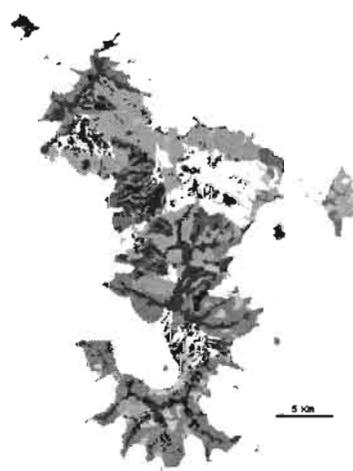


Figure 3. Carte morphopédologique simplifiée d'après E. Latrille.

3.4. Les sols

La carte morphopédologique a été utilisée (figure 3). Sa version en mode vectoriel a été simplifiée après une première tournée de terrain qui a permis de classer les matériaux des sols en fonction de leur résistance à l'arrachement. Le document obtenu a été ensuite « pixelisé » (passage du mode vectoriel au mode matriciel).

4. Analyse multicritère

4.1. La mise en forme des données

Tous les fichiers matriciels sont au pas de 50 m. Les données quantitatives ont été utilisées comme tel. Il s'agit des pentes (en %) et de la pluviosité (en mm).

Les données qualitatives ont été transformées en données quantitatives par codage des classes.

À partir de l'image d'occupation du sols les différentes classes ont été notées en fonction de leur rugosité selon une échelle allant de 1 : forêts naturelles à 5 : les padzas, l'espace urbain.

Les classes retenues pour la susceptibilité à l'arrachement ont été dans un premier temps ordonnées selon un premier codage basé sur les observations de terrain. Ce critère qui conditionne l'érosion des sols en fonction des conditions de milieu correspond à la partie empirique de l'équation utilisée.

Sur la carte des matériaux (figure 4). Les teintes sont d'autant plus foncées que les matériaux sont de plus en plus susceptibles d'être arrachés.

4.2. Application à Mayotte

Une première analyse multicritère a été effectuée à l'aide d'un logiciel de SIG travaillant en mode matriciel en utilisant les fichiers les paramètres initiaux et la formule proposée. L'image obtenue a été observée, puis le codage de ces matériaux a été modifié pour prendre en compte les observations de terrain L'itération a été reprise jusqu'à le résultat devienne visuellement satisfaisant.

5. Discussion

L'image obtenue donne, en vision de loin, une bonne idée des zones où l'aléa érosion est important. L'ensemble de l'île présente un aléa moyen. Ce travail de modélisation permet apparemment d'obtenir un résultat rapide et fiable. Effectivement à l'échelle du 1/100 000 ; la représentation de l'aléa érosion est satisfaisante ; il reste à seuilier celle-ci en 3 classes.

Les zones de plus fort indice d'érosion correspondent aux *padza* ; à des versants à pentes très fortes et à certaines villes et des versants à pentes moyennes et zones cultivées ont en grande partie un indice moyen. L'indice le plus faible caractérise les vallées alluviales et les planèzes.

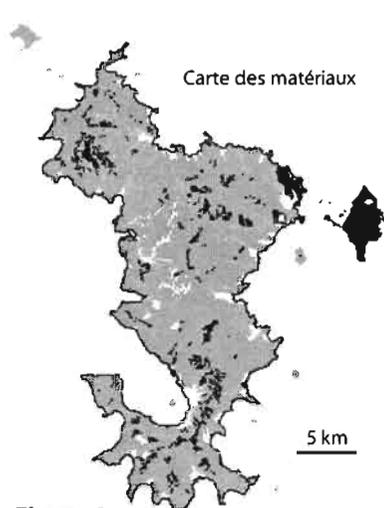


Figure 4

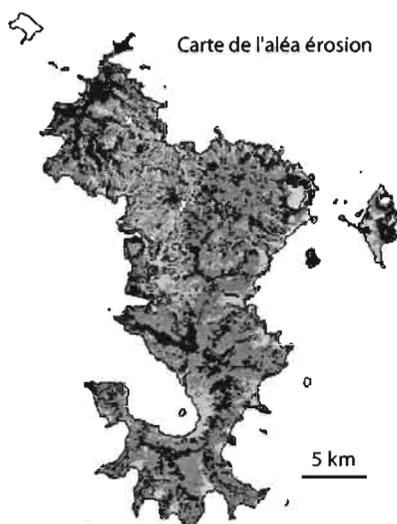


Figure 5

Ce document malheureusement n'est pas directement utilisable à l'échelle du 1/25 000, car la taille du pixel est trop grossière mais surtout il reste des zones mal classées.

Cette image a été utilisée pour la cartographie définitive comme document principal, qui a permis de localiser les zones bien représentatives de l'aléa.

Les contours définitifs (figure 5) ont été dessinés ou améliorés à l'écran en utilisant comme base les dalles des fonds topographique (1/25 000) et les observations de terrain. Les secteurs présentant des doutes ont fait l'objet d'études plus approfondies des fichiers dérivés de l'image Spot (Indice de végétation, composition colorée après analyse en composantes principales), d'un indice fractal du MNT et des photographies aériennes (1/25 000). Les zones urbaines ont fait l'objet d'une « digitalisation » plus fine (valeur de 1/5 000).

Les teintes sont d'autant plus foncées que l'aléa est élevé.

6. Conclusion

Les moyens informatiques nous donnent l'illusion de pouvoir aboutir très rapidement à partir des données numériques et en utilisant une modélisation à de nouveaux produits cartographiques. La démarche mise en oeuvre dans la cas de la cartographie de l'aléa érosion à Mayotte si elle a permis de réfléchir à l'établissement d'un modèle à usage local, a été insuffisante pour établir un document à valeur de 1/25 000. Néanmoins à partir des différentes données informatiques et des observations de terrain le travail a été poursuivi visuellement à l'écran, de façon analogique, en utilisant un logiciel de SIG.

Références bibliographiques

- BOLI BABOULÉ, Z., ROOSE, É., BEP A ZIEM, B., KALLO, S., WAECHTER, F., ZAHONÉRO, P., WAHOUNG, A., 1996, « Effets des pratiques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et de maïs sur sol ferrugineux sableux en zone soudanienne humide du Nord-Cameroun, Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en parcelles d'érosion à Mbissiri (1991-1994) », In *Agricultures des savanes du Nord-Cameroun, Vers un développement solidaire des savanes d'Afrique centrale*, actes de l'atelier d'échange 25-29 novembre 1996, Garoua, Cameroun, pp. 255-272
- GUILLOBEZ, S., 1990, « Réflexions théoriques du ruissellement et de l'érosion, Base d'un contrôle, Application à la détermination des écartements anti-érosifs », *Bois et Forêts des Tropiques*, 226 : 37-47
- GUILLOBEZ, S., ZOUGMORE, R., 1999, « Évaluation des techniques agrobiologiques de lutte contre le ruissellement et l'érosion dans la région soudanienne du Burkina Faso », In *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*, actes de l'atelier international 23-28 mars 1998, Antsirabe, Madagascar, pp. 553-561
- LAPÈGUE, J., 1999, « Érosion et sédimentation terrigène à Mayotte ; archipel des Comores, océan Indien », *Bull. de l'association « Naturalistes de Mayotte »*, 2 : 10-20
- LATRILLE, E., 1981, « Mayotte, Inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales, Exploitation agronomique de la carte de l'inventaire des terres cultivables », *Rapport IRAT*, 127 pp.
- RAUNET, M., 1992, *Les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon*, dir. de l'Agric. CIRAD-CA, Univ. de la Réunion, 68 pp.
- ROOSE, É., 1977, « Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales », *Travaux et Documents de l'ORSTOM* n° 78, 108 pp.
- STIELTJES, L., 1988, *Mayotte (archipel des Comores). Notice explicative de la carte géologique à l'échelle du 1/50 000*, Ed. BRGM, 135 pp.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., 1965, « A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning », *Trans. 7th Inter. Congr. Soil Sci.*, 1 : 418-425
- WISCHMEIER, W. H., 1976, « Use and Misuse of the universal Soil Loss Equation », *J. Soil Water Conserv.*, 31, 1 : 5-9

4.

Techniques de GCES

Labour ou semi-direct dans les écosystèmes soudano-sahéliens (cas du Cameroun et du Mali)

DRISSA DIALLO¹, ZACHÉE BOLI³, ÉRIC ROOSE²

¹lab. d'Agropédologie, IPR de Katibougou, B. P. 6, Koulikoro, Mali
Courriel : drdiallo@ird.fr

²UR SeqBio, IRD, B. P. 64501, 34394, Montpellier cedex 5, France
Courriel : roose@mpl.ird.fr

³IRAD, B.P. 2123, Yaoundé, Cameroun
Courriel : bolieric@yahoo.fr

1. Introduction

Dans différentes situations agricoles du monde, les scientifiques et les agriculteurs ont longtemps insisté sur les avantages du labour (Van Doren *et al.*, 1979 ; Charreau, Nicou, 1971) : amélioration de la structure du sol et de l'infiltration, amélioration de la densité racinaire et de la production en année sèche, contrôle des adventices, etc. Le labour, consistant à retourner le sol sur une profondeur variable est défini comme une manipulation physique, chimique et biologique du sol en vue de l'optimisation des conditions pour la germination des semences, la levée et l'établissement des cultures (Lal, 1979). Dans les pays du Nord, à partir du XVIII^e siècle, la disponibilité de traction animale puis mécanique a permis de labourer de grandes superficies. Dans les agricultures paysannes des régions soudano-sahéliennes d'Afrique, ce n'est qu'à partir des années 60 que la pratique du labour avec la traction animale a été largement diffusée, en même temps que la rotation coton/céréale.

Des effets négatifs du labour sur le sol et l'environnement semblent avoir attiré l'attention des chercheurs depuis le début du XX^e siècle en Amérique et plus tard en Europe et autres régions du monde (Ehlers, 1979 ; Lal, 1979). La simplification des opérations de travail du sol, et notamment la suppression du labour, est un sujet d'actualité (INRA, 2001), susceptible d'apporter des réponses aux exigences économiques (diminution des charges de mécanisation) et environnementales (lutte contre l'érosion, stockage du carbone, biodiversité) actuelles de l'agriculture à travers le monde. De plus en plus, des techniques culturales simplifiées ou des techniques sans labour sont proposées à la place du labour. De façon générale, il s'agit de techniques réalisées sans retournement du sol : travail limité à la ligne de semis, fissuration du sol sans mélange de couches, etc.

Aujourd'hui, de nombreux résultats expérimentaux permettent de comparer labour et pratiques alternatives sur quatre à vingt ans. Cependant, le débat sur le sujet reste controversé, même si la FAO préconise dorénavant les techniques culturales simplifiées à la place du labour conventionnel (FAO, 1998). La présente communication relative aux zones soudaniennes d'Afrique occidentale et centrale porte sur les effets du labour et du travail minimum sur les sols, le ruissellement, l'érosion et les rendements des cultures.

2. Le milieu expérimental et les méthodes

Les études comparatives du labour et du travail minimum du sol ont été conduites sur parcelles d'érosion au Sud Mali (bassin versant de Djitiko 12° 03'N ; 8° 22' W) et au Nord Cameroun (village de Mbissiri 8° 23' N et 14° 33' E). Ces sites sont localisés en zone soudanienne, caractérisée par l'existence de deux saisons contrastées : une saison pluvieuse (cinq à sept mois, dans l'intervalle avril-octobre) et une saison sèche le reste de l'année. De 1991 à 1995 (période d'étude à Mbissiri), la pluviométrie annuelle moyenne a été de 1 311 mm. De 1998 à 1999, les expérimentations ont été faites dans le bassin versant de Djitiko sous une pluviométrie annuelle moyenne de 1 175 mm.

L'environnement morphopédologique de la zone soudanienne est marqué par la présence de buttes cuirassées à sols squelettiques et de long glacis à sols d'épaisseur variable de 50 cm à 1 m et plus. À Mbissiri, au Cameroun, les essais sont conduits sur des sols ferrugineux tropicaux sableux dont la teneur en argile (A) et limon fin (Lf) est faible : $A + Lf = 8$ à 10 % (Boli, Roose, 2004). Dans le bassin versant de Djitiko au Mali, les sols portant les expérimentations sont des sols ferrugineux tropicaux avec $A + Lf = 26$ % et des sols bruns vertiques avec $A + Lf = 56$ % (Diallo *et al.*, 2004a).

Les expérimentations sont conduites sur des parcelles de type Wischmeier, mesurant 100m² (20 m x 5 m). Les techniques culturales testées sur ces parcelles sont :

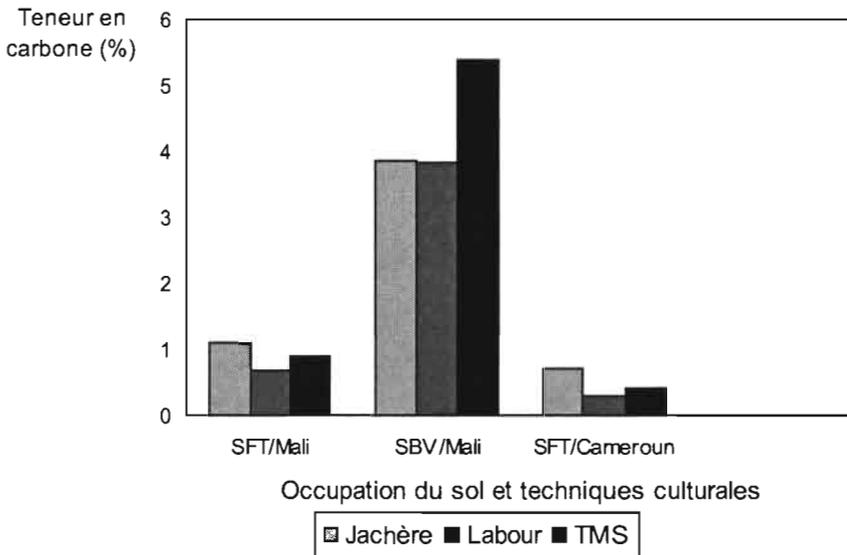
- le labour conventionnel, avec traction animale, noté Labour ;
- le travail réduit à la ligne de semis avec un instrument à dent, après herbicide, noté (TMS) ;
- des jachères arbustives de plus de vingt ans.

3. Résultats

3.1. Effet sur la qualité du sol

Dans cette étude, la teneur en carbone et l'état structural du sol sont les critères d'appréciation de la qualité du sol. L'influence du travail minimum sur la teneur du sol en carbone est meilleure que celle du labour quelque soit le type de sol (fig.1). La différence entre les deux pratiques est moins prononcée sur sol ferrugineux tropical que sur sol brun vertique. Ce dernier, après trois ans, a montré une teneur en carbone supérieure à celle de la jachère de plus de vingt ans ; le rapport entre les teneurs mesurées est de 1,40.

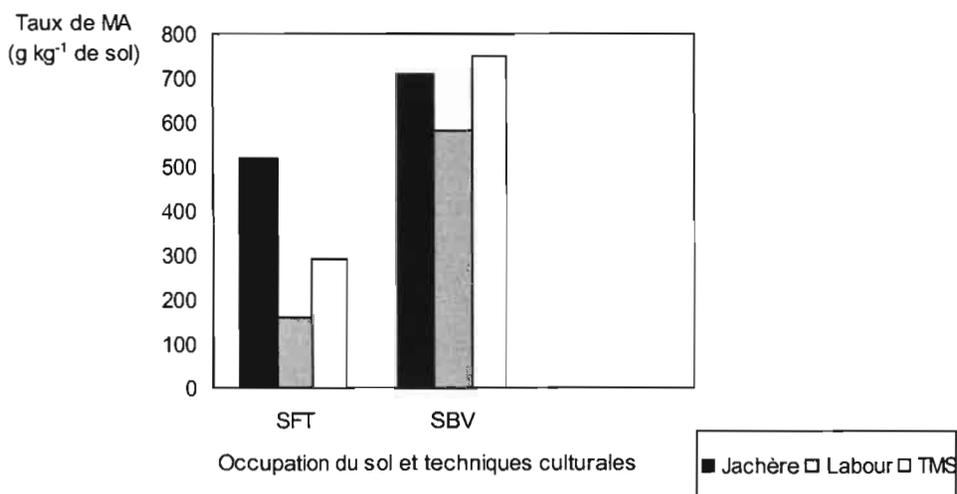
Figure 1. Effet des pratiques culturales sur la teneur en carbone de l'horizon pédologique de surface (10 cm) en zone soudanienne



Comme le montre la figure 2, dans le bassin versant de Djitiko, la diminution du taux de macroagrégats stables du sol avec la mise en culture est plus importante sous labour que sous travail minimum. L'ampleur de cette diminution, de même que la différence entre les pratiques culturales semble dépendre du type de sol (texture et type d'argile) :

- sur sol ferrugineux tropical, la diminution du taux de macroagrégats stables est de 69,1% avec le labour et de 44,2 % avec le travail minimum ;
- sur sol brun vertique, la diminution du taux de macroagrégats stables de 17,6 % avec le labour et de 5,5 % avec le travail minimum.

Figure 2. Effet des pratiques culturales sur la structure du sol (10 cm)
(Bassin versant de Djitiko au Mali)



3.2. Effets sur le ruissellement

Par rapport au labour, le travail minimum du sol favorise une diminution du ruissellement, mais avec une ampleur variable selon le type de sol (tab.1). La différence entre les deux pratiques est plus nette sur sol ferrugineux tropical et même considérable dans le cas des sols ferrugineux très sableux de Mbissiri (rapport supérieur à 5). Par contre, sur sol brun vertique de Djitiko, le rapport n'est que légèrement supérieur à 1.

Tableau 1. Influence du labour et du travail minimum du sol sur le ruissellement en zone soudanienne

Site	Sol	% (A+Lf) dans l'horizon de surface	Coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) %		
			Sous Labour (1)	Sous TMS (2)	(1)/(2)
Sud Mali	S. ferrugineux tropical	26	45,2	24,8	1,82
	S. brun vertique	56	27,4	26,4	1,03
Nord Cameroun	Sol ferrug./jeune défriche	10	23,1	4,4	5,25
	Sol ferrug./vieille défriche	8	23,5	4,4	5,34

4. Techniques de GCES

3.3. Effet sur l'érosion et les pertes en carbone

Sur tous les types de sol, le labour est responsable d'une érosion supérieure à celle enregistrée avec le travail minimum du sol, avec des rapports plus ou moins proches de 3.

Sur sol ferrugineux tropical, au Cameroun et au Mali, les pertes de carbone sont toujours plus élevées avec la pratique du labour qu'avec le travail minimum du sol (Bep *et al.*, 2004 ; Diallo *et al.*, 2004a) avec un rapport légèrement supérieur à 2 (tab.2). Au contraire, dans le cas du sol brun vertique, le travail minimum du sol est responsable d'une perte de carbone légèrement supérieure à celle mesurée sur parcelle labourée (rapport légèrement inférieur à 1). En effet, la teneur en C du sol sous TMS est supérieure à celle observée sous labour.

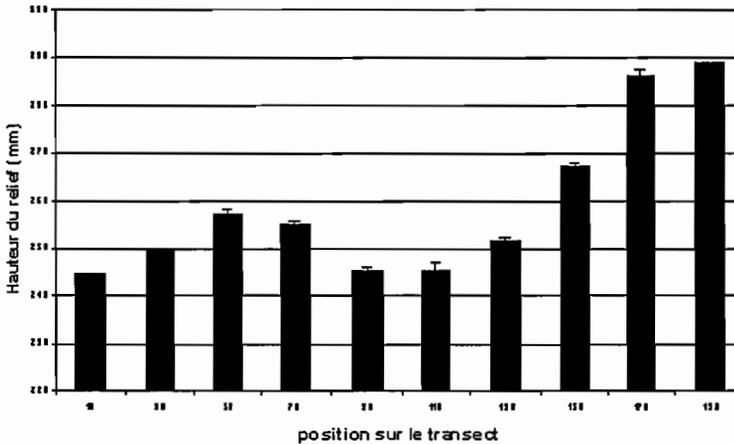
Tableau 2 Influence du labour et du travail minimum du sol sur l'érosion et les pertes de carbone en zone soudanienne

Site	Sol	% (A+Lf) dans l'horizon de surface	Érosion (t ha ⁻¹ an ⁻¹)			Perte de carbone (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)		
			Sous labour (1)	Sous TMS (2)	(1)/(2)	Sous labour (1)	Sous TMS (2)	(1)/(2)
Mali	S. ferrugineux tropical	26	18,4	7,4	2,5	395	184	2,14
	S. brun vertique	56	14,1	5,8	2,4	216	283 ?	0,76
Cameroun	S. ferrugineux tropical du bloc jeune jachère	10	9,2	3,1	3	-	-	-
	S. ferrugineux tropical du bloc vieille jachère	8	11,4	4,2	2,7	133	64	2,07

3.4. Effets sur les rendements agricoles

Les résultats obtenus au Nord Cameroun (Boli, Roose, 2004) et présentés à la figure 3 montrent des rendements de maïs nettement meilleurs avec le labour (2,5 fois plus qu'avec le travail minimum du sol) en 1992 et 1994 où le cycle des cultures a respectivement bénéficié de 1 184 et 1 073 mm de pluie. Par contre, les deux techniques culturales permettent d'avoir le même rendement sur coton en 1993 après avoir bénéficié de 772 mm de pluie.

Figure 3. Influence du labour et du non-labour sur les rendements des cultures (Nord Cameroun d'après Boli *et al.*, 2004)



4. Discussion

4.1. Teneurs en carbone et stabilité structurale

Les faibles taux d'argile (kaolinite) et limon fin (environ 10 %) dans les sols ferrugineux tropicaux de Mbissiri expliquent leurs faibles teneurs en carbone par rapport aux sols ferrugineux tropicaux et bruns vertiques de Djitiko (respectivement 26 % et 56 % d'argile et limon fin). La supériorité des taux de carbone sous travail minimum du sol peut s'expliquer par l'impact positif de cette pratique sur l'activité biologique et l'érosion. La stabilité structurale est affectée par l'intensité du travail du sol et devient faible sous labour. Cette tendance de la stabilité structurale est notée par différents auteurs cités par Diallo *et al.*, (2004a).

4.2 Ruissellement et érosion

Les différences notées entre coefficients de ruissellement des différents sols testés résultent principalement de leurs caractéristiques texturales. Les sols sableux de Mbissiri sont nettement plus filtrants que les sols de Djitiko. La supériorité des coefficients de ruissellement et de l'érosion sous labour est une conséquence de la dégradation de la structure du sol par cette pratique.

4.3 Perte de carbone

La concentration en carbone du matériau pédologique influence directement la teneur en carbone des sédiments qui y sont arrachés et celles des eaux qui véhiculent ces sédiments (Diallo *et al.*, 2004b). Cela explique, avec les pertes importantes en terre, les pertes élevées de carbone par les sols de Djitiko. Dans tous les

cas, le labour responsable d'érosion plus forte, est la cause de pertes de carbone plus élevées que celles notées avec le travail minimum du sol.

4.4 Rendement des cultures

D'après les résultats présentés, le labour a généralement donné des rendements agricoles nettement meilleurs à ceux obtenus avec le travail minimum du sol. Ce résultat est conforme au constat de Aina (1993). Cependant Boli *et al.*, (2004) estiment que le labour ne produit pas systématiquement mieux que le non-labour : en année sèche, des rendements en coton obtenus avec travail minimum seraient égaux ou supérieurs à ceux obtenus avec le labour. La meilleure infiltration sous travail minimum du sol contribuerait dans ce cas à valoriser les pluies déficitaires.

5. Conclusion

Les techniques simplifiées semblent avoir des effets positifs sur la richesse du sol en carbone et sa stabilité structurale. En ce qui concerne la dynamique du sol, on note une atténuation du ruissellement et de l'érosion avec la simplification des techniques culturales. Cependant la démarcation entre labour conventionnel et techniques simplifiées de travail du sol semble être plus ou moins prononcée selon le type de sol. L'évaluation comparative des modes de travail du sol, en particulier l'influence sur les rendements des diverses cultures, mérite d'être faite pour les différentes principales couvertures pédologiques cultivées pour mieux éclairer les exploitants agricoles et les décideurs.

Références bibliographiques

- BEP AZIEM, B., BOLI, Z., ROOSE, É., 2004, « Influence du labour, du fumier et de l'âge de la défriche sur le stock de carbone du sol et les pertes de C par érosion et drainage dans une rotation intensive coton/maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux du Nord Cameroun », *Bull. réseau Érosion*, 22 : 176-192
- BOLI Z., ROOSE, É., 2004, « Effets comparés du Labour classique et du non labour sous litière sur le fonctionnement de deux sols ferrugineux tropicaux sableux à Mbissiri, Nord-Cameroun », *Bull. réseau Érosion* 23 : 431-437
- CHARREAU, C., NICOU, R., 1971, « L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques (d'après les travaux des chercheurs de l'IRAT en Afrique de l'Ouest) », *Agronomie tropicale*, XXVI : 209-255
- DIALLO, D., BARTHÈS, B., ORANGE, D., ROOSE, É., 2004a, Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali, *Sécheresse*, 15, 1, 57-64
- DIALLO, D., ORANGE, D., ROOSE, É., 2004b, « Influence des pratiques culturales et du type de sols sur les stocks et les pertes de carbone par érosion en zone soudanienne du Mali », *Bull. réseau Érosion* 22 : 193-207
- EHLERS, W., 1979, « Influence of tillage on hydraulic properties of loessial soils in western Germany », in *Soil tillage and crop production*, R. Lal (édit.), IITA, Ibadan : 33-45
- FAO, 1998, « Théodor Friedrich, ingénieur agronome de la FAO, nous parle du labour minimum », *L'Actualité*. <http://www.fao.org/nouvelle/1998/tfried-f.htm>, 2 pp.
- INRA, 2001, *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, dossier réalisé à l'occasion d'une conférence-débat organisée par l'INRA en collaboration avec l'ITCF, <http://www.inra.fr/actualites/DOSSIERS/sol/labour.html>

LAL, R., 1979, « Importance of tillage in soil and water management in the tropics », *in Soil tillage and crop production*, R. Lal (édit.), IITA, Ibadan : 25-32

VAN DOREN, D. M., Jr., Triplett, G. B., Jr., 1979, « Tillage system for optimizing cropproduction », *in Soil tillage and crop production*, R. Lal (édit.), IITA, Ibadan : 2-23

Effets des jachères légumineuses arbustives sur la séquestration du carbone et l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion

Manankazo, Nord-Ouest de Madagascar

MARIE-ANTOINETTE RAZAFINDRAKOTO¹, JEAN-CHRYSOSTOME RANDRIAMBOAVONJY², H. RANDRIANARIMANANA³, NICOLAS ANDRIAMAMPIANINA⁴

¹département eaux et forêts de l'École supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, B. P. 175,

Tél. : +216 22 316 09, Courriel : ma.kisatoo@univ-antananarivo.mg

²département eaux et forêts de l'École supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, B. P. 175,

Tél. : +216 22 316 09, Courriel : jc.randriamboavonjy@univ-antananarivo.mg

³département eaux et forêts de l'École supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, B. P. 175, Tél. : +216 22 316 09.

⁴département de recherches forestières et piscicoles, FOFIFA Ambatobe, Antananarivo

Résumé

Actuellement, l'accumulation dans l'atmosphère du gaz carbonique à effet de serre prend une ampleur alarmante. Pour enrayer ce danger pour l'environnement, de nombreuses recherches visent à trouver des solutions efficaces de séquestration du carbone.

À Madagascar, ce problème est dû en partie à l'urbanisation, mais surtout à la fréquence des feux de brousse, qui engendre de plus une dégradation importante de la végétation naturelle.

Ainsi, l'ESSA-Forêts a collaboré avec le FOFIFA (Centre national de recherche pour le développement rural, département de recherches forestières et piscicoles) pour effectuer une étude sur l'effet des jachères légumineuses arbustives sur la séquestration du carbone et l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion.

Le site d'expérimentations choisi a été la station expérimentale du FOFIFA dans la région de Manankazo-Tampoketsa (Nord-Ouest de Madagascar). C'est une zone de relief à haute altitude soumise à des feux de brousse annuels ayant détruit la végétation jusqu'à l'état de steppe à *Aristida*. À ce facteur favorisant l'érosion, s'ajoutent le caractère érodible du sol dégradé, l'agressivité climatique de la région et les pratiques culturelles traditionnelles sans intrant dans la zone.

Les espèces de jachères légumineuses étudiées étaient : *Tephrosia vogelii*, *Calliandra calothyrsus*, *Flemingia congesta*.

Pour évaluer l'efficacité de ces divers types de jachères à légumineuses pour la séquestration du carbone, elles sont comparées à l'écosystème de forêt naturelle (référence de fertilité maximale) et à la prairie d'*Aristida* dégradée brûlée annuellement (référence de fertilité très faible).

Des analyses de sol au laboratoire ont été effectuées pour évaluer le stockage de carbone dans l'horizon 0–30 cm du sol. Les analyses de sol ont été faites avant et après enfouissement de la biomasse de jachère dans le sol à 15 cm de profondeur. Nous avons aussi effectué l'évaluation de l'efficacité des divers types de jachères légumineuses sur l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion. Par la méthode d'aspérimétrie, nous avons pu mesurer l'épaisseur de couche de sol érodé à la surface au niveau des microreliefs et l'épaisseur de couche de sol sédimenté dans les microdépressions. L'érosion mesurée sous les divers agroécosystèmes a été mise en relation avec le taux de matière organique du sol.

Résultats

La jachère légumineuse de *Tephrosia vogelii* a présenté la meilleure efficacité pour la séquestration du carbone dans le sol ce qui engendre une meilleure résistance du sol à l'érosion. Ainsi, ce type de jachère constitue un meilleur agro-écosystème de stockage du carbone dans le sol. Son efficacité se situe à une position la plus proche de la forêt naturelle. La jachère de *Calliandra calothyrsus* puis la jachère de *Flemingia* suivent la jachère de *Tephrosia vogelii*.

Le sol sous prairie d'*Aristida* brûlée annuellement présente une aptitude très faible à la séquestration du carbone dans le sol et présente une sensibilité à l'érosion très élevée. Les feux de brousse produisent des effets néfastes sur la séquestration du carbone.

Mots clés : séquestration de carbone ; résistance du sol à l'érosion ; jachères légumineuses arbustives ; forêt naturelle ; prairie brûlée annuellement – Manankazo, Madagascar.

Figure 1. Jachère légumineuse de *Tephrosia vogelii* durant sept ans



Tableau 1. Stockage de carbone dans le sol pour les divers agroécosystèmes (horizon 0–30 cm)

Avant enfouissement de biomasse			Après enfouissement de biomasse			
Parcelle	C %	C T/ha	Mo %	C%	C T/ha	Mo %
Forêt	7,75	127,9	13,49			
JT7	4,92	109,5	8,56	6,00	119,1	10,44
JCALL 10	4,85	97,1	8,44			
JFP 5	4,73	87,0	8,23	5,25	97,5	9,13
JFC2M	4,27	80,8	7,43			
JFC1M	4,18	63,3	7,27	5,05	72,0	8,79
PVD	3,10	49,3	5,39	4,03	57,2	7,01
PBA	2,42	27,2	4,21	2,84	34,2	4,9

Forêt : forêt naturelle

JT7 : jachère de *Tephrosia vogelii* durant sept ans

JCALL 10 : jachère de *Calliandra calothyrsus* durant dix ans

JFP 5 : jachère pleine de *Flemingia congesta* durant cinq ans

JFC2M : espace cultural en couloir de 2 m entre deux haies vives de *Flemingia congesta* à deux rangées (cinq ans)

JFC1M : espace cultural en couloir de 1 m entre deux haies vives de *Flemingia congesta* à une rangée (cinq ans)

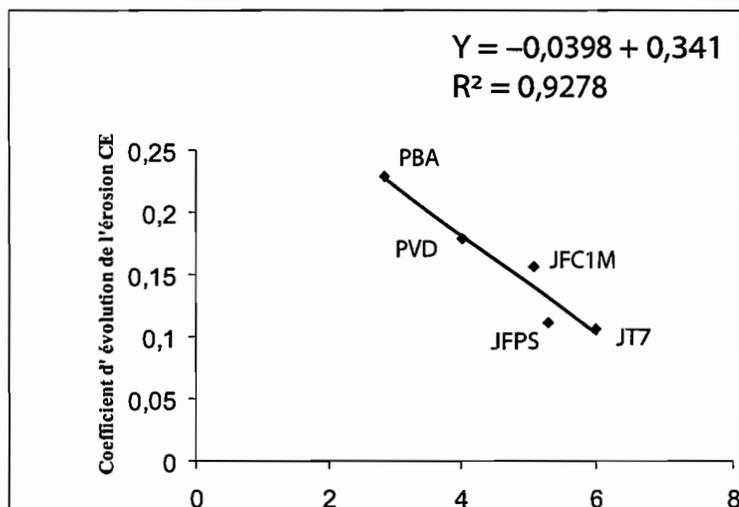
PVD : prairie dégradée à steppe d'*Aristida*, sur pente

PBA : prairie dégradée à *Aristida* brûlée annuellement, sur pente

Tableau 2. Équations empiriques des courbes d'évolution de l'épaisseur cumulée de sol de microreliefs érodé Er en fonction de la hauteur de pluie cumulée SP

Parcelles	Equations empiriques	R ²
JT7	Er= 0,980891 SP log 0,106702 SP	0,81730
JFP5	Er= 0,728894 SP log 0,111229 SP	0,78375
JFC1M	Er=0,647580 SP log 0,156859 SP	0,77976
PVD	Er= 0,977206 SP log 0,178864 SP	0, 85752
PBA	Er= 0,701602 SP log 0,228825 SP	0,80646

Figure 2. Relation entre le coefficient d'évolution de l'érosion et le taux de carbone du sol



Références bibliographiques

- AMEZKETA, E., 1999, « Soil aggregate stability », *J. Sustainable Agric*, 14 : 83-151
- BARTHES, B., ALBRECHT, A., ASSELINE, J., DENONI, G., ROOSE, É., 1999, « Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France) », *Comm. Soil Sci. Plant Anal*, 30, 13 and 14 : 1928-1938
- BOIFFIN, J., 1984, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, thèse doctorale, Paris, tome I, 316 pp.
- BOYE, A., ALBRECHT, A., 2004, Soil erodibility control and soil carbon losses under short term tree fallows in western Kenya, *Bull. réseau Érosion*, IRD Montpellier, 23 : 123-142
- KÖNIG, D., 1990, « Contributions des méthodes agro-forestières à la lutte antiérosive au Rwanda », *Bull. réseau Érosion* 11 : 185-191
- KÖNIG, D., 2004, « Conservation et amélioration de la productivité des sols dans des systèmes agro-forestiers au Rwanda », *Bull. réseau Érosion* 23 : 41-49
- LE BISSONNAIS, Y., 1996, « Soil characteristics and aggregate stability », *Soil erosion, conservation and rehabilitation*, New York, Dekker, : 41-60
- ROOSE, É., DIALLO, D., BARTHES, B., ORANGE, D., 2004, « Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurée sur parcelles en zone soudanienne du Mali », *Sécheresse* 15, 1 : 57-64
- SABIR, M., ROOSE, É., 2004, « Effects of soil types and vegetal cover on soil carbon stock and runoff/ erosion risks in the western Rif's Mediterranean mountains (Morocco) », *Bull. réseau Érosion*, 23 : 145-153

Érosion et évolution des conditions culturales après défriche sous différents systèmes de culture en labour et semis direct sur couverture végétale

B. MULLER^{1,5}, J.-M. DOUZET^{1,5}, R. L. RABEHARISOA^{2,5},
R. R. N. RAZAFIMIROE⁵, J. RAKOTOARISOA^{3,5},
RAZAKAMIARAMANANA^{3,5}, A. ALBRECHT⁴

¹Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Avenue Agropolis, TA 40/01, 34398 Montpellier Cedex 5, France
Courriel : bertrand.muller@cirad.fr ; jean-marie.douzet@cirad.fr

²laboratoire des radio-isotopes (LRI), service de la radioagronomie, route d'Andraisoro, B. P. 3383, 101, Antananarivo, Madagascar
Courriel : lrabehar@refer.mg

³ Centre national de recherche appliquée au développement rural (FOFIFA), B. P. 1690, Antananarivo 101, Madagascar
Courriel : fofifarj@wanadoo.mg ; fofifa-abe@wanadoo.mg

⁴ laboratoire MOST, Institut de recherche pour le développement (IRD), B. P. 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France
Courriel : alain.albrecht@mpl.ird.fr

⁵ URP SCRID, SRR FOFIFA, B. P. 230, Antsirabe 110, Madagascar

Contexte et objectif

Sur les Hautes Terres de Madagascar, une érosion importante affecte les sols labourés qui sont souvent déjà peu fertiles, étant majoritairement ferrallitiques, acides, pauvres en matière organique et déficients en phosphore (Rabary, 1997; Rabeharisoa, 1985). Aussi les rendements sont-ils faibles (0,4 T/ha en maïs sans fumure ; Arrivets *et al.*, 1989) et les parcelles vite délaissées. Au début des années 90 les systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale (SCV) ont été introduits, ayant montré ailleurs qu'ils contrôlent fortement l'érosion du fait du non-travail du sol et de sa protection (Alberts, Neibling, 1994 ; Gilley *et al.*, 1987 ; Séguy *et al.*, 1996). Ils améliorent aussi le bilan hydrique (Scopel *et al.*, 1998) et ont des effets positifs sur les mécanismes régissant la fertilité (Lal, 1997 ; Razafimbelo *et al.*, 2005; Randriantsoa, 2001 ; Reyes Gomez *et al.*, 2002). De fait à Madagascar les SCV ont-ils montré qu'ils pouvaient maintenir ou améliorer les productions (cf. rapports TAFE). Mais si les résultats agronomiques démontrent leur intérêt, ils sont pour le moment encore peu adoptés. Cela tient des difficultés du transfert de technologie à des petits agriculteurs pauvres et peu encadrés (Razakamiaramanana *et al.*, 2000)

et à la connaissance encore limitée de leur performances par les « décideurs » car peu d'études leur ont été consacrées dans l'île. En particulier il n'en existe pas, à notre connaissance, comparant les érosions, en quantité et qualité, en conditions paysannes en labour et en SCV.

Notre étude s'inscrit dans ce contexte, avec comme objectif de déterminer les érosions, tant en quantité globale, qu'en terme de pertes en matière organique, azote, carbone et phosphore, se produisant sur plusieurs années après la mise en culture d'une jachère, sur un système paysan typique, et d'autres, selon la gestion du sol. Parallèlement seront observés les profils et les productions pour suivre l'évolution des conditions culturales. L'étude permettra aussi de modéliser les ruissellements pour améliorer les modèles de simulation du bilan hydrique.

Matériels et méthodes

Un dispositif spécifique a été mis en place à Andranomanelatra (1640 m) près d'Antsirabe en 2004 sur une jachère de six ans. La pente est régulière de 10 à 13 %, plutôt forte pour les conditions locales. Le sol est ferrallitique développé sur substrat fluvio-lacustre, représentatif de la zone. La végétation était faible car pâturée, dominée par *Aristida sp* et *Cynodon sp*.

Le dispositif comprend 20 parcelles de 12 m x 4 m, les unes à côté des autres, groupées en 5 blocs pour avoir 5 traitements et 4 répétitions (figure 1). Pour la saison 2004-2005 seuls 3 traitements ont été mis en place, basés sur un système paysan typique : riz pluvial en rotation avec l'association maïs+haricot. Ces 3 traitements (S1, S2, S3) se différencient par la gestion du sol. On a commencé par l'association maïs+haricot. En 2005 seront mis en place 2 autres systèmes (S4 et S5). On a :

- S1 : maïs+haricot / riz, en labour ;
 - S2 : maïs+haricot / riz, en labour en année 1, avec passage en SCV en année 2 ;
 - S3 : maïs+haricot / riz, en SCV dès l'année 1 (herbicidage de la couverture) ;
 - S4 : riz – vesce (dérobée) / haricot – avoine (succession) – vesce (dérobée), en labour ;
 - S5 : riz – vesce (dérobée) / haricot – avoine (succession) – vesce (dérobée), en SCV ;
- Seul du fumier est appliqué (7 T/ha), tel qu'en conditions paysannes.

Trois répétitions sont équipées d'un lot de contrôle des ruissellements et érosions de 12 m x 1,8 m (21,6 m²) avec tôles, collecteur et fûts avec partiteur 1/5 (Hudson, 1993 ; Roose, 1994), installé avant les labours. 4 micro-parcelles de 1 m² ont aussi été placés en S1 et S3. La pluviométrie est suivie sur le site (quantité et intensité) par une station automatique CIMEL. Les ruissellements et les charges sont contrôlés chaque matin par mesure des volumes et par prise de deux aliquotes de 1,5 litre, qui sont filtrés, et dont l'un est séché à l'étuve pour déterminer les charges, et l'autre au frais pour les analyses. Les analyses ne seront réalisées que sur certains échantillons choisis en fonction des quantités érodées.

Des mesures similaires ont été réalisées sur 4 parcelles installées dans des parcelles paysannes :

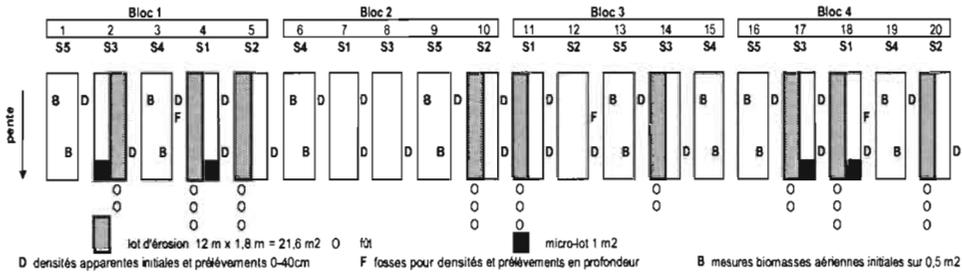
- 2 parcelles (P1 et P2) dans une parcelle semée en maïs+haricot en labour, en troisième année de culture après défriche, après les mêmes précédents, dans une

pente forte de 27-30 % ; ils ont été installés avec cinq semaines de retard sur les semis ;

- 1 parcelle (P3) installée au moment de la défriche-labour (à la main) dans une parcelle semée en riz pluvial, avec une pente de 20 % ;
- 1 parcelle (P4) installée dans une parcelle semée en maïs+haricot en semis direct sur défriche par nettoyage manuel puis herbicidage, avec une pente de 22 %.

Les densités sous jachère ont été mesurées (aux cylindres) avec des prélèvements pour analyses : 2 fosses par parcelle (figure 1), strates 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm. Les mêmes mesures ont été effectuées jusqu'à 2 m en 3 sites. La couche 0-5 mm a été prélevée après labour en S1 et S2, puis en fin de saison. Des analyses complètes de sol sont prévues sur tous les échantillons, y compris des formes du phosphore. Les profils seront étudiés après deux, quatre, six et dix ans. Les rendements et biomasses aériennes seront déterminés chaque année.

Figure 1. : plan du dispositif



Résultats

En année 1 les résultats de S1 et S2 sont confondus et comparés à ceux de S3. Les ruissellements et les érosions mesurés par les parcelles de ruissellement sont très significativement différents (tableau 1). Les érosions sont pratiquement nulles en S3, alors qu'elles sont très importantes sous labour. Sur les micro-parcelles les résultats ne sont pas significativement différents, cela tenant aux hétérogénéités locales de couverture et pente. L'analyse des résultats en fonction des événements pluvieux et du développement des cultures est en cours. En première analyse on note que les pertes se concentrent en début de cycle tant que les cultures couvrent peu le sol. Les résultats sur les parcelles paysannes le confirment puisque sur P1 et P2 mis en place un peu plus d'un mois après le semis on a peu d'érosion malgré la pente très forte. Les faibles pertes sous P3 s'expliquent quant à elles par une quantité importante de biomasse enfouie.

Les rendements sont conformes à ce que l'on observe dans la zone (cf. rapports TAFE): meilleurs pour le haricot en semis direct qu'en labour (1144 vs 689 kg/ha), vraisemblablement car les micro-organismes sont moins perturbés et l'humidité plus favorable pendant la formation des gousses; moins bons en maïs en semis direct (1350 vs 1954 kg/ha) du fait probable d'une difficulté pour son système racinaire à s'implanter la première année sans labour.

Tableau 1. : Ruissellements et érosions mesurés sur le dispositif et les parcelles paysannes

					Ruissellements cumulés (mm)			Erosions cumulées (g/m ²)		
					moyenne	écartype	CV%	moyenne	écartype	CV%
S1, S2	lab	maïs+haricot	10-13%	lot	43,2	10,6	25	2432	999	41
S3	SCV	maïs+haricot	10-13%	lot	19,2	13,4	70	43	51	119
S1, S2	lab	maïs+haricot	8-11%	micro-lot	84	---	---	2424	---	---
S3	SCV	maïs+haricot	12%	micro-lot	89	---	---	65	---	---
P1, P2	lab	maïs+haricot	27-30%	lot	26,9	---	---	47	---	---
P3	lab	riz pluvial	20%	lot	60,7	---	---	194	---	---
P4	SCV	maïs+haricot	22%	lot	77,8	---	---	74	---	---

Conclusion et discussion

Le dispositif a commencé à répondre à ses objectifs, fournissant un premier jeu de données sur les pertes en terre après mise en culture d'une jachère, qui témoignent de leur importance sous labour (24,3 t/ha). L'expérience doit se poursuivre pour évaluer les érosions et l'impact des systèmes sur les profils de sol et les conditions culturales. Des financements doivent être trouvés pour permettre toutes les analyses et valoriser l'expérimentation.

Mots clefs : ruissellement ; érosion ; matière organique ; phosphore ; semis direct sur couverture végétale ; Madagascar.

Références bibliographiques

- ALBERTS, E. E., NEIBLING, W. H., 1994, « Influence of crop residues on water erosion », in *Managing agricultural residues*, Unger P.W. (édit.), Lewis Pub. : 20-39
- ARRIVETS, J., RABETRANO, A., RAKOTOANDRIAMIHAMINA, J., 1989, Fertilisation organominérale des sols ferrallitiques des hauts plateaux malgaches, Économie des engrais importés et valorisation des ressources locales, CIRAD-IRAT
- ILLEY, J. E., FINKNER, S. C., VARVEL, G. E., 1987, « Slope length and surface residue influences on runoff and erosion », *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 30, 148
- HUDSON, N.W., 1993, Field measurement of soil erosion and runoff, *FAO soils bulletin*, n° 68, 139 pp.
- LAL, R., 1997, « Long-term tillage and monoculture effects on a tropical Alfisol in Western Nigeria: II, Soil chemical properties », *Soil & Tillage Research*, 42 : 161-174
- RABARY, B., 1997, « BILFA low phosphorus evaluation in Eastern Africa », Paper presented at Ecabren Multidisciplinary Workshop, 12-16 May 1997. CIAT, Embu, Kenya
- RABEHARISOA, L., 1985, *Étude de l'influence de l'aluminium échangeable sur la dynamique du phosphore et son assimilation par le blé dans un sol ferrallitique de la région d'Ambohimandroso*, utilisation de 32P, mémoire de D.E.A. de sciences biologiques appliquées E.S.S.S., Antananarivo., Université de Madagascar, 59 pp.
- RANDRIANTSOA, M. M., 2001, *Rôle de la matière organique dans la fertilité phosphorique d'un sol ferrallitique des hautes terres malgaches*, mémoire de D.E.A de l'Institut national polytechnique de Lorraine, Montpellier, France, CIRAD, 26 pp.
- RAZAFIMBELO, T. M., ALBRECHT, A., FELLER, C., MICHELLON, R., MOUSSA, N., MULLER, B., OLIVER, R., RAZANAMPARANY, C., 2005, Soil carbon storage and physical protection according to tillage and

4. Techniques de GCES

soil cover practices (Antsirabe, Madagascar), poster accepted for the IIIrd World Congress on Conservation Agriculture, Nairobi Kenya, October 3rd-7th 2005.

RAZAKAMIARAMANANA., MICHELLON, R., RABARY, B., RANDRIAMANANTSOA, R., 2000, « Recherche d'accompagnement sur les systèmes de cultures sur couverture végétale », communication présentée à l'atelier national sur la gestion agroécologique des systèmes de culture sur couverture permanente organisé par le Groupe semis direct à Madagascar, Antsirabe

REYES GOMEZ, V., FINDELING, A., MARLET, S., OLIVER, R., MARAUX, F., ALVES MOREIRA, J. A., DOUZET, J. M., SCOPEL, E., RECOUS, S., 2002, Influence of no-tillage and cover plants on water and nitrogen dynamics in the Cerrados (Brazil), XVIIth World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, September, 2002

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

SCOPEL, E., MULLER, B., ARREOLA-TOSTADO, J.-M., CHAVEZ-GUERRA, E., MARAUX, F., 1998, Quantifying and modelling the effects of a light crop residue mulch on the water balance : an application to rainfed maize in western Mexico, proceedings of the 16th Congress of Soil Science, 20th-26th Aug 1998, Agropolis, Montpellier, France.

SÉGUY, L., BOUZINAC, S., TRENTINI, A., CÔRTEZ, N.A., 1996, « L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. II-La gestion de la fertilité par le système de culture », *L'Agriculture tropicale* 12 : 18-37

TAFA (ONG), rapports d'activités de 1992 à 2004

Caractérisation de la protection du sol contre l'érosion due à différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale à l'aide de micro-parcelles dans le cadre d'un essai multidisciplinaire

B. MULLER^{1,4}, J.-M. DOUZET^{1,4}, M. B. RASOLONIAINA⁴, S. RABEZANAHARY⁴,
A. RASAMILALA⁴, RAZAKAMIARAMANANA^{2,4}, A. ALBRECHT³

¹Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Avenue Agropolis, TA 40/01, 34398 Montpellier Cedex 5, France
Courriel : bertrand.muller@cirad.fr ; jean-marie.douzet@cirad.fr

²Centre national de recherche appliquée au développement rural (FOFIFA), B. P. 1690, Antananarivo 101, Madagascar

³laboratoire MOST, Institut de recherche pour le développement (IRD), B. P. 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France
Courriel : alain.albrecht@mpl.ird.fr

⁴URP SCRiD, SRR FOFIFA, B. P. 230, Antsirabe 110, Madagascar
Courriel : foffa-abe@wanadoo.mg

Contexte et objectif

Sur les Hautes Terres de Madagascar (1 200-1 800 m), à la pluviométrie importante (1 000-1 800 mm/an), une forte érosion affecte les cultures pluviales avec labour, entraînant une dégradation de la fertilité, des faibles productions et l'abandon rapide des parcelles (Rollin, 1994). Pour palier à ces difficultés les systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale (SCV) ont été introduits au début des années 90. Avec ces systèmes le sol n'est plus perturbé, les couvertures le protègent, le bilan hydrique est modifié (Scopel *et al.*, 1998 ; Alberts et Neibling, 1994) et on observe d'autres effets positifs sur le sol (Gobat *et al.*, 1998 ; Razafimbelo *et al.*, 2005 ; Lal, 1997). Des systèmes à une culture par saison ont d'abord été testés et montré qu'ils maintenaient, voire augmentaient, les productions (*cf.* rapports TAFa). Récemment des systèmes à base de successions ou associations de riz pluvial, vivriers, et fourrages, ont été conçus pour mieux répondre aux attentes des paysans (Séguy, 2002).

Un dispositif multidisciplinaire a été installé en 2002 à Andranomanelatra (1 640 m) près d'Antsirabe pour étudier leurs fonctionnements et impacts sur le milieu (porosité, séquestration du carbone, érosion, bilan d'azote, activités biologiques) sur le long terme, et y évaluer/sélectionner des écotypes de riz. Les systèmes ont été choisis par rapport à leurs effets potentiels sur le milieu en relation aux biomasses cultivées. Des témoins labourés sont présents et différentes fumures sont comparées. Cet essai est original par ses objectifs et sa complexité (40 traitements ; 120 parcelles ; 3,2 ha). Le sol

est ferrallitique argileux développé sur substrat fluvio-lacustre (ferralsol), représentatif de la zone. La topographie est plane.

Notre étude est menée sur ce dispositif et vise à évaluer les capacités de certains systèmes à limiter l'érosion. Vue la topographie et pour ne pas perturber les parcelles seuls des micro-parcelles (1m²) pouvaient y être utilisées. S'ils ne peuvent donner des valeurs vraies des ruissellements et érosions (Hudson, 1993 ; Roose, 1994), des travaux ont montré leur intérêt pour hiérarchiser des facteurs et établir des indicateurs (Le Bissonais *et al.*, 1998 ; Dunjo *et al.*, 2004 ; Uson, Ramos, 2001). On suivra sur plusieurs années l'évolution des effets protecteurs des systèmes.

Matériels et méthodes

Sept systèmes sont considérés (les symboles +, - et / indiquent respectivement une association, une dérobée, une rotation annuelle), qui constituent les traitements de notre étude :

- riz-vesce/maïs+soja-vesce, en labour (lab) ou SCV (sd), avec fumier (fu) ou fumier et fumure minérale (fm) : MSVlabfu ; MSVlabfm ; MSVsdfu ; MSVsdfm ;
- riz/maïs+brachiaria, en SCV, avec fumier/fumier+fumure minérale : MBsdfu ; MBsdfm ;
- riz / maïs+haricot, en labour, avec fumier seul : MHlabfu .

Le système MHlabfu est un système témoin paysan. Il y a quatre (4) répétitions par traitement, et une (1) micro-parcelle pour chacune (28 micro-parcelles au total). La campagne 2003-2004 a porté sur les composantes « avec riz » des rotations, la campagne 2004-2005 sur les autres.

Les micro-parcelles font 1 m², constitués de cadres métalliques de 1 m x 1 m x 0,2 m enfoncé légèrement et dont un côté possède une fente à placer au niveau du sol avec un système récupérateur qui aboutit à un tuyau débouchant dans un bidon. Ils sont placés en fonction de la topographie en cherchant à avoir une pente interne régulière. La pluviométrie est suivie sur le site (quantité et intensité) par une station automatique CIMEL. Les quantités ruisselées et les charges transportées sont contrôlées chaque matin : par mesure des volumes (ml) et par prise d'un aliquote représentatif de 1,5 litre qui est ensuite filtré puis séché à l'étuve. Les pentes au sein des cadres sont mesurées en fin de saison. Des suivis des états de surface et de l'horizon superficiel sont menés en parallèle: taux de sol nu, rugosité, densité apparente, et caractéristiques d'infiltration par la méthode Beerkan (Condappa, 2000 ; Findeling, 2001).

Résultats

La campagne 2003-2004 a permis de tester les effets de la gestion du sol, de la nature des résidus et de la fumure. Les valeurs sont faibles du fait de la topographie plane (tableaux 1 et 2). Elles sont affectées d'une forte variabilité entre répétitions qui résulte des hétérogénéités de la micro-topographie et des couverts. Aussi, s'il y a des différences marquées, elles ne sont pas significatives. Le système MBsd (résidus de maïs et de *Brachiaria*) est le plus protecteur avec des érosions de 1,47 t/ha (MBsdfm) à 1,76t/ha (MBsdfu). A l'opposé le système paysan MHlabfu (faible quantité enfouie de résidus de maïs et haricot) est le plus sensible à l'érosion avec 5,24 t/ha. Les touffes mortes herbicides de *Brachiaria* diminuent fortement les ruissellements et limitent

pratiquement les décollements ou transports de sol. Les itinéraires MSV sont intermédiaires, avec moins d'érosion en semis direct. La hiérarchie est la même lors des principales pluies. L'engrais a un effet systématiquement positif.

La campagne 2004-2005 permet de distinguer les effets directs des différentes cultures et couvertures en place sur les ruissellements et érosions. Les résultats confirment ceux de la première campagne (tableau 3): moins d'érosion sous SCV, rôle important de la couverture de *Brachiaria*, témoin paysan très sujet à l'érosion. Les autres mesures (non montrées ici) indiquent que l'effet positif du labour en début de cycle sur l'infiltration disparaît en quelques semaines (chute du Ksat) sous l'action des pluies.

Conclusion et discussion

Ces résultats confirment l'intérêt des systèmes en semis direct avec couverture végétale pour lutter contre l'érosion. L'effet de la couverture du *Brachiaria* apparaît particulièrement important. On note que le système paysan avec riz pluvial, maïs et haricot en labour est le plus sujet à l'érosion. Les micro-parcelles s'avèrent intéressants mais posent cependant des problèmes compte tenu des hétérogénéités locales des couverts et de la topographie. On espère que les différences s'affirmeront avec le temps et que les dispositifs de mesure permettront de les détecter. A noter que d'autres travaux ont commencé en parallèle dans des conditions de pente (10-20 %) avec des dispositifs à différentes échelles (de 1 à 25 m²) pour étayer ces informations et valider les données obtenues par les micro-parcelles sur le dispositif plan. Associés aux autres études (séquestration du carbone, activités biologiques), tous ces résultats permettront de mieux comprendre les effets des SCV sur les évolutions de la fertilité.

Tableau 1. ruissellements mesurés lors de la campagne 2003-2004

	Ruissellements cumulés (mm)			Ratio (ruiss. total / pluie totale) (%)			Max (ruiss./pluie) (%) observation maximale
	moyenne	écartype	CV%	moyenne	écartype	CV%	
MBsdfu	9,7	4,0	41	1,4	0,6	41	7,9
MBsdfm	9,8	3,0	31	1,4	0,4	31	7,5
MSVlabfm	15,6	6,7	43	2,3	1,0	43	21,8
MSVsdfm	15,7	5,4	34	2,3	0,8	34	14,8
MSVsdfu	22,9	19,3	84	3,3	2,8	84	31,2
MSVlabfu	27,9	24,4	87	4,1	3,6	87	46,3
MHlabfu	40,1	32,4	81	5,8	4,7	81	52,4

Tableau 2. érosions mesurées lors de la campagne 2003-2004

	érosion totale (g/m ²)			observations maximales	
	moyenne	écartype	CV%	charge (g/m ²)	turbidité (g/l)
MBsdfm	146,5	28,1	19	28,9	183
MBsdfu	150,8	78,2	52	31,4	946
MSVsdfm	180,4	36,4	20	37,3	483
MSVlabfm	218,8	55,5	25	44,7	1275
MSVsdfu	233,5	133,6	57	71,5	190
MSVlabfu	307,8	159,3	52	208,0	792
MHlabfu	524,2	552,8	105	313,1	583

Tableau 3. érosions mesurées lors de la campagne 2004-2005

	érosion totale (g/m ²)			observations maximales	
	moyenne	écartype	CV%	charge (g/m ²)	turbidité (g/l)
MBsdfm	115,4	84,6	73	25,6	114
MBsdfu	190,9	95,6	50	85,7	204
MSVsdfm	228,6	45,2	20	66,6	301
MSVsdfu	334,4	170,1	51	74,4	135
MSVlabfm	603,7	174,7	29	185,1	250
MSVlabfu	918,6	614,6	67	1058,4	273
MHlabfu	927,4	803,0	87	671,6	380

Mots clés : érosion, micro-parcelle ; semis direct sur couverture végétale ; riz pluvial ; Madagascar

Références bibliographiques

- ALBERTS, E. E., NEIBLING, W. H., 1994, « Influence of crop residues on water erosion », in *Managing Agricultural Residues*, Unger P.W. (édit.), Lewis Pub. : 20-39
- CONDAPPA, D., 2000, *Illustration de la méthode de « Beerkan » en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol*, mémoire de D.E.A., laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE-UMR5564), Université Joseph Fourier-Grenoble I, 49 pp.
- DUNJO, G., PARDINI, G., GISPERT, M., 2004, « The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment », *Journal of Arid Environments*, 57 : 99-116
- FINDELING, A., 2001, *Etude et Modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique*, thèse de doctorat de l'ENGREF, 335 pp. + annexes
- GOBAT, J.-M., ARAGNO, M., MATTHEY, W., 1998, *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*, collection « Gérer l'environnement », n°14, Presses polytechniques et universitaires romandes, 519 pp.
- HUDSON, N. W., 1993, « Field measurement of soil erosion and runoff », *FAO Soils Bulletin*, n° 68, 139 pp.
- LAL, R., 1997, « Long-term tillage and monoculture effects on a tropical Alfisol in Western Nigeria : II, Soil chemical properties », *Soil & Tillage Research* 42 : 161-174
- 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 and tillages research*, 46 : 69-80
- RAZAFIMBELO, T., M., ALBRECHT, A., FELLER, C., MICHELLON, R., MOUSSA, N., MULLER, B., OLIVER, R., RAZANAMPARANY, C., 2005, Soil carbon storage and physical protection according to tillage and soil cover practices (Antsirabe, Madagascar), poster accepted for the 11th World Congress on Conservation Agriculture, Nairobi Kenya, October 3rd-07th 2005
- ROLLIN, D., 1994, *Des rizières aux paysages : éléments pour une gestion de la fertilité dans les exploitations agricoles du Vakinankaratra et du Nord Betsileo (Madagascar)*, thèse de doctorat de géographie, Université de Paris X-Nanterre, 324 pp. + annexes
- ROOSE, É., 1994, « Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) », *Bulletin Pédologique de la FAO* n° 70, 420 pp.
- SCOPEL, E., MULLER, B., ARREOLA-TOSTADO, J. M., CHAVEZ-GUERRA, E., MARAUX, F., 1998, *Quantifying and modelling the effects of a light crop residue mulch on the water balance : an application to rainfed maize in western Mexico*, proceedings of the 16th Congress of Soil Science, 20th-26th Aug 1998, Agropolis, Montpellier, France
- SEGUY, L., 2002, Rapport de mission à Madagascar, octobre 2002, CIRAD
- TAFA (ONG), rapports d'activités de 1992 à 2004
- USON, A., RAMOS, M. C., 2001, « An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate ». *Catena*, 43 : 293-305

Effet des systèmes en semis direct sous couverture végétale sur le stock du carbone et l'agrégation d'un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres malgaches. (Andranomanelatra, Madagascar)

TANTELY M. RAZAFIMBELO, CHRISTIAN FELLER,
ALAIN ALBRECHT

IRD / LRI, service de la radioagronomie
B. P. 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar
Courriel : tantely.razafimbelo@ird.mg

1. Introduction

Stocker du carbone (C) dans le sol représente à la fois des enjeux agronomiques et environnementaux. En effet, augmenter le stock de C organique du sol permet d'améliorer ses propriétés physicochimiques, et donc d'améliorer la productivité végétale. Par ailleurs, stocker du C d'origine atmosphérique dans le sol, via les restitutions végétales, répond aussi à une problématique environnementale : la lutte contre l'effet de serre. On sait que la contribution de l'agriculture et du changement d'usage des terres aux émissions de CO₂ est loin d'être négligeable avec 34 % des émissions (IPCC, 2001) et les régions intertropicales participent pour 50 % de ces dernières. Aussi, une gestion raisonnée des agroécosystèmes doit viser à réduire les émissions des gaz à effet de serre et/ou à séquestrer du carbone dans le système sol-plante. Parmi les alternatives de gestion permettant de stocker du C d'origine atmosphérique dans le système sol-plante, les systèmes en semis direct avec couverture végétale ou SCV, paraissent intéressantes tant pour les milieux tempérés (Balesdent *et al.*, 1998) que tropicaux (Bayer *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2002). Ces systèmes se caractérisent par : (i) le non travail du sol, (ii) l'utilisation d'une couverture végétale sous forme de mulch (couverture morte) ou de couverture végétale vivante, et (iii) le semis à travers la couverture (Raunet *et al.*, 1998).

Ces systèmes pourraient conduire à un stockage de C dans le sol grâce à la quantité importante de résidus au sol d'une part, et à la limitation de la perte de carbone par minéralisation dû au non labour, d'autre part. Toutefois, le stockage de C dans le sol ne devient intéressant que si le C stocké est relativement stabilisé. On parle alors de « protection du C » dans le sol vis-à-vis de la minéralisation. Cette protection dépend de trois *processus* : la protection physicochimique due à l'association de la matière organique avec les colloïdes minéraux du sol ; la protection biochimique liée à la composition chimique de la matière organique stockée ; et la

protection physique liée à sa localisation à l'intérieur ou à l'extérieur des agrégats stables. Pour cette dernière, les dynamiques de C et de l'agrégation étant corrélées positivement (Chenu *et al.*, 1998 ; Barthès *et al.*, 2000), un stockage élevé de C sous ces systèmes SCV pourraient induire une amélioration de la stabilité des agrégats du sol, et par conséquent à une protection physique de C dans le sol.

L'objectif de ce travail est d'étudier, pour un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres malgaches, en référence à la pratique traditionnelle de labour, (i) l'effet des systèmes en semis direct avec couverture végétale ou SCV sur le stock de carbone organique du sol et la stabilité des agrégats du sol, (ii) de localiser le carbone stocké et de (iii) déterminer son niveau de protection vis-à-vis de la minéralisation microbienne.

2. Milieu et méthodes

L'étude est effectuée à Andranomanelatra (17° 47' S ; 47° 06' E), à 15 km au nord-est de la ville d'Antsirabe, à 1600 m d'altitude, sur un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériaux volcanique acide (Zebrowski, Ratsimbazafy, 1979). Le sol étudié est très argileux (60 % argile) et présente quelques propriétés andiques. La température moyenne annuelle est de 16°C et la pluviométrie annuelle moyenne de 1300 mm.

Le dispositif expérimental a été mis en place par l'ONG Tafa (Tany sy Fampanandroana ou Terre et Développement), avec l'appui du CIRAD en 1992.

Deux systèmes sont étudiés, chacun étant répété 3 fois sur des parcelles élémentaires en randomisation totale :

- LB m/s : un système en labour conventionnel (labour par traction animale avec une charrue à soc sur une profondeur de 20 cm) et sans restitution des résidus de récolte, en système de rotation annuelle maïs (*Zea mays* L.) / soja (*Glycine max.* L.),
- SCV m/s : un système en SCV, sans travail du sol et avec restitution des résidus de récolte, en rotation maïs-soja ;

En avril-mai 2003, juste après la récolte, 4 prélèvements ont été effectués sur chaque parcelle élémentaire : deux sur les lignes et deux sur les interlignes de culture, à 3 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-20 cm, à l'aide de cylindres de 250 cm³ et de 500 cm³. Les échantillons sont séchés à l'air puis tamisés à 2 mm.

Les analyses effectuées sont les suivantes :

- Les teneurs en C et N totaux sont déterminées par combustion au microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000).

- La stabilité structurale est étudiée au moyen d'un test Kemper et Rosenau (1986). C'est un test d'éclatement dans l'eau permettant d'isoler les macroagrégats stables (MA, 200-2000 µm), mésoagrégats (ME, 20-200 µm) et les microagrégats (MI, 0-20 µm).

- La protection physique de C dans les agrégats est étudiée par destruction par broyage à 50 µm et leur minéralisation en conditions standard pendant vingt-huit jours.

– La protection physicochimique est étudiée par fractionnement granulo-densimétrique de la matière organique du sol (Grandière *et al.*, soumis).

3. Principaux résultats

Teneurs et stocks de C.

Les résultats montrent des teneurs en C significativement plus élevées sous système SCV m/s par rapport au système LB m/s à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Au-delà de 10 cm de profondeur, les deux modes de gestion ne sont plus différents (Tableau 1). Les valeurs de stocks de C à masse équivalente indiquent un stockage annuel élevé pour le système SCV m/s étudié, environ 0,7 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour la couche de 0-20 cm et par différence avec le traitement labouré LB m/s.

Tableau 1 Teneurs en carbone (C) du sol et stocks de C exprimés à masse de sol équivalente de l'horizon 0-20 cm (M = 1411 MgC.ha⁻¹). Moyenne ± écart-type (n = 3).

	Teneurs en C (mgC.g ⁻¹ sol)			Stocks de C (MgC.ha ⁻¹)
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	Equiv. 0-20 cm
LB m/s	34,0 ± 5,1 a	35,2 ± 7,0 a	32,0 ± 7,0 ab	47,4 ± 8,2 a
SCV m/s	50,2 ± 6,0 b	40,9 ± 6,5 ab	30,8 ± 4,1 a	55,0 ± 4,7 b
Stockage par SCV	16,2	5,7	1,2	7,6

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même profondeur, sont différentes significativement

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même profondeur, sont différentes significativement ($p < 0,05$, $n=3$).

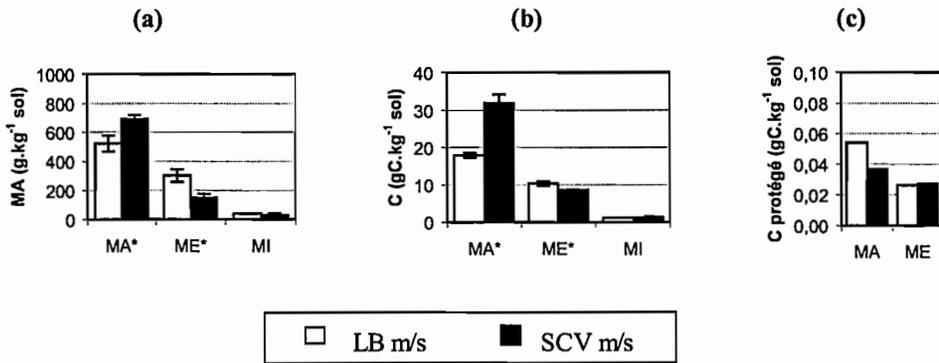
Stabilité des agrégats et localisation et protection de C dans les classes d'agrégats.

Elle est effectuée sur la couche de 0-5 cm. La teneur en macroagrégats stables (MA) varie de 522 à 691 g.kg⁻¹ sol, ce qui indique une bonne stabilité structurale du sol étudié. Cette teneur est significativement ($p > 0,05$) plus élevée, de 16 à 33 %, sous SCV m/s par rapport à LB m/s, à 0-5 cm (figure 2a).

Les MA et ME constituent la majorité du C du sol. Le C stocké dans le sol est localisé essentiellement dans les MA, avec des différences significatives entre SCV m/s et LB m/s (figure 2b). Ces MA contribuent à plus de 80 % à la différence de teneur en C entre SCV m/s et LB m/s.

Toutefois, il n'y a pas de différence significative entre le C minéralisé par les agrégats (MA et ME) non broyés (matière organique protégée) et les agrégats broyés (matière organique déprotégée), entraînant une quantité de C protégé physiquement très faible de l'ordre de 0,05 gC.kg⁻¹ sol (figure 2c).

Figure 2. Teneurs en macroagrégats stables (MA), mésoagrégats (ME) et microagrégats (MI) du sol (a) ; localisation du C (b) et C protégé dans les différentes classes d'agrégats.



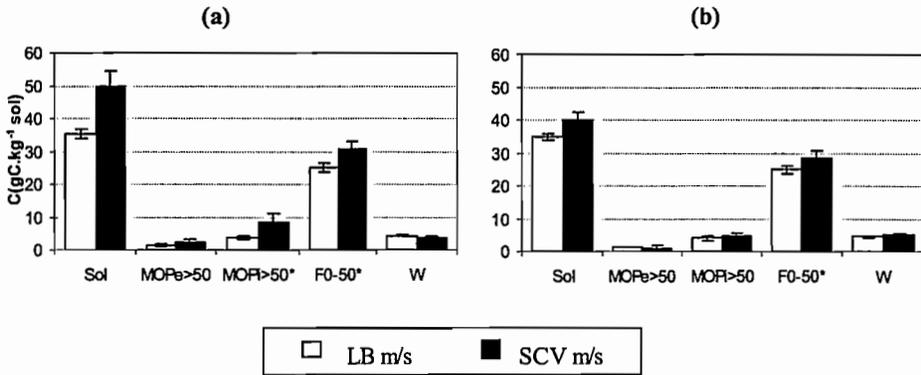
MA : macroagrégats stables (200-2000 μm) ; ME : mésoagrégats (20-200 μm) ; MI microagrégats (0-20 μm).
 * indique des différences significatives ($p < 0,05$) entre les deux traitements suivant le Test de Student ($n = 3$).

Localisation de C dans les fractions granulo-densimétriques du sol

Elle est effectuée sur les couches 0-5 et 5-10 cm. Le C du sol est essentiellement associé aux fractions fines inférieures à 50 μm . À 0-5 cm, les contenus en C des matières organiques (MO) particulières internes aux agrégats stables (MOPi > 50) de taille supérieure à 50 μm et celui des fractions fines inférieures à 50 μm (F 0-50) sont significativement plus élevés sous SCV m/s que LB m/s. À 5-10 cm, les différences concernent uniquement les fractions F 0-50 (figures 3a et 3b) avec des contenus significativement plus élevés sous SCV m/s que sous LB m/s. Les contenus en C des MO particulières externes aux agrégats (MOPe > 50) et des fractions solubles (W) ne sont pas significativement différents entre les deux modes de gestion.

Par rapport au labour conventionnel LB m/s, 30 à 40 % du C stocké sous SCV m/s sont associés aux MOPi > 50 μm et 40 à 60 % aux fractions fines F 0-50. À 5-10 cm, 60 à 90 % du C stocké sont associés aux fractions F 0-50.

Figure 3. Localisation de C dans les différentes fractions granulo-densimétriques du sol pour les couches de 0-5 cm (a) et 5-10 cm (b).



MOPe : matière organique particulaire externe aux agrégats (200-2000 μm) ; MOPi : matière organique particulaire interne aux agrégats (20-200 μm) ; F 0-50 : matière organique associée à la fraction fine 0-50 μm ; W : matière organique solubilisée lors du fractionnement.

* indique des différences significatives ($n < 0.05$) entre les deux traitements suivant le Test de Student ($n = 3$).

4. Discussion

Par rapport au sol labouré de manière conventionnel (LB) depuis onze ans, ne recevant pas de résidus de récolte, et considéré à l'équilibre, le sol sous systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV), recevant une quantité importante de résidus, présente des teneurs et stocks de C plus élevés. Ce stockage, d'environ 0,7 MgC.ha⁻¹.an⁻¹, relativement élevé, semble être en accord avec les données de la littérature qui donnent des valeurs de stockage annuel variant de 0,35 à 0,71 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ pour des systèmes en semis direct, mais avec restitution des résidus sur les traitements labourés (Bayer *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2002). Dans cette étude le stockage mesuré concerne à la fois l'effet du non-labour, combiné avec l'effet de la restitution des résidus. Le stockage annuel élevé sous systèmes SCV mesuré ici est alors attribué principalement à l'importante quantité de biomasse restituée par ces systèmes par rapport au traitement labouré. Toutefois, il pourrait aussi être attribuée à une diminution des pertes par érosion du C sous ces systèmes, grâce à la couverture permanente du sol (Razafimbelo, 2005).

Le sol étudié possède une stabilité structurale naturelle élevée avec un taux de macroagrégats stables (MA) supérieure à 50 %. Cette stabilité est encore améliorée sous systèmes SCV par rapport au système labouré. L'augmentation du stock de C sous SCV, dans cette étude, s'accompagne donc d'une augmentation des teneurs en MA. Environ 80 % du C atmosphérique stocké dans le sol sous système SCV sont localisés dans ces MA. Ce qui pourrait laisser supposer l'existence d'une protection physique du C stocké contre la minéralisation microbienne par son emprisonnement dans les MA stables du sol. Cette hypothèse a été vérifiée plusieurs fois dans la littérature (Beare *et al.*, 1994 ; Chevallier *et al.*, 2004). Toutefois, dans cette étude, la déprotection par broyage de ce C localisé dans ces MA stables ne conduit pas à une minéralisation du C contenu dans ces agrégats, ce qui

indique, soit l'inexistence d'une protection physique de C pour le sol étudié, soit une protection physique, si elle existe, localisée au niveau des agrégats de tailles inférieures à 50 μm (Sollins *et al.*, 1996).

Par rapport au labour, les systèmes SCV, permettent principalement une augmentation des contenus en C de la fraction fine du sol (F0-50) pour les couches 0-5 et 5-10 cm (40 à 90 % du C stocké y est localisé) et secondairement de la MO particulaire interne aux agrégats (MOPi >50) pour la couche de 0-5 cm. Cet enrichissement en C de la fraction fine du sol est souvent observé dans des systèmes à mulch (Razafimbelo *et al.*, 2003). On pourrait l'attribuer au rôle important joué par la faune du sol pour enfouir et transformer les débris végétaux grossiers (> 50 μm) en fraction fines (< 50 μm) et favoriser la formation de macroagrégats stables. Cette activité de la faune du sol est généralement très importante sous mulch (Mele et Carter, 1999). Notons que la matière organique associée à cette fraction est adsorbée sur la fraction minérale qui le protège physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne (Feller *et al.*, 1991), protection amplifiée par le caractère argileux et les propriétés andiques du sol étudié, qui lui confèrent un fort pouvoir d'adsorption.

Les systèmes SCV permettent aussi une augmentation des MO particulaires emprisonnés dans des agrégats > 50 μm (MOPi > 50). Toutefois, ces MOPi n'ont pas été minéralisées par la biomasse microbienne lors de leur exposition à la minéralisation par la destruction de ces agrégats > 50 μm du sol. Elles sont en partie protégées biochimiquement contre la minéralisation.

5. Conclusion

En conclusion, pour le sol argileux considéré ici, les systèmes SCV testés s'avèrent très efficaces pour stocker du C dans le sol. Ce stockage est attribué à la quantité importante de C restitué au sol. Ce C stocké est relativement stabilisé puisqu'il est protégé, au moins physico-chimiquement, contre la minéralisation microbienne. D'autre part, ces systèmes permettent d'améliorer la stabilité structurale du sol et avec l'utilisation de la couverture végétale, ils permettent de protéger le sol efficacement contre l'érosion.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à adresser leurs sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, notamment l'AUF, l'IRD et le FFEM pour avoir financé cette étude ; l'ONG Tafa, pour avoir permis de réaliser ces travaux sur leur dispositif ; l'URP SCRID (Antsirabe), le laboratoire MOST IRD-CIRAD (Montpellier) et le laboratoire des radioisotopes (Antananarivo) pour avoir permis de réaliser la préparation des échantillons et les analyses de laboratoire.

Références bibliographiques

BALESDENT, J., BESNARD, E., ARROUAYS, D., CHENU, C., 1998, « The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence », *Plant and Soil*, 201, 49-57

4. Techniques de GCES

- BARTHÈS, B., AZONTONDÉ, A., BOLI, B. Z., PRAT, C., ROOSE, É., 2000, « Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico) », *European Journal of Soil Science*, 51, 485-495
- BAYER, C., MIELNICZUK, J., AMADO, T. J. C., MARTIN-NETO, L., FERNANDES, S. V., 2000, « Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil », *Soil and Tillage Research*, 54, 101-109
- BEARE, M. H., CABRERA, M. L., HENDRIX, P. F., COLEMAN, D. C., 1994, « Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils », *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795
- CHENU, C., PUGET, P., BALESSENT, J., 1998, Clay-organic matter associations in soils : microstructure and contribution to soil physical stability, 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France
- CHEVALLIER, T., BLANCHART, E., ALBRECHT, A., FELLER, C., 2004, « The physical protection of soil organic carbon in aggregates : a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies) », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103, 375-387
- FELLER, C., FRANÇOIS, C., VILLEMIN, G., PORTAL, J., TOUTAIN, F., MOREL, J., 1991, « Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 12, sér. 2, 1491-1497
- GRANDIÈRE, I., RAZAFIMBELO, T., BARTHÈS, B., BLANCHART, E., LOURI, J., FERRER, H., CHENU, C., WOLF, N., ALBRECHT, A., FELLER, C., « Effet de différents systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar », soumis à *Étude et Gestion des sols*
- HOUGHTON, J. T., DING, V., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P., X. D., MASKELL, K. (édit.), IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- KEMPER, W. D., ROSENAU, R. C., 1986, « Aggregate stability and size distribution », in *Methods of soil analysis, part 1, Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs*. Klute A. (édit.), Madison, WI
- MELE, P. M., CARTER, M. R., 1999, « Impact of crop management factors in conservation tillage farming on earthworm density, age structure and species abundance in south-eastern Australia », *Soil and Tillage Research*, 50, 1-10
- RAUNET, M., SEGUY, L., FOVETS RABOTS, C., 1998, « Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept », in *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*, Rasolo, F., Raunet, M., (édit.), Antsirabe, Madagascar
- RAZAFIMBELO, T., 2005, *Stockage et protection de carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches*, thèse, École nationale supérieure agronomique, Montpellier, Université de Montpellier II
- RAZAFIMBELO, T., BARTHÈS, B., DE LUCA, E. F., LARRÉ-LARROUY, M. C., LAURENT, J.-Y., CERRI, C. C., FELLER, C., 2003, « Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Bresil », *Étude et Gestion des Sols*, 10, 191-200
- SIX, J., FELLER, C., DENEFF, K., OGLE, S. M., SÀ J. C. D. M., ALBRECHT, A., 2002, « Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils : effects of no-tillage », *Agronomie*, 22, 755-775
- SOLLINS, P., HOMANN, P., CALDWELL, B. A., 1996, « Stabilization and destabilization of soil organic matter : mechanisms and controls », *Geoderma*, 74, 65-105
- ZEBROWSKI, C., RATSIMBAZAFY, C., 1979, Carte pédologique de Madagascar au 1/100 000, feuille Antsirabe, Paris, Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer (ORSTOM)

La régénération de la fertilité des sols : cas d'un bassin versant à Miarinarivo, sur les Hautes Terres de Madagascar

LALA RAZAFY FARA

département des eaux et forêts, École supérieure des sciences agronomiques,
B. P. 175, Antananarivo 101, Madagascar
Courriel : fl.razafy@simicro.mg

1. Introduction

Pour un pays à haute valeur de la biodiversité comme Madagascar, les problèmes liés à la déforestation et ses conséquences sont pris très au sérieux. De plus, la majorité de la population vit encore au dépend des ressources naturelles dont la terre. Avec les problèmes de pression démographique (surtout sur les hauts plateaux) et de disponibilité des surfaces cultivables, la terre est ainsi très utilisée et les sols s'épuisent rapidement.

Pour Madagascar en général et dans le cas de la province d'Antananarivo, la restauration de la fertilité des sols devient une affaire d'État (PNUD/FAO, 1992). Pour faire face à ce problème, le Gouvernement avec les appuis des organismes nationaux et internationaux ont essayé de trouver des méthodes appropriées pour une régénération rapide de la fertilité des sols. Compte tenu de la pauvreté de la population rurale en générale, la méthodologie la plus appropriée est comprise comme la moins coûteuse (financièrement et temporellement). Cette étude a été conduite pour synthétiser les efforts entrepris par les paysans modèles depuis une quinzaine d'années dans un petit bassin versant localisé sur les Hautes Terres de Madagascar Projet FAO MAG.

L'objectif général de cette étude est de dégager l'intérêt de la régénération des sols par des techniques à la portée de la majorité des paysans. Les objectifs spécifiques qui se dessinent sont ainsi de :

- caractériser les différentes espèces utilisées ;
- suivre l'amélioration des productions sur les terres cultivées ;
- identifier les fonctions régénérées du bassin versant ;
- évaluer à l'échelle des paysans la régénération des sols.

Étant donné la pauvreté des paysans, les travaux de restauration des sols devraient être basés sur des techniques simples et non coûteuses : l'évaluation des aménagements portera sur l'augmentation des récoltes. Les deux hypothèses émises dans ce travail sont ainsi : les paysans sont conscients de la dégradation

des sols et, la régénération des sols est lente mais les résultats obtenus en valent la peine.

2. La zone d'étude

La zone d'étude est un bassin versant d'une superficie de 2 000 ha environ (Rasolofoharivony, 1991). Ce bassin est localisé dans la sous-préfecture de Miarinarivo à environ 90 km à l'ouest d'Antananarivo. Le bassin versant se trouve entre la longitude Est 47° 55' et la latitude Sud 19° 58'.

La zone d'étude jouit d'un climat tropical d'altitude. La pluviométrie moyenne annuelle y est de 1 518 mm. Les températures moyennes annuelles maxima et minima sont respectivement de 34 °C et 14 °C. La végétation naturelle de la zone d'étude est la végétation sclérophylle de moyenne altitude (Koechlin *et al.*, 1974). Après la dégradation de cette végétation naturelle, différents types de végétation modifiés y sont observés. Actuellement, la seule végétation naturelle présente est la forêt de Tapia (*Uapaca* spp). Les sous-bois herbacés sont dominés par différents types d'espèces, surtout utiles pour l'alimentation du bétail.

Pour l'ensemble de la sous-préfecture de Miarinarivo, la carte 1 présentée ci-après montre les occupations des sols actuellement. Cette carte est extraite de la base des données de FTM en 2004.

L'occupation des sols dans la zone de Miarinarivo est résumée le tableau suivant :

Tableau 1. Répartition des surfaces par unité de végétation

(Source : BD 100 FTM, 2004)

Désignation	Superficie en ha	Pourcentage
Savane herbeuse	37 606 442,89	89,57
Savane arborée	4 306 873,21	10,26
Mosaïque de culture	47 269,70	0,11
Forêt dense	16 714,31	0,0398
Rizières	4 071,39	0,0097
Plan d'eau	3 863,21	0,0092
Reboisement (<i>Eucalyptus</i> et/ou <i>Pinus</i>)	372,25	0,0009
Marécage	235,13	0,0006
Total	41 985 842,10	100,00

La savane herbeuse occupe la totalité de l'espace avec une superficie de 37 606 442,89 ha soit 89 % de l'ensemble. À cause de leur petite taille et de leur éparpillement, la superficie des rizières n'est que de 4 071 ha avec un pourcentage très faible (<1 %).

Avec un mode de vie basé sur l'agriculture, les paysans sont ainsi obligés de mettre en valeur les savanes herbeuses pour subvenir à leur besoin. Pour la sous-préfecture de Miarinarivo, 95 % de la population sont des ruraux (UPDR,2001). La régénération de la fertilité des sols se présente ainsi comme une activité vitale.

3. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude est basée essentiellement sur la documentation, les enquêtes formelles et informelles et les observations sur terrain. Chaque section est décrite brièvement ci-après

La documentation est conduite surtout pour connaître les caractéristiques du bassin versant étudié et des espèces choisies dans la méthode de régénération des sols. Elle permet de ce fait, de compiler les documents déjà existants et de retracer le passé du bassin versant faute de suivi cartographique.

Les enquêtes formelles et informelles ont été conduites auprès des principaux utilisateurs du bassin versant. Elles consistaient à obtenir les informations détaillées sur les espèces utilisées d'une part. Et, d'autre part, elles ont permis de retracer l'évolution de la régénération des sols en fonction de différents critères basés sur le constat des paysans sur la santé des sols. Cette santé des sols traduit en fait sa « qualité » d'après les scientifiques (Acton, Regorich, 1995). Toujours d'après les mêmes auteurs, les scientifiques caractérisent la qualité des sols en mettant l'accent sur les propriétés analytiques/quantitatives des sols et en faisant un lien distinct entre ces données quantitatives et les fonctions des sols.

Pour la caractérisation de la régénération des sols une méthode basée sur des observations directes a été élaborée. En effet, les sols dans un contexte général sont un mélange de particules minérales, des matières organiques et des organismes vivants en équilibre dynamique. Et, ces sols peuvent être caractérisés selon la profondeur, la densité, la perméabilité, la stabilité structurale, le pH et capacité d'échange en cation (De Graaf, 1993). Pour cette étude, les observations sur terrain sont basées sur l'évaluation de l'épaisseur de la couche arable, la perméabilité, la facilité de travailler le sol et les espèces cultivées au fur et à mesure de sa régénération.

4. Résultats et discussions

Compte tenu de la méthodologie adoptée, les résultats de cette étude sont plus qualitatifs que quantitatifs. Les observations sont associées au savoir-faire spécifique des paysans pour évaluer et pour développer des techniques d'exploitation agricole axées sur une utilisation durable.

4.1 Caractéristiques générales des espèces utilisées

Au départ du projet de restauration de la fertilité des sols, les techniques adoptées sont sensées améliorer la fertilité des sols par le biais des cultures en bande et des haies vives,.... Et, différentes espèces ont été utilisées. Des évaluations ont été faites à la fin du projet en fonction de l'adaptation des ces espèces sur les hauts plateaux. La synthèse est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 2 Les espèces utilisées lors des aménagements des BV

Espèces	Type	Utilisation	Adaptation	Observation
<i>Brachiaria arrecta</i>	Graminées	Espèces fourragères (BF)	+	Espèce locale
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	Graminées	Bandes fourragères	+++	Espèce exotique (EE)
<i>Chloris gayana</i>	Graminées	Bandes fourragères	++	EE
<i>Pennisetum purpureum</i>	Graminées	BF et diguettes	+++	Kisozi (EE)
<i>Setaria sphacelata</i>	Graminées	BF et diguettes	++	Nandi (EE)
<i>Tephrosia candida</i>	Légumineuse arbustive	Bandes et haies (BH)	+++	Espèce exotique
<i>Tephrosia vogelii</i>	Légumineuse arbustive	Bandes et haies (BH)	+++	Espèce exotique
<i>Tripsacum laxum</i>	Graminées	BF et diguettes	+++	Espèce exotique
<i>Vetiveria zizanoïdes</i>	Graminées	Diguette	++	Espèce exotique
<i>Albizia falcataria</i>	Légumineuses arbustives	Bandes et haies (BH)	+++	Espèce exotique
<i>Cajanus cajan</i>	Légumineuses arbustives	Haies	+++	Espèce exotique
<i>Calliandra calothyrsus</i>	Légumineuses arbustives	Bandes et haies	++	Espèce exotique
<i>Flemingia congesta</i>	Légumineuses arbustives	Bandes et haies	+++	Espèce exotique
<i>Glyricidia sepium</i>	Légumineuses arbustives	Bandes et haies	+++	Espèce exotique
<i>Leucaena diversifolia</i>	Légumineuses arbustives	Bandes et haies	++	Espèce exotique
<i>Desmodium intortum</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	+++	Espèce exotique
<i>Glycine javanica</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	+	Espèce exotique
<i>Lotonis bainesii</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	++	Espèce exotique
<i>Macroptilium atropurpureus</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	+++	Espèce exotique
<i>Stylosanthes hamata</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	+++	Espèce exotique
<i>Cassia rotundus</i>	Légumineuses herbacées	Bandes fourragères	+++	Espèce exotique

+++ : Très bien adaptée ++ : Adaptée + : Très peu adaptée

Photo 1 Culture en terrasse de *Pennisetum purpureum* entre les haies vives de *Vetivera zizanoïdes*.



4. Techniques de GCES

En fonction des résultats obtenus et après une dizaine d'années de cultures (sans attendre même les évaluations du projet) les espèces adoptées par les paysans sont : *Brachiaria arecta*, *Brachiaria ruziziensis*, *Pennisetum purpureum*, *Tephrosia vogelii*, *Vetiveria zizanoïdes*, *Flemengia congesta* et *Cajanus cajan*.

Ces espèces ont été utilisées en alternance avec des cultures vivrières dont les haricots, les patates douces, les maniocs, les brèdes pour les cinq premières années de cultures. Plus tard, quand le sol est devenu plus meuble, les paysans ont introduit d'autres cultures dont les taros, les laitues (sur les bas de pente) et l'avoine. Entre ces cultures, des cannes à sucre sont aussi fréquemment cultivées. Il est à noter qu'au départ, une formation poussée a été donnée aux paysans. Cette formation a été simplifiée pour pouvoir insérer aisément les nouvelles techniques avec les pratiques culturelles des paysans. Pour la récupération des espaces, des cultures en terrasses et suivant les courbes de niveau ont été pratiquées.

4.2 -Effets attendus au niveau du bassin versant

Lors de la mise en place des projets bassin versant, l'objectif général du Gouvernement dans le domaine de la foresterie et de la conservation du patrimoine écologique est de « satisfaire les besoins intérieurs en bois et à dégager un surplus exportable et à assurer la protection des facteurs de production que sont le climat et le sol » (DGEF, sans date). Cet objectif général est ainsi associé aux objectifs des paysans de récupérer des terrains dégradés, en d'autres termes de régénérer la fertilité des sols, tout en augmentant les sources de revenus.

Régénération de la fertilité des sols

Les sols dans le bassin versant au départ étaient squelettiques. Les espèces légumineuses (cf. tableau 2) cultivées sont connues pour leur qualité d'amélioration de la « santé des sols » en prenant en considération les directives pour la préparation des sols avant chaque culture vivrière.

Ces directives ont de multiples objectifs entre autres :

- nettoyage des sols par enfouissement de la biomasse des végétations légumineuses plantées en haies vives ou plantées entre les haies ;
- enfouissement de la matière organique ;
- restitution au sol des éléments minéraux contenus dans les résidus de récolte ou l'engrais vert ;
- lutte contre les mauvaises herbes ;
- amélioration de la circulation de l'eau et des micro-organismes dans le sol.

Photo 2. Parcelles de cultures après régénération des sols (les techniques de captages de l'eau continue).



Restauration des fonctions du bassin versant

Au départ des opérations, le bassin versant était presque dénudé comme la majorité des espaces rencontrés dans le bassin versant. En plus de la faible productivité des sols, l'eau des sources était tarie. De ce fait, une des fonctions attendues du bassin versant est le captage des eaux de pluies et l'alimentation en eau de la nappe phréatique dans le bassin versant.

Photo 3. Fonction de régénération des eaux de nappe du bassin versant : les eaux de source sont utilisées par les riverains.



Apport alimentaire et augmentation des sources de revenus

Les productivités des sols sont très faibles quelle que soit la culture pratiquée. A l'exemple des maniocs, si la moyenne dans la région varie de 5,8 à 6,8 t/ha d'après les statistiques agricoles (UPDR,2001), la productivité à l'hectare dans le bassin versant est largement inférieure. Elle était d'après les paysans entre 2 et 3 t à l'hectare. Les récoltes des cultures vivrières constituaient ainsi un apport alimentaire essentiel. En fait, elles compensent les productions de riz insuffisantes à cause de la superficie réduite des rizières.

Au fur et à mesure de la régénération des sols, les récoltes sont devenues importantes. Les surplus furent ainsi vendus et constituent de nouvelles sources de revenus. De plus, d'autres paysans et des associations diverses se sont intéressés à acheter des graines de *Tephrosia spp* et des boutures de *Vetivera spp*. Ainsi, en plus des bienfaits de la régénération des sols, les espèces plantées pour l'amélioration de la qualité des sols sont devenues des sources importantes de revenus.

Exploitation intégrée de l'espace

Au cours des dix années de cultures pour la régénération des sols, les paysans ont tiré de nombreux bénéfices de l'exploitation de l'espace. Au fur et à mesure donc de l'augmentation des sources de revenus, certains ont pu s'investir dans l'élevage des bovins. Au départ, cet élevage a surtout été fait pour l'obtention des fumiers de ferme utilisés en parallèle avec la biomasse des légumineuses pour restaurer la santé des sols. Actuellement une extension de cet élevage a été faite et, nombreux sont ceux qui se lancent dans l'élevage des vaches laitières. Pour l'exploitant direct du bassin versant, l'exploitation de l'espace se fait ainsi de manière intégrée et complémentaire.

4.3. Critères d'évaluation de la régénération des sols

À la lumière de leur vécu quotidien, les critères d'évaluation de la régénération des sols adoptés par les paysans sont restés simples. Il s'agit ainsi de voir la couleur, l'épaisseur du sol et sa structure (meuble ou non).

L'évaluation de la régénération des sols par sa couleur est assez subjective étant donné les différentes appréciations. De plus, il a été constaté que cette couleur varie aussi en fonction des pentes et du degré d'humidité des sols. Il a été toutefois admis que cette couleur tend à devenir plus foncée à mesure de sa régénération.

Les deux autres critères, épaisseur du sol et sa plasticité vont souvent ensemble. Le sol s'épaissit au fur et à mesure qu'il est régénéré et résiste mieux à l'érosion. Et, la qualité de la structure des sols augmente proportionnellement avec son épaisseur.

5. Conclusion

Au départ, les techniques de régénération de la fertilité des sols ont été dirigées par les techniciens des projets et de l'État avec la participation et la bonne volonté des paysans. Il est certes vrai que la motivation des paysans au départ lais-

sait à désirer même s'il est déjà connu que les sols sont pauvres. En effet, pour la province d'Antananarivo en général les potentialités en sols sont limitées, environ plus de la moitié de la superficie de la région est constituée de sols ferrallitiques lessivés. Pour la sous-préfecture de Miarinarivo seuls 18,8 % des sols sont déclarés sols cultivables par la direction interrégionale de l'Agriculture à Antananarivo (UPDR, 2001).

À l'exemple de l'aménagement du bassin versant à Miarinarivo, l'augmentation des récoltes et l'amélioration de la santé des sols ont constitué des leviers pour redonner espoir aux paysans quant à la possibilité de l'exploitation au maximum et de la valeur de leur espace de vie. De plus, les techniques utilisées étaient simples, facilement compréhensibles et donc à la portée de tous. Les efforts ont été concentrés au niveau d'un bassin versant choisi comme modèle. Plus tard, plusieurs paysans se sont associés et ont constitué une association pour l'aménagement des bassins versants dans la région de Miarinarivo. La réussite de la régénération des sols a ainsi fait un effet tâche d'huile dans cette zone. Il est ainsi attendu qu'avec un effort continu, les espaces de savanes occupant la majeure partie du paysage de Miarinarivo sera exploité à la manière de ce bassin versant. De ce fait, la superficie des sols cultivables va augmenter grâce à la régénération des sols.

Références bibliographiques

- ACTON, D. F., GREGORICH, L. J., 1995, La santé de nos sols. Vers une agriculture durable au Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada, service national d'information sur les terres et les eaux, <http://www.agr.gc.ca>
- DE GRAAF, J., 1993, *Soil conservation and sustainable land use. An economic approach.*
- DGEF, sans date, rapport interne, *Cadre de formulation du Projet pour le PNUD,*
- KOECHLIN, J., GUILLAUMET, J. L., MORAT, P., 1974, *Flore et Végétation de Madagascar*, J. Cramer, Vaduz.
- PNUD/FAO, 1992, *Projet de restauration et Aménagement de quatre bassins versants*, MAG/88/032, rapport de la mission d'évaluation
- RASOLOFOHARIVONY, G., 1991, *Étude de l'occupation du sol dans les bassins versant de Miarinarivo.* SPEF, rapport d'activités
- UPDR (Unité de politique pour le développement rural), 2001, monographie de la région d'Antananarivo, ministère de l'Agriculture.

L'utilisation systématique du vétiver pour la protection du chemin de fer FCE (Madagascar)

**JEANS RANDRIAMANANTSOA, FENOMANANA RAHELISOA, ETIENNE
RAZAFINDRABOTO, MAMY FIDÉLIS RAKOTOARIVELO,
LALA RANDRIANASOLO**

Projet FCER, composante communautaire, immeuble Tranon'ny Trondro,
2^e étage, Anjoma Fianarantsoa 301,
Tél. : +261 (20) 75 507 02 / 75 507 03 ; Fax : +261 (20) 75 507 09 ; GSM : 033 11 423 18
Courriel : KSF@chemonics.mg

1. Contexte

En l'espace de deux semaines en 2000, deux cyclones Eline et Gloria ont fait des ravages dans la province de Fianarantsoa, notamment sur la ligne ferroviaire FCE, déposant plus de 150 000 m³ de terre sur la plate-forme et provoquant 8 brèches sérieuses. En analysant la cause de ces dégâts si graves au début des interventions de la réouverture de la ligne, deux problèmes principaux ont été identifiés :

- les pratiques culturelles des paysans riverains qui font de l'exploitation agricole (rotation de manioc / riz sur brûlis) sur les talus de fortes pentes. Ces cultures, récoltées avant la saison pluvieuse, laissent les terres nues pendant la saison cyclonique, une situation qui contribue à des glissements de terre et à des éboulements ;
- les systèmes de drainage le long de la ligne n'ont pas été entretenus pendant presque 20 ans et étaient souvent presque non fonctionnels.

2. Les objets principaux de l'intervention sont donc de :

- stabiliser les talus toujours vulnérables,
- éviter ou réduire les érosions et ses effets néfastes,
- assurer que les paysans gagneront les mêmes ou plus de revenus monétaires par rapport à ce qu'ils gagnaient auparavant.

3. Stratégies adoptées

- D'une façon participative, impliquer les paysans riverains exploitants et locataires du patrimoine foncier de la FCE dans l'adoption du système antiérosif et économiquement rentable associant le vétiver et les arbres fruitiers pérennes
- Systématiquement, conforter les points noirs et les systèmes de drainage avec du vétiver

4. Étapes des activités d'aménagement

- Identifier des leaders paysans assurant le relais entre le projet et l'accompagnement des paysans riverains
- Identifier les points fragiles à protéger, et le paysan propriétaire de la parcelle
- Régulariser le statut foncier des paysans avec la FCE et définir clairement les droits et les responsabilités des deux parties.
- Quantifier les besoins en matériels végétaux et intrants nécessaires pour la campagne
- Former les paysans sur les technicités du vétiver et de l'arboriculture fruitière ainsi que les entretiens nécessaires tout au long de la production
- Accompagner les paysans grâce à la présence en permanence des animateurs sur terrain pendant les moments forts de la mise en place du système adopté
- Faire des suivis *in situ* à chaque étape réalisée par les paysans
- Assurer l'acheminement et la distribution de ces matériels aux paysans

5. Organisation et mise en place des actions pérennes

- Partage de responsabilité : les paysans assurent la main-d'œuvre et le projet assure l'approvisionnement en matériels et intrants ainsi que l'assistance technique
- La planification des travaux doit suivre le calendrier climatique de la région et la disponibilité des paysans par rapport à ses activités agricoles,
- L'approvisionnement en matériels végétaux doit être assuré (1), les vétivers par le remboursement de la part des anciens paysans, (2) les plantules d'arbres produits localement par les animateurs,
- Les paysans voisins contractent avec la FCE et assurent les entretiens des vétivers plantés sur les points noirs, tout en bénéficiant les sous-produits (feuilles) des vétivers,

6. Résultats

- Résultats quantitatifs des cinq premières campagnes (cf. tableau 1).

7. Impacts des actions

- Impact sur la protection des talus (cf. tableau 2).

	1 ^{ère} (2000)	2 ^{ème} (2001)	3 ^{ème} (2002)	4 ^{ème} (2003)	5 ^{ème} (2004)	Total
Nombre de paysans	95	158	195	157	155	760
Zone d'intervention	PK 33 au 123	PK 33 au 123	PK 28 au 128	PK 28 au 128	PK 28 au 128	
Vétivers plantés	350 000	840 000	1 022 000	744 000	574 000	3.530.000
Achat de vétivers	100%	70%	20%	0	0	
Remboursement des anciens paysans	0	30%	80%	100%	100%	
Arbres et épices plantées	2 960	6 937	8 523	6 050	5 630	30.100
Arbres et épices produites localement	0	2 668	8 523	6 050	5 630	
Arbres et épices achetés	2 960	4 269	0	0	0	

Tableau 2

	Cyclones Éline/Gloria 2 passages (février/mars 2000)	Cyclone Elita 2 passages janvier/février 2004)
Eboulements	280 éboulements : 150 000 m ³ de terre	24 éboulements : 300 m ³ de terre
Fermeture de la ligne	3 mois	3 jours
Réouverture de la ligne	\$300 000 financé par les bailleurs	Financé par la FCE sans recours à l'aide extérieure

Impact sur les paysans participants :

Les paysans constatent la stabilité de leurs parcelles de culture, la restauration de la fertilité du sol grâce au paillage fréquent avec les feuilles de vétivers, le gain d'argent grâce à la vente des éclats de vétivers auprès des demandeurs, mais surtout la continuité de la circulation du train et tous les bienfaits qui s'en suit.

Mots clefs : Infrastructure de transport, érosion, protection des talus vulnérables, vétivers, participation locale.

Les dégâts cycloniques sur la ligne ferroviaire FCE et les effets agressifs de l'érosion hydrique, 280 éboulements entraînant 150 000 m³ de terre et 8 brèches sérieuses



Des travaux de confortement et de talutage des points noirs, dans un premier temps...



Et l'implication systématique de la population riveraine dans la protection des talus



L'érosion en *lavaka* et leurs utilisations par les paysans du terroir d'Ampasimbe, Madagascar

NICOLAS ANDRIAMAMPIANINA

DRFP-FOFIFA, B. P. 904, Antananarivo, Madagascar
Tél. : +261 33 11 865 41; Courriel : nico_wlm@yahoo.fr

1. 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 physicochimiques 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 culture grâce à la récupération des terres érodées.

2. 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*. 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.

2.1. 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.

2.2. 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 ouvrages 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* partiellement et 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.

3. 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.

3.1. 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.

3.2. Les conditions d'utilisation

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 gonflant et desséchant.

Le taux de matière organique des sols dans les fonds des anciens *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.

3.3. 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 granite 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 revenus entre 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.

3.4. 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 voie d'issue à l'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.

5. Conclusion

La récupération des sols érodés 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. 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.

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 culturelle d'alternative à une dynamique de dégradation des ressources naturelles.

Références bibliographiques

ANDRIAMAMPIANINANA, 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, établissement d'enseignement supérieur des lettres, UER Géographie, 167 pp.

ANDRIAMAMPIANINANA, N., 1988, « Les *lavaka* malgaches : leur dynamique érosive et leur stabilisation », in *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 »,

4. Techniques de GCES

tanananarive, 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 du Conservation International, 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 », Antananarivo, FOFIFA, ORSTOM, CIRAD, 13 pp.

KUNKLE, S. H., THAMES, J. L., (édit.), 1980, *Techniques hydrologique de conservation des terres et des eaux en montagnes*, « Cahier FAO » n°2, 12 articles, 121 pp., Rome

BERTON, S., 1988, La Maîtrise des crues dans les bas-fonds : petits et micro barrages en Afrique de l'Ouest, dossier n° 12, « Le point sur », Coopération française, GRET, ACCT, AFVP, 474 pp.

HOEBLICH, J., J.M., 1983, « L'organisation du relief dans les environs de Tananarive » *Madagascar Revue de Géographie* n° 43, juil.-déc., pp.10-39, Antananarivo

LAL, R., RUSSEL, E. W., 1981, *Tropical Agricultural Hydrology - Watershed Management and Land Use*, 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, Université de 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 », *Bull. Ass. Géogr. franç.*, n° 332-333, Paris

5.
Diagnostic du risque
et prise en compte
des contraintes paysannes

Action concertée de lutte contre l'érosion des sols à la Réunion

A. HÉBERT, G. BENOIT, D. GROENÉ

Courriel : apr.mah@wanadoo.fr

1. Le milieu

Île volcanique en forme d'ellipse, d'axes 72 km et 51 km, de 2 512 km² de superficie, isolée par 21° de latitude sud à 800 km à l'Est de Madagascar, la Réunion, département français d'outre-mer, habitée depuis le XVII^e siècle, n'est connue que depuis le XVI^e siècle.

Le climat est déterminé par le régime des alizés du sud-est et par l'altitude qui culmine en deux points, à 3 070 mètres au Piton des Neiges, volcan éteint, et à 2 632 mètres au Piton de la Fournaise, en activité. Ce relief gigantesque est cloisonné en multiples unités et presque autant de microclimats qui vont du tropical humide au tempéré froid. Il tombe 5 mètres d'eau et plus sur la côte au vent (on a mesuré jusqu'à 18 m d'eau en 1993) et 750 mm sur la côte sous le vent (mais avec plus de huit mois de sécheresse). Le relief et le climat accroissent l'efficacité destructrice des cyclones tropicaux. Les ravines et les lignes de crête accentuent encore les difficultés de communication d'un bassin versant à un autre.

La densité de la population a cru pendant trois siècles en même temps que sa diversité ethnique et culturelle pour atteindre 700 000 habitants en 2 000. La densité moyenne est élevée, 280 hab./km², mais la concentration de l'habitat et des activités humaines est en réalité très inégale : environ 100 000 ha sont inhabités et sont constitués de forêts ou de pentes rocheuses (zone domaniale) et à l'inverse, la zone littorale, jusque vers 400 ou 500 m d'altitude concentre l'essentiel de la population.

On observe plus généralement un étagement lié en grande partie à la climatologie (températures et précipitations) qui se traduit par des paysages successifs en fonction de l'altitude : ainsi à titre d'exemple la planèze de l'ouest présente une frange littorale fortement urbanisée avec un récif corallien, une savane actuellement entamée par l'urbanisation et dont une partie est en cours d'irrigation, puis vers 400 m la canne à sucre avec des zones habitées (correspondant aux villages qui se sont créés autour des sucreries), ensuite à partir de 800 m des cultures de géranium et de diversification, puis vers 1 000 m débute l'élevage et vers 1 500 apparaît la forêt, qui laisse sa place à des pentes rocheuses nues vers 1 800 m.

L'ensemble de ces caractéristiques conduisent à une typologie des bassins ver-

sants extrêmement variée, tant sur un plan physique qu'humain.

Les paysages forgés par l'homme sont fortement marqués par l'urbanisation et l'agriculture : il s'agit d'un territoire mixte où se mêlent ces deux composantes. L'histoire qui a été quelquefois tragique (l'abolition de l'esclavage ne date que 1848), a fortement marqué la société réunionnaise globalement et au de travers chacune de ses composantes. L'île entièrement couvertes de forêts il y a quatre siècles, a connu successivement une exploitation du bois (marine, charpente puis chemin de fer) associée à des cultures vivrières, puis des cultures d'exportation (café, girofle, puis à partir de 1810, la canne à sucre qui demeure jusqu'à maintenant) et actuellement un développement de filières de production destinées à la consommation locale (filières animales très structurées et filières végétales également dynamiques). Le système foncier, fondé à l'origine sur la concession découpée verticalement (du « battant des lames au sommet des montagnes »), a évolué vers la propriété mais aussi un système de métayage spécifique de l'île, le colonat partiaire peu favorable aux améliorations foncières qui disparaît progressivement au bénéfice du fermage. Néanmoins une grande partie des exploitations actuelles sont en faire valoir direct (action de restructuration très importante conduite par la SAFER depuis 1966), ce qui a conduit également à une augmentation de la surface moyenne des exploitations (de l'ordre de 5,4 ha pour un peu moins de 11 000 exploitations, en 1997).

Une dernière composante de la Réunion, est le contexte économique et social actuel. Avec une démographie encore très importante et un dynamisme économique remarquable, la situation sociale est tendue : le taux chômage est de 37 %, des conflits et une certaine insécurité apparaissent dans certains quartiers (urbains ou non) qui justifient la mise en place d'outils de développement (politique de la Ville) « inventés » dans les cités des banlieues françaises.

2. Stratégie pour une action concertée de lutte contre l'érosion des sols (ACLES)

L'érosion a, à la Réunion, du fait des particularités précédentes, un caractère extrême, inéluctable (à l'échelle géologique) mais malheureusement accélérée de manière exponentielle par les activités humaines et se manifestant sous toutes les formes : effondrements, glissements, ravinements et érosion superficielle. On estime que la quantité de matériaux ainsi transportée atteint 3 000 t/km²/an mais les mesures faites dans des situations sensibles montrent que l'on dépasse fréquemment plusieurs centaines de tonnes à l'hectare (terrains labourés, cultures peu couvrantes, imperméabilisation et concentration des eaux pluviales, surcharge de zones instables...). Les activités humaines ont en effet amplifié les risques d'érosion sans qu'un réflexe de protection suffisant ne se manifeste, comme ce fut le cas dans d'autres régions de civilisation agraire ancienne. Les enjeux de la lutte contre l'érosion sont la protection des personnes et des biens (sécurité des habitants, coût des équipements et des infrastructures détruits), mais aussi la pérennité des activités économiques (en particulier l'agriculture dont l'outil de tra-

vail est fortement mis en péril, dans un contexte où beaucoup de jeunes ou moins jeunes attendent de la terre un travail) et enfin la protection de l'environnement en tant que patrimoine commun (envasement du lagon). Du fait de la démographie de la Réunion, le foncier est très convoité (et il le sera de plus en plus) ce qui conduit à construire ou à mettre en valeur des terrains sensibles à l'érosion voire dangereux.

En 1988, à l'initiative du commissaire à l'aménagement des Hauts de la Réunion, à l'époque Guillaume Benoit, une mission menée par un agent du CIRAD-Forêts, Denis Groene, a défini, en collaboration avec les agriculteurs, leurs organisations professionnelles, les administrations et les instituts de recherche concernés, les grandes lignes d'une stratégie de lutte contre l'érosion des sols agricoles, qui depuis cette date a été mise en œuvre par l'ACLES, animée par Alain Hebert.

Un programme d'actions formulait, pour le court terme (quelques années) et pour le long terme (dix à vingt ans) des propositions adaptées aux conditions réunionnaises et aux différents publics : agriculteurs, formateurs ou techniciens du développement agricole, chercheurs ou détenteurs de connaissances sur le sujet, agents des administrations, et enfin les réunionnais dans leur ensemble insulaire. Ces propositions ont été largement diffusées dans l'île dans divers milieux ciblés, sous la forme d'un livret préfacé par le préfet de région et le président du conseil régional et illustré de photos significatives.

3. L'exemple des Opérations locales d'aménagement de terroir (OLAT)

Parmi les actions proposées en 1988, l'une d'entre elles semble pouvoir faire l'objet d'un commentaire particulier. Il s'agit des OLAT : ce sont de petites opérations d'aménagement qui consistent à aider des groupes d'agriculteurs voisins (10 à 20 exploitations sur quelques dizaines voire une centaine d'hectares) à aménager leur terroir.

Le diagnostic qui a conduit à imaginer cet outil était le suivant :

- * la préservation des sols agricoles est un enjeu quelquefois difficile à appréhender : en effet sauf après un cyclone ou un violent orage, l'érosion n'est pas spectaculaire et ne devient pas une préoccupation immédiate des agriculteurs. D'autres problèmes paraissent plus urgents à résoudre ;

- * la prise en compte de l'érosion prend d'autant plus de sens que l'exploitation est devenue performante ;

- * la problématique a souvent une dimension collective (cela dépasse rapidement la parcelle et doit s'analyser au moins à l'échelle d'un petit bassin versant) entre plusieurs agriculteurs.

L'idée de départ des OLAT était donc d'essayer de tenir compte de ces éléments et de mettre en œuvre des actions visant une intervention à plusieurs niveaux :

- * s'assurer d'une participation active des agriculteurs concernés grâce à une démarche d'animation s'appuyant sur la réflexion des agriculteurs eux-mêmes sur les problèmes qu'ils rencontrent, s'appuyant également sur leur propres pistes de solution et enfin par la concrétisation des solutions sous une maîtrise d'ouvrage

associative (quand cela est possible mais l'existence d'une association a de toute façon l'avantage de créer un lieu de discussion, même s'il est quelquefois « tendu ») ;

* la mise en œuvre de formations actions (conduites sur le terrain) qui aident le groupe à conduire ces étapes, à acquérir de l'autonomie mais aussi bien sûr à renforcer les compétences quand cela paraît nécessaire ;

* la mobilisation des outils financiers existant pour mettre en œuvre les solutions : les premières actions ne concerneront sans doute pas l'érosion mais plutôt l'amélioration de chemins, la mobilisation de ressources en eau, la restauration ou le maintien de la fertilité ;

* l'échelle de l'OLAT reste à taille humaine mais doit permettre d'envisager des solutions réelles : un bassin versant complet serait beaucoup trop grand, mais une petite zone de quelques exploitations permet d'envisager des solutions ;

* et enfin s'agissant d'une démarche complexe, expérimentale et qui nécessite des travaux souvent importants, une aide financière significative est apportée (État, région puis Union européenne depuis 1994).

3.1. Résultats

Les résultats de ce type d'opérations sont actuellement les suivants :

À la fin de 1999, 18 OLAT sont en cours, et concernent 250 agriculteurs et 1 200 hectares environ. Grâce à une démarche globale qui peut durer plusieurs années, les agriculteurs envisagent puis mettent en œuvre progressivement des solutions aux problèmes qu'ils rencontrent ; la lutte contre l'érosion peut ainsi être intégrée dans l'exploitation (la mise en place d'un système plus performant, incite d'ailleurs l'agriculteur à le préserver et en particulier à lutter contre l'érosion). Mais pour espérer ce résultat, il est nécessaire que les groupes avancent à leur rythme, avec l'appui de la formation, sans négliger des efforts en parallèle portant sur la recherche d'alternatives (les meilleures solutions sont quelquefois celles qui restent encore à inventer !).

Les actions réalisées représentent un coût total de 11 600 000 francs soit 9 650 francs par hectare et 46 000 francs par agriculteur, que l'on peut répartir entre des travaux de voirie ou de gestion des eaux pluviales (65 %), de mobilisation de ressources en eau (32 %) et des travaux concernant la fertilité des sols et des défrichements prudents (3 %).

Les résultats concernant les opérations les plus anciennes (pour lesquelles il est possible d'avoir plus de recul) montrent que, malgré des difficultés tant techniques (une approche globale est complexe) qu'humaines (la gestion collective d'ouvrages peut s'avérer difficile), les agriculteurs ont amélioré leurs conditions d'exploitation et que les OLAT contribuent ainsi à aller vers une agriculture plus durable.

Cette démarche expérimentale est encourageante, mais elle a montré qu'il est nécessaire d'aller également vers des outils d'aménagement à une échelle plus grande dans lesquelles on cherchera à associer des problématiques différentes

(les différents systèmes agricoles, la forêt, les zones habitées, les infrastructures...). Certaines OLAT ont été concernées par plusieurs de ces problématiques mais il est apparu rapidement que l'on était démuné d'outils (tant méthodologiques pour faire travailler ensemble des métiers différents, que techniques du type aide à la décision pour les techniciens) : c'est l'étape nouvelle qui est actuellement envisagée, sans pour autant faire l'impasse sur la forme initiale des OLAT.

3.2. D'autres actions menées dans l'ACLES et une stratégie à construire chemin faisant

Toujours au niveau local mais en zone de montagne très enclavée, sont menés sous la direction d'une association maître d'ouvrage (Association pour la protection des sols de Grand Ilet, regroupant les propriétaires concernés) et de l'Office national des forêts (ONF) avec le concours du Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM) et des bureaux d'études nationaux, des travaux lourds de protection des habitants en des lieux présentant des dangers collectifs et immédiats ; une approche à l'échelle du bassin versant y a également été initiée.

Sur un plan plus général, des actions de formation et de sensibilisation de tous les acteurs concernés préparent de futures actions et l'évolution des mentalités. Plus de 1 000 agriculteurs, près de 300 ouvriers, techniciens et aménageurs, environ 400 scolaires et enseignants ont été sensibilisés grâce à des supports audio-visuels réalisés spécifiquement (ainsi que des documents de références techniques capitalisant les connaissances sur l'érosion à la Réunion). Un schéma directeur de lutte contre l'érosion est actuellement en cours d'élaboration (comportant une note stratégique, un guide technique pluridisciplinaire et un outil d'aide à la décision de type SIG).

La formation aide à faire comprendre le phénomène de l'érosion, à mesurer l'enjeu de la lutte contre l'érosion et à aider à mettre en œuvre des solutions adaptées aux contextes de chacun. Ainsi pour les agriculteurs, d'autres contraintes sont jugées plus immédiates. Les techniques de lutte contre l'érosion les plus appréciées sont alors celles qui, en plus de l'érosion, associent par exemple l'agroforesterie (production), les aménagements de voirie (accès), les fourrages antiérosifs (élevage), le besoin en matière organique (production), le défrichement et le travail du sol prudent (fertilité), ou les couvertures mortes ou vives (diminution des temps de travaux).

Enfin il est essentiel que tous les acteurs concernés se mobilisent, chacun dans son domaine mais de manière partenariale. C'est aussi un des objectifs de l'équipe de l'ACLES, actuellement composée de 3 personnes portées par l'Association pour la promotion en milieu rural (APR). On citera en particulier le monde agricole (chambre d'agriculture, SAFER, CIRAD, formation initiale et continue...), l'ONF, le BRGM, l'université, les entreprises de travaux et maîtres d'œuvres, le Parc marin, l'Office réunionnais de l'eau, mais aussi bien sûr les services de l'État (DAF, DIREN, DDE...) et les collectivités locales et les institutions visant la concertation sur des problématiques proches (Comité de bassin...). Ainsi la charte de l'Environnement

(1996) affiche l'importance de l'enjeu, puisque l'un des 4 thèmes est consacré à l'érosion, complétant les orientations prises en 1988 par de nouvelles actions et suscitant d'agir avec encore plus d'ambition, compte tenu des enjeux de maintenir à la Réunion, un très fragile équilibre entre les besoins de développement des hommes et le souci de protéger le milieu naturel et patrimoine des générations futures.

ACLES : Action concertée pour la lutte contre l'érosion des sols

APR : Association pour la promotion en milieu rural

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CIRAD : Centre de coopération internationale pour la recherche agronomique et le développement

DAF : Direction de l'agriculture et de la forêt

DDE : Direction départementale de l'équipement

DIREN : Direction régionale de l'environnement

OLAT : Opération locale d'aménagement de terroir

ONF : Office nationale des forêts

SAFER : Société d'aménagement foncier et d'établissement rural

Étude de l'impact de l'érosion côtière sur l'état de santé des récifs coralliens à Itsamia Moheli Comores

SAID AHAMADA

Association d'intervention pour le développement et l'environnement
B. P. 1545, Moroni, Comores, Tél. : +269 334349
Courriel : ahamadas@yahoo.com

Résumé

La déforestation massive et l'exploitation excessive des matériaux côtiers (co-raux , sable et galets) aux Comores ont engendré une double agression de la zone côtière. Les apports terrigènes transportés par le ruissellement des eaux et la transgression de la mer ont entraîné une fragilisation des côtes, une modification de son rôle de zone tampon et la destruction des récifs coralliens.

L'île de Mohéli, la plus ancienne et la plus érodée de l'Union des Comores est beaucoup plus touchée par cette problématique.

Les pays membres de la commission de l'océan Indien connaissent des problèmes presque similaires de dégradation généralisée des zones côtières et ont ainsi mis en place un programme régional de gestion intégrée de ces zones de 1995 à 2000.

Des outils méthodologiques parmi les quels COREMO, une base de données de suivi des récifs coralliens, ont été développés afin de pouvoir mieux appréhender cette problématique et de proposer des solutions adaptées.

Cet outil a permis de comparer l'état de santé du récif de deux stations du même site du village d'Itsamia au sud-ouest de l'île de Mohéli. Un transect de 60 m sur les catégories benthiques est effectué sur chaque station et les données collectées sont saisies et traitées sur la base de données COREMO. La première station (Itsamia) est sur la pente externe du récif en face du village recevant directement les apports terrigènes conduits par une rivière. La deuxième (Mchaco) est située un peu plus au large est éloigné de ces apports.

La comparaison des résultats a permis d'observer un taux de recouvrement corallien important de 63 % sur la station de Mchaco contre 34 % sur la pente externe d'Itsamia. On note aussi un important pourcentage des catégories indicatrices de la sédimentation terrigènes et de perturbation de l'équilibre écologique sur la deuxième station. Une action de lutte contre ce phénomène d'érosion de la côte de ce site est en cours de conception.

Mots clés : Érosion ; zone côtière ; récifs coralliens ; sédimentation ; apports terrigènes, COREMO

Références bibliographiques

AHAMADA, S., *et al.*, 2004, *Status of Coral Reef of the South West Indian Ocean Islands States, Status of coral reef of the world*, volume I : 189-211

DGE, 1993, *Diagnostic de l'état de l'environnement aux Comores*

WILKINSON, C., 2002, *Status of Coral Reefs of the World*, Australian Institute of Marine Science

JAMAR, SOIMADOU, 1993, *Étude de faisabilité d'un parc marin de Nioumahoua*, Mohéli

QUOD, J-P., BIGOT, L., CONAND, C., CHABANET, P., 1998, *Manuel méthodologique sur le suivi de l'état de santé des récifs coralliens du sud-ouest de l'océan Indien*

TILOT, V., 1994, *Étude de l'environnement marin et côtier et des aspects socioéconomiques de la pêche autour de l'île de Mohéli*, rapport UICN programme marin et côtier, 80 pp.

Effet des systèmes de culture à base de manioc sur l'érosion des sols à Mayotte

**HOULAM CHAMSSIDINE, PATRICE AUTFRAY, ANGÈLE LEGALL,
JEAN BOZZA**

CIRAD, B. P. 1304, 97600, Mamoudzou, Mayotte
Courriels : houlam.chamssidine@cirad.fr ; bozza@cirad.fr

1. Le contexte

Depuis longtemps, les pédologues (Brouwers, 1973) qui ont étudié les sols de l'archipel des Comores, ont conclu à l'existence des problèmes d'érosion sur fortes pentes et ont proposé toute une série des mesures d'aménagement (Latrille E., Subreville G., 1977) telle que les terrasses, les murettes en pierre, etc. Malheureusement, ces propositions quoique fondées, n'ont pas été suivies par les paysans. En effet, ces derniers considèrent que ces techniques constituent un travail supplémentaire sans gain immédiat (pas d'augmentation de rendement). Pourtant, bon nombre de paysans se plaignent de la baisse de la fertilité des sols sur les cultures vivrières. Ils mettent au repos les parcelles fatiguées (courte jachère de deux à trois ans à cause de la pression foncière).

D'autres techniques (Autfray P., Houlam C., 2002) ont été également proposées, à savoir les couvertures végétales pour la remontée de la fertilité (chimique et biologique) sur manioc et réduire les risques de l'érosion, mais sans résultats probants.

À vrai dire, à Mayotte, l'érosion n'est pas ressentie comme une contrainte (il n'existe pas d'équivalent en langue mahoraise), aussi, n'existe-il pas de démarche volontaire de lutte contre l'érosion, à l'exception de murettes de pierres, mais dans un but d'accroître les surfaces de culture plus que pour lutter contre le ruissellement. On peut rappeler également le paillage du sol perçu plus comme économiseur d'eau que pour lutter contre le ruissellement, ou la plantation au trou sans labour généralisé dans une optique de réduction de la pénibilité du travail.

En général, on pratique des associations de culture (couvert permanent généralisé grâce aux cultures pérennes multiétages) en mosaïque dans un paysage forestier dense. De plus, la pluriactivité des agriculteurs ne leur permet pas de s'investir plus avant dans des pratiques antiérosives. Pourtant, on assiste actuellement à une prise de conscience de la baisse des productions qui n'arrivent plus à satisfaire les besoins des habitants (réduction de la taille des racines de manioc, diminution du nombre de mains sur les régimes de bananes).

Nous limiterons notre présentation à Petite Terre où plusieurs systèmes de culture cohabitent dont le système vivrier à base de manioc, le plus érosif. Notre zone d'étude concerne une zone périurbaine sur un îlot dont la pression démographique et urbaine est particulièrement forte (1884 hab./km²). Les parcelles de culture sont assez éloignées du domicile familial et plus ou moins difficilement accessibles. L'espace manque et les agriculteurs se déplacent sur des zones de plus en plus pentues. Les agriculteurs majoritairement pluriactifs disposent de peu de temps pour l'activité agricole (week end).

Le cas exposé ici concerne l'action menée en 2003-2004 en Petite Terre suite à la demande du Conservatoire du littoral concernant la protection des sites de pontes des tortues. Le cas de Petite Terre est intéressant par sa formation géologique de cendres volcaniques très sensibles à l'érosion (densité apparente inférieure à 1).

2. Enjeu et problématique de l'étude

Des usagers à concilier : le tourisme, l'agriculture, la préservation des écosystèmes et du paysage.

Problématique : la protection des sites de pontes des tortues marines potentiellement menacés par des apports terrigènes qui sembleraient provenir des parcelles cultivées en manioc.

3. Démarche

Pour répondre à la demande, le Cirad a entrepris deux études : la première, au niveau de la parcelle en croisant les contraintes socioéconomiques et les modes de culture par des mesures d'érosion grâce l'érodimètre différentiel à aiguilles, la deuxième, au niveau du paysage par un diagnostic morphopédologique.

Enfin, un diagnostic plus global (socio-agro-économique) a été réalisé grâce à des enquêtes parcelles (60) et enquêtes territoires (20) des différents acteurs de Petite Terre

4. Résultats : pratiques culturelles et érosion en Petite Terre

4.1 Les feux généralisés

On remarque dans la zone de grandes étendues marquées par la propagation des feux, notamment au-dessus de Moya et autour du lac Dziani. La pratique du brûlis généralisée laisse derrière elle de grandes étendues de sol nu qui peuvent être fortement érodées en saison des pluies.

4.2 Des pratiques culturelles diversifiées

La préparation du sol en vue de la plantation du manioc :

Des buttes sont réalisées pour planter les boutures de manioc. On recense différentes pratiques :

– travail du sol généralisé sur toute la parcelle ou localisé au trou de plantation ;

5. Diagnostic du risque et prise en compte des contraintes paysannes

- matériel utilisé varié : pic, houe, *chombo* ;
 - diversité des buttes depuis le billon isohypse jusqu'aux demi-lunes ;
 - taille variable des buttes (70 cm sur 50 cm avec une profondeur allant de 15 à 50 cm ;
 - étalement des dates de plantation de mi-septembre à la mi-décembre.
- Ceci a une forte influence sur la couverture du sol ainsi que sur le développement racinaire lors du début de la saison des pluies.

La gestion des adventices

Les résidus du défrichage sont placés en andains en bordure de parcelles, sur les murets en pierres quand ils existent et en tas aux pieds des arbres ou brûlés.

Au premier sarclage en début de saison des pluies, les adventices sont laissés sur le sol selon leur capacité de reprise et constituent une protection plus ou moins importante du sol.

Les aménagements effectués

Dans les zones où la pierrosité est importante, notamment à Matsozini, des murets de pierres (tuf) sont présents. Différents entretiens nous ont révélé qu'ils ont été réalisés, il y a une dizaine d'années, puis consolidés au fur et à mesure des saisons de culture. Ceux-ci sont des barrières potentiellement efficaces de lutte contre l'érosion.

Les parcelles sont parfois délimitées par des andains ou des haies, notamment de *Gliricidia sepium*. On retrouve cette plante surtout sur le coteau allant du bord de la route menant à La Vigie, orienté est ou nord-est. Cette dynamique est à approfondir dans une démarche de régularisation du foncier ainsi que dans la lutte contre l'érosion.

Les associations culturales

Le mode d'occupation du sol est très divers selon les situations : de la monoculture de manioc à une véritable gestion en agroforesterie. Ces différentes stratégies peuvent s'expliquer par différents facteurs, parmi lesquels : l'intérêt de la parcelle (cultures de vente ou à vocation d'alimentation familiale), les moyens humains et financiers à disposition, la situation foncière...

4.3 Bilan des pratiques observées

Pratiques positives	Pratiques négatives
Murets	Cailloux en tas
Billons isohypses	
Travail localisé du sol	Travail généralisé du sol
Plantation précoce du manioc	Plantation tardive du manioc
Paillage après buttage	Sol nu
Paillage au premier sarclage	Sol nu
Systèmes agro forestiers	Monoculture du manioc

5. Méthode :

5.1. Choix des parcelles d'étude

Après un premier diagnostic global de la zone, différents endroits ont été retenus comme prioritaires en terme d'actions de sensibilisation et d'estimation de l'érosion au niveau de la parcelle. Des dispositifs de mesures ont été installés dans plusieurs parcelles réparties dans différents sites.

- Papani/La Vigie, la pierrosité est très faible. Nous avons choisi trois parcelles sur pente forte, en bordure de falaise et en bordure de ravine. Elles sont toutes les trois cultivées en manioc.
- Matsozini, la pierrosité est importante. Deux parcelles en bord de falaise, sur pente forte ont été retenues et cultivées en manioc.

5.2. Matériel de mesures de l'érosion

Une méthode simple, peu précise mais robuste a été mise en place. Il s'agit de l'utilisation d'un érodimètre différentiel à aiguilles (EDA). Cinq mesures sont effectuées sur chaque parcelle. A chaque point de mesure, deux fers à béton sont installés. Entre ces deux piquets, une règle de maçon porte 10 cylindres dans lesquels vont coulisser des aiguilles. Les aiguilles sont descendues jusqu'au sol. L'état de surface du sol est renseigné par la hauteur de chaque aiguille.

Une série de mesures est effectuée en début de campagne et une autre après la saison des pluies. Des analyses de sol permettent de convertir les pertes en terre mesurées en quantité d'azote et de carbone perdues par hectare.

6. Discussions

Les résultats montrent des départs de terre variant de 115 à 2 t/ha/an en fonction principalement des modes de culture (2 et 3>1) et la pierrosité (forte> faible ou nulle), puis la préparation du sol (localisé > généralisé) et la couverture du sol (adventices), la pente et la date de plantation apparaissent moins discriminants.

Comme élément de comparaison, J.-B. Feret (2003) avec le même dispositif a mesuré des pertes en sol, de 30 et 120 t/ha sur deux parcelles de manioc (culture pure en manioc, pierrosité faible) sur sols ferrallitiques à Grande Terre (Mayotte).

L'importance des pertes en terre mesurées par rapport aux données rencontrées dans la littérature (M. Raunet 1992) semble confirmer la sensibilité à l'érosion des sols andiques de Petite Terre.

Tableau 1. Résultats des pertes en terre (t/ha/an), et en carbone et azote (kg/ha/an).

Sites	Pierrosité	pente	Dates de plantation	Préparation du sol	Gestion des adventices	Mode de culture *	Perte en terre (t/ha)	Densité apparente	Perte en kg/ha	
									C	N
Papani 2	Nulle	40 %	20 nov.	Généralisé	Non	1	114.4	0.62	890	70
La Vigie	Nulle	40 à 50%	1 ^{er} oct.	Généralisé	Faible	1	103.5	0.65	400	30
Papani 1	Nulle	40 à 60%	15 sept	Généralisé	Non	1	92.3	0.63	390	30
Papani3	Nulle	35%	1 ^{er} oct.	Localisé	Oui	1	79.5	0.63	409	33
fatsozini1	Faible	30%	1 ^{er} oct.	Localisé	Oui	3	19.2	0.71	124	11
fatsozini 2	Forte	0 à 30%	1 ^{er} oct.	Localisé	Oui	2	2.2	0.71	17	1

*Mode de culture

1 = Culture de manioc pure

2 = Culture de manioc pure avec renforcement du couvert arboré

3 = Culture à base de manioc avec cultures annuelles associées (arachide, cucurbitacées, patate douce)

Compte tenu de la sensibilité des sols andiques à l'érosion, nous préconisons l'usage de couverture du sol sous forme de cultures associées, gestion des adventices, maintien des pierres en surface et préparation du sol localisée.

À Mayotte, les manifestations d'érosion ne restent pas circonscrites aux seules parcelles cultivées comme le laissent suggérer les résultats rapportés ici. Généralement sur les parcelles, le contrôle du ruissellement suffit à réduire les pertes en terre. Les écoulements concentrés qui prennent naissance au niveau des sentiers de desserte des parcelles (zone rurale) ou au niveau de chaque toit en tôle (absence de gouttière) des habitations (zone urbaine) génèrent des flux terrigènes à chaque événement pluvieux et sont à prendre en considération dans la protection du lagon.

Parallèlement à cette pollution dont bien peu de gens se soucient, les écoulements génèrent des nuisances dans les « bas » (villages), débordement de caniveaux, inondations d'habitations, etc, qui sont subies comme une fatalité.

Ruissellements et écoulements s'affichent en termes négatifs du bilan hydrologique précaire de l'île face à une demande accrue en eau liée à la croissance de la démographie (5 %/an), mais aussi à son accès facilité (société mixte de distribution). Avant l'interconnexion, chaque commune avait en charge son propre réseau de distribution d'eau à partir de captages (seuils en béton) le long des *talwegs* drainant les terres communales. Depuis, une usine de dessalement d'eau de mer a été installée pour pallier toute pénurie.

7. Conclusion sur la méthode

L'érodimètre à aiguilles a permis de mettre au point une méthode simple, quantitative (voir la présentation de J.-M. Sarrailh) et facile à mettre en œuvre par rapport aux « parcelles d'érosion traditionnelles ». Cette méthode a donné des résul-

tats intéressants également sur *padza* et mangroves (J.-B. Feret, 2003).

L'érodimètre a permis d'uniformiser les mesures réalisées entre les différents services de protection de l'environnement à Mayotte et à l'île de la Réunion.

Son inconvénient réside dans le fait qu'il ne prend pas en compte les effets possibles du gonflement et du piétinement fortuit (ou entretien) du sol.

8. Conclusion générale de l'étude de Petite Terre

L'étude présentée ici correspond à une demande du CELRL sur son site de Petite Terre (Moya) présentant des risques potentiels d'apports terrigènes sur les sites de ponte des tortues marines liées aux pratiques de culture du manioc réputée érosive.

Les mesures au niveau parcelle ont mis en évidence l'importance du système de culture sur la production de flux terrigènes, des propositions de mesures respectueuses de l'environnement ont été présentées.

En complément des mesures à la parcelle, un diagnostic morphopédologique a été réalisé par Michel Raunet (2004) sur l'ensemble du site étudié.

Suite à ce diagnostic, il ressort que si l'érosion est bien présente au niveau parcelle, il n'en demeure pas moins que celle-ci n'est pas préjudiciable pour les sites de ponte des tortues (Raunet, 2004), permettant ainsi de concilier aujourd'hui les impératifs du CELRL avec les besoins des agriculteurs pluriactifs.

En effet « la seule arrivée de terre identifiée (sur la plage) se fait par le petit ravin creusé artificiellement et qui draine la piste automobile ».

Références bibliographiques

- ARRIVETS, 1998, *Culture de manioc et problèmes de fertilité des sols à Mayotte*, compte rendu de mission, DAF, CTM, CIRAD-CA, Montpellier, 49 pp.
- AUTFRAY, P., CHAMSSIDINE, H., 2002, *Amélioration des systèmes de culture et maîtrise de l'érosion*, Comité tripartite, DAF, CTM, CIRAD, 48 pp.
- BROUWERS, M., 1973, « Anjouan, y a-t-il encore un futur pour le milieu agricole ? » in *Rapport annuel 1972*, IRAT Comores
- FERET, J.-B., 2004, *Étude de l'érosion de trois types de zones sensibles lors de la saison des pluies à Mayotte*, 59 pp.
- LEGALL, A., 2004, *Activité agricole et gestion durable du patrimoine foncier du CELRL à Mayotte*, ENSAR, 3^e année, 68 pp. + annexes
- LATRILLE, Ed., SUBREVILLE G., 1977, *Exploitation agronomique des actes de l'inventaire des terres cultivables*, État comorien 322 pp.
- LATRILLE, Ed., 1981, *Inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales*, annexe, minute des descriptions de profils et des résultats d'analyse (non publiée), IRAT
- RAUNET, M., 1992, *Île de Mayotte, les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon*, Montpellier, CIRAD, 63 pp.
- RAUNET, M., 2004, *Site de Papani-Moya, Diagnostic morpho-pédologique*, Montpellier, CIRAD, 11 pp. + cartes

Pratiques paysannes et gestion conservatoire des terres cultivables aux Comores

MOHAMED ISSIMAILA, ISSOUF AMBADI, SELEMANE ISSA AHMED

Courriels : issimaila2002@yahoo.fr ; decvas@snpt.km

Introduction

L'Union des Comores couvre une superficie totale de 1 860 km². Les Comores présentent une grande diversité de sols, de climats et de végétations. Ses origines volcaniques confèrent au pays un relief tourmenté hérissé de pics et de cônes ne laissant que peu de place aux plaines réduites à des petits bassins et à des plates formes taillées dans la lave noire. Les superficies cultivables sont donc limitées, mais les sols dérivant de matériaux volcaniques sont cependant comme trait commun leur fertilité.

Les superficies disponibles pour les cultures deviennent de plus en plus restreintes à mesure de l'augmentation de la densité de la population. Les causes de cette diminution sont multiples : les défrichements massifs des terres à vocation non agricole (terres marginales) qui entraînent une perte accélérée de la fertilité, une érosion rapide accentuée par les pratiques culturales peu compatibles avec la fragilité du milieu et la mise en culture des versants en pente plus au moins fortes (remarquable à Anjouan) et enfin, une diminution du temps de jachère.

1. Phénomènes d'érosion aux Comores:

L'érosion est un phénomène complexe groupant un ensemble de facteurs physiques et humains. Ces derniers agissent en général en association.

L'ampleur des facteurs liés aux types de sols, pentes, et les techniques culturales caractérise l'état plus ou moins agressif de l'érosion.

On distingue trois types de sols :

1.1. Les Andosols :

De formation récente aussi bien sur coulée de lave ou d'autres matériaux, ils sont généralement peu épais. Ils sont moins érodibles que les autres sols, grâce à la perméabilité de l'horizon supérieur et aux pierres superficielles, qui freinent le ruissellement.

Il semble cependant qu'il existe un lessivage des éléments fins entraînés en profondeur, qui bloquent la porosité des horizons minéraux profonds. Ces sols jeunes ont besoin d'être protégés, car leur faible épaisseur les voue rapidement à la des-

truction totale : sur une pente forte et avec un sol nu la roche mère apparaît en surface (*padza*) sur les collines érodées.

1.2. Les sols bruns :

Ils proviennent des cendres volcaniques très anciennes ; le sol est très évolué et forme des enclaves au milieu des sols andiques, correspondant souvent à des plateaux, des dépressions ou des plaines. Généralement ces matériaux meubles, projetés par les volcans, sont étalés en mince couverture sur le relief déjà existant, comblant les irrégularités de terrain. Là où l'érosion a été faible, un sol plus profond a pu se former. Un facteur favorable est la grande perméabilité de ce type de sol. À l'état naturel, ce sol est couvert par un tapis herbacé qui résiste bien à l'érosion quelque soit la pente. L'homme intervient pour y installer ses cultures. Il arrache les graminées capables de couvrir le sol : il « gratte » le sol, mis à nu sur des pentes fortes. Dès les premières pluies, une érosion en nappe prend tout de suite naissance, entraînant toute la terre fine de surface. Si les pluies sont violentes, l'eau de ruissellement se concentre en rigoles, puis en ravins.

La force vive de l'eau dans les ravins est suffisante pour entraîner les cendres volcaniques du sous sol. Elle forme de longues tranchées de 5 à 10 m de profondeur aux parois verticales.

Souvent les cendres sont entraînées jusqu'à une zone durcie peu épaisse. La croûte durcie forme désormais la surface du sol « shambé ».

1.3. Les sols rouges ferrallitiques :

Ce type de sol se trouve généralement dans les régions les plus sèches, plus basses et il est formé par des vieilles coulées volcaniques. Ces sols mal couverts par une herbe en touffes, souvent épuisés par la culture (brûlage de la matière organique, épuisement des éléments nutritifs), sont soumis à une érosion en nappe intense. Les graminées ne suffisent pas à entretenir la couche humifère supérieure : le sol se dégrade très vite et présente une surface nue de couleur rouge.

2. Perception de l'érosion par les paysans

Le problème de l'érosion ne se fait pas sentir au même degré chez tous les paysans comoriens vu la diversité des types des sols et l'inégalité de la répartition de la population sur les îles. L'histoire de la colonisation foncière et de l'économie de plantation est en partie responsable de l'aggravation du phénomène de l'érosion. Les paysans furent dépossédés de leurs terres et pour gagner leur vie, les paysans n'avaient d'autre solution que de défricher l'espace forestier sur les collines.

En 1941, à Anjouan une colline toute entière a été ravinée en une seule nuit de pluie intense : le problème de l'érosion aux Comores ne date pas d'aujourd'hui et le paysan comorien a perçu ce phénomène depuis plusieurs décennies. Mais avec la disponibilité des terres à l'époque coloniale, une densité de population moins importante et un système surtout basé sur les cultures associées arborées, l'érosion n'est perçue que dans quelques localités, où sont installées les cultures

sarclées à cycle court. La culture sur brûlis sur fortes pentes accélère l'érosion.

L'érosion de l'horizon terreux superficiel, n'est pas irréversible : le sol est stérilisé pour quelque temps, mais une nouvelle végétation peut s'établir, l'altération des cendres volcaniques restaure le sol granuleux de surface. Ce processus demande dix à vingt ans, temps très court pour la formation d'un sol, mais qui entraîne une longue période d'improductivité pour le paysan.

Traditionnellement, le paysan comorien pratique le système de culture associée arbustive ou arboré qui est meilleur pour la conservation physique du sol.

On trouve des champs où toutes les pierres étaient rassemblées en tas coniques, pas pour lutter contre l'érosion mais pour réduire la surface du sol couverte de pierres. Dans certaines localités, surtout en Grande Comore, on constate des aménagements en murettes qui servent à retenir le sol : certaines de ces murettes datent de plusieurs décennies.

Les paysans ont bien adopté le retour à la jachère arborée qui est l'unique système de régénération de leurs terres. Mais pour réinstaller leurs cultures, le paysan manque d'outils de défrichage : par conséquent il recourt au feu pour tirer deux avantages : faciliter le défrichage et fertiliser la terre par les cendres. Cependant, le paysan voit baisser sa production car ses sols sont appauvris et dégradés. Lorsque le sol est épuisé, le paysan laisse retourner son terrain à la jachère et déplace son champ. Diverses mesures ont été prises pour remédier cet état de fait.

Des projets de développement rural intégré ont porté en priorité sur l'introduction du bovin au piquet et la rotation des cultures avec des légumineuses.

Toutefois ces techniques n'ont pas été diffusées hors des zones des projets et le problème de la restauration de la fertilité n'a pas été résolu de façon suffisamment attractive pour les paysans. Seule la région de Nioumakélé montre encore des traces de ces projets. Cette région considérée comme la plus menacée car sa croissance démographique devient l'une des grandes régions en ressources agricoles (vivrière et laitière).

3. Techniques de restauration de la fertilité des sols aux Comores

On prendra en compte les mesures de protection et de restauration du sol suivantes :

3.1. Les lignes d'arrêt végétales

Les techniques de protection des champs contre l'érosion consistent à la mise en place des courbes de niveau en commençant par la partie la plus haute de la parcelle et en faisant en sorte qu'il y ait une dénivellée de 1,5 m entre les courbes. Cette opération doit être précédée d'un piquetage et du creusement des petits canaux qui suivent les piquets.

Les canaux aident l'eau à s'infiltrer et les billons facilitent la plantation des herbes.

Le vétiver se plante par éclat de souche (> 20 cm) tous les dix cm, sur les billons. Il est aussi possible de planter la citronnelle, le Guatemala ou le Pennisetum.

Il est recommandé de couper le vétiver ou les autres herbes et mettre les feuilles

devant la ligne afin de la renforcer. A la place des petites légumineuses, on peut également planter des fourrages comme le *Guatemala* et le *Pennisetum*. Les éleveurs peuvent couper régulièrement ces plantes comme fourrage sinon elles deviennent trop envahissantes, surtout le *Pennisetum* qui produit de longues tiges. Une bouture de *Pennisetum* doit avoir trois nœuds, dont 2 à mettre dans la terre : il se plante sur 2 lignes, en quinconce à 30 cm. Une autre solution consiste à planter des ananas sur les courbes à des distances de 40 à 50 cm.

Après l'aménagement des courbes de niveau avec les lignes d'arrêt végétal, l'érosion diminue et on constate une accumulation des terres devant des lignes d'arrêt végétales : on peut alors planter les cultures entre les courbes. Ce système peut être amélioré en ajoutant des arbres sur les courbes notamment le *Calliandra*, le *Leucaena*, les boutures de *Sandragon* ou de *Gliricidia*. Ces plants donnent de l'engrais vert, du fourrage et du bois de feu. Ils sont aussi utilisables comme tuteurs pour la vanille, le poivrier, et les ignames. Ils forment aussi un brise-vent et donnent de l'ombrage pendant le période sèche. Le semis direct peut être réalisé pour « habiller » des lignes antiérosives ou pour constituer des clôtures. On sème les graines trois par trois dans des poquets distants de 20 cm. Après 2 à 3 semaines, démariage pour ne laisser qu'une seule des trois plantules par poquet.

3.2. Les murets

Comme pour la réalisation des lignes antiérosives, l'opération préalable consiste à piqueter les courbes de niveau et à creuser un sillon suivant les piquets. Après avoir transporté les pierres, on creuse un sillon de 50 cm de profondeur et 40 cm de large, le muret sera alors construit en entassant les pierres les unes sur les autres. Par la suite des boutures seront plantées en dessous du muret à 50 cm d'intervalle.

3.3. Le fascinage

Il est destiné à arrêter le ravinement en mettant en place des obstacles végétaux qui vont freiner l'eau. Il doit débiter dans les hauts du ravin. Après avoir piqueté et préparé des boutures de 60 cm de haut, on plante ces boutures tous les 20 cm en les inclinant dans le sens de la pente.

3.4. Les clôtures

Pour la clôture on utilise des boutures de *Sandragon* ou *Gliricidia* bien aoûtées de 1,8 m de long en taillant les extrémités en biseau. Cette opération facilite la pénétration des boutures dans le sol et limitera les risques de pourriture des boutures.

4. Les systèmes de culture

Les systèmes de cultures et la gestion de la fertilité qui s'y rattache, sont fortement conditionnés par la disponibilité des terres et donc la pression démographique. Ceci nous amène à séparer ici la Grande Comore à pression démographique

relativement faible et à l'île d'Anjouan où la très forte pression a entraîné, par endroit, une dégradation marquée et « irréversible » des sols en facilitant l'érosion.

4.1. Amélioration des systèmes de culture

Les contraintes socioéconomiques (pression démographique, coûts des intrants, statut foncier, objectifs de développement), physiques (érosion, épuisement de sols, efficacité insuffisante des engrais, etc) et techniques (suppression de la jachère) entraînent peu à peu les agricultures à modifier, certaines composantes de leur système traditionnel de culture.

4.2. Une production agricole diversifiée

Les zones les plus hautes sont recouvertes de lambeaux de forêt naturelle, permettant de marquer la propriété. Ces forêts sont exploitées progressivement pour le bois de charpente ou de feu, puis défrichées pour l'implantation de cultures vivrières annuelles.

Au-dessous de la forêt, à des altitudes comprises entre 300 et 400 m, les surfaces sont consacrées au vivrier. Le système à base de riz pluvial associé au maïs et à l'ambrevade, encore dominant dans certaines zones (Anjouan), a été remplacé par arachide maïs/manioc/ambrevade, ou taro/maïs/patate-douce/ambrevade... De nombreuses autres espèces complètent les productions : vohème (*Vigna umbellata*), tabac... auxquelles s'ajoutent les cultures maraîchères qui tendent à se développer dans les zones d'altitude : pomme de terre, tomate, carotte, haricot, chou, légumes-feuilles...

Dans les zones aux contraintes pédoclimatiques les plus fortes (sécheresse sur le littoral, pentes, coulées volcaniques récentes) ou à proximité de villages, les cultures vivrières sont intégrées dans des systèmes agro-forestiers, parfois hérités des anciens grands domaines coloniaux (orientés vers les cultures d'exportations : ylang-ylang, girofler, cocotier). Sous le couvert arboré dominé par les cocotiers, sagoutiers (*Cycas sp.*), manguiers, arbres à pain... sont plantés vanilles et le vivrier à base principalement de manioc, ambrevade, arachide, maïs, canne à sucre.

5. Conclusion et recommandations sur l'érosion aux Comores

L'érosion est un phénomène complexe groupant un ensemble de facteurs physiques et humains. Ces derniers agissent en général en association.

Depuis plus de vingt ans, la lutte antiérosive a commencé principalement dans l'île Anjouan. On ne revient pas sur les acquis connus et les intérêts distincts sur les zones ayant commencé tôt (rentabiliser les lignes antiérosives, arrêter l'érosion par différentes techniques) : il reste encore des situations dégradées. Pour remédier à ce problème, des contrôles de la fertilité des sols à vocation agricole sont nécessaires : il suffirait d'ajouter encore quelques efforts car les sols volcaniques sont riches.

Thèmes proposés par les structures d'encadrement	Problèmes soulevés par les paysans	Solutions proposées par les paysans et les agents d'encadrement	Observations
* plantation des lignes antiérosives composées de vétiver et de citronnelle	<ul style="list-style-type: none"> * la citronnelle est envahissante * le vétiver n'est pas fourrager * destruction des (LAG) par les animaux en divagation * les herbes prennent trop de place * trop de travail pour des résultats tardifs 	<ul style="list-style-type: none"> *remplacer le vétiver par des espèces fourragères *tailler les (LAE) et utiliser la paille comme <i>mulch</i>. *associer dans les (LAE) des espèces comestibles comme l'ananas * renforcer les (LAE) par des espèces arbustives adaptées au site et à usage multiples 	<ul style="list-style-type: none"> * le vétiver et lacitronnelle ne sont plus utilisées * les légumineuses arbustives sont privilégiées, même si leur effets antiérosifs à court terme est en plus faible même sur pente assez forte, la distance entre les LAE reste d'au moins 5 à 6m pour permettre l'évolution des cultures
<ul style="list-style-type: none"> * construction des muets : mesure antiérosive adaptée sur les sites à pierrosité élevée * Muretsconstruits perpendiculairement à la pente et en courbe de niveau * paillage du sol 	<ul style="list-style-type: none"> * Les murets constituent des refuges pour les rats * actions limitées aux parcelles où il y a des pierres * actions demandant beaucoup d'énergie * techniques peu appliquées par les paysans qui utilisent les produits provenant des LAE à d'autres fins ou qui ne les taillent pas * certains paysans confondent le paillage et l'enfouissement 	<ul style="list-style-type: none"> * nécessité d'utiliser du raticide à mélanger avec du tourteau de coprah * techniques plus efficaces que la plantation des arbres. * démonstration nécessaire * utiliser les légumineuses comestibles . 	<ul style="list-style-type: none"> * technique traditionnelle à la Grande Comore au cours de la diffusion à l'île d'Anjouan * l'utilisation d'herbe après le labour et après le sarclage, remplace les pierres dans certains cas * la présence de vache aux piquets dans la parcelle et l'utilisation des plantes fourragères favorisent l'entretien régulier des LAE et des enclosures
engrais vert : jachère à base des légumineuses pour répondre à baisse de la fertilité et à la diminution des matières organiques dans les parcelles	<ul style="list-style-type: none"> * activités inconnues par bon nombre de paysans * approvisionnement en semences 	<ul style="list-style-type: none"> * démonstration nécessaire de l'impact des légumineuses sur la fertilité des sols * implanter des légumineuses dans les haies vives pour la production des semences 	<ul style="list-style-type: none"> * niveau faible de diffusion, même à Anjouan

Thèmes proposés par les structures d'encadrement	Problèmes soulevés par les paysans	Solutions proposées par les paysans et les agents d'encadrement	Observations
Clôture des parcelles : elle constitue un mur de protection contre le vent et les eaux de ruissellement pour les paysans, le permet de délimiter sa parcelle et de la protéger de la divagation du bétail et parfois des vols	<ul style="list-style-type: none"> * les boutures ne sont pas toujours disponibles et adaptées sur les sites. * les animaux en divagation détruisent les clôtures pendant la saison sèche * le transport des boutures est un travail épuisant * le <i>gliricidia</i> est envahissant. 	<ul style="list-style-type: none"> * diversifier les espèces d'arbres et augmenter la production * fournir des espèces qui ne seront pas appréciées par les animaux 	<ul style="list-style-type: none"> * technique très utilisée à l'île d'Anjouan, souvent en combinaison avec la vache au piquet fixe * à la Grande Comore, elle est simplifiée et sert à marquer l'appropriation sur certains terrains
* reboisement : il s'agit de mettre en valeur les sols peu productifs comme les crêtes des collines ou les sols très dégradés (<i>Padza</i>)	<ul style="list-style-type: none"> * pas toujours assez d'arbres pour satisfaire la demande * cas de vandalisme à Anjouan * les effets des arbres ne sont pas connus de tous les paysans Les arbres forestiers ne produisent pas de nourriture. 	<ul style="list-style-type: none"> * fournir des arbres fruitiers, agrumes, arbres à pain, corossoliers, jacquiers * action de protection par les communautés villageoises à renforcer 	<ul style="list-style-type: none"> * bon résultats à sur les îles d'Anjouan et de Mohéli sur les <i>padza</i>, en particulier avec <i>Acacia auriculiformis</i> * demande de filao à Anjouan et d'Eucalyptus à la Grande Comore
* billon et enfouissement des matières organiques : thème proposé en vue de freiner l'érosion sur des terrains en pente et fournir de la matière nutritive aux plantes à tubercules (manioc, patate douce, taro.)	<ul style="list-style-type: none"> * trop de travail pour l'enfouissement des matières organiques des paysans * dosage de la quantité de matière organique peu connue * terrains caillouteux mal appropriés. * avantage du billonnage par rapport au buttage non encore prouvé. 	<ul style="list-style-type: none"> * démonstration nécessaire * taillage LAE pour profiter de la biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> * bon niveau de diffusion sur certaines zones d'Anjouan
* bovin au piquet fixe, une technique d'intégration, agriculture, élevage, mis au point par les éleveurs de Nioumakélé Anjouan. elle convient aux petites exploitations agricoles La vache est attachée dans une parcelle embocagée, et nourrie pendant quelques semaines, elle fertilise une portion de la parcelle	<ul style="list-style-type: none"> * tout le monde n'a pas d'animal pour fertiliser le sol * problèmes d'abreuvement et de suivi sanitaire des animaux * problèmes de vol de bétail et d'attaque par les chiens errants * l'intérêt est connu mais nécessite un investissement important 	<ul style="list-style-type: none"> * suivi sanitaire des animaux par les agents d'encadrement * sensibilisation et formation et démonstration sur la conduite d'une parcelle embocagée * prévoir l'amélioration génétique des animaux pour mettre en valeur le changement de conduite 	<ul style="list-style-type: none"> * techniques largement utilisées sur les sols les plus fertiles dans les hauts d'Anjouan. * adapter les techniques dans les zones sèches * à la Grande Comore les paysans préfèrent le système du piquet mobile sur jachère

Proposition pour l'amélioration de la production agricole aux Comores par une meilleure gestion de la fertilité des sols dans les parcelles paysannes.

ISMAILA MOHAMED ASSOUMANI

INRAPE, Moroni, ministère du Développement rural,
Tél. : +269 75 60 05 ou +269 33 11 02

Résumé

D'une manière générale, les Comores ont la réputation de détenir un potentiel agricole à la fois diversifié et relativement élevé. La production agricole est orientée vers une large gamme basée sur deux types de cultures : les cultures vivrières et les cultures de rente.

Vers le milieu du XIX^e siècle, les colons se sont emparés de grandes surfaces des bonnes terres et ont installé les cultures industrielles. Actuellement, ces grands domaines coloniaux n'existent plus : ils ont été morcelés en petites exploitations.

Ces petites exploitations paysannes constituent le système agraire des Comores.

D'autres problèmes touchent l'agriculture comorienne mais le manque de disponibilité des terres cultivables est très ressenti surtout à Anjouan.

L'abandon des terres appauvries par les cultures, conséquences de la pratique des techniques inadaptées, engendre un grave problème qui est l'installation des cultures dans l'espace réservé spécialement à la forêt, les seules extensions possibles des cultures.

Des techniques adaptées aux conditions pédoclimatiques locales sont nécessaires pour mieux cerner le problème de l'appauvrissement des terres cultivables caractérisées par polyculture sans fertilisation.

La cartographie pédologique réalisée par l'IRAT (1972-1977) constitue un investissement précieux qui joue un rôle considérable dans le cadre de l'affectation des sols. Tous les sols comoriens dérivent de matériaux volcaniques de nature variée et d'altération plus ou moins accentuée suivant la géomorphologie et l'ancienneté des dépôts.

L'extrême variabilité locale des caractéristiques des sols avec une aptitude pédoclimatique favorisant diverses cultures tropicales à différents cycles végétatifs : long (bananes, manioc), court (patate douce, taro). Cette aptitude est en revanche beaucoup plus limitée pour les céréales et en particulier pour la culture du riz.

Le système d'agriculture arborée domine largement et couvre la plus grande partie de la surface agricole utilisée. La densité du couvert arborée est variable, en général, et d'autant plus dense que les conditions climatiques sont plus humides. Les seules trouées dans ce dispositif résultent des clairières nécessaires aux cultures relativement exigeantes en lumière.

Le système de défrichement pour l'installation des cultures est relativement original et se développe à la lisière des dernières forêts à altitude moyenne.

Dans les zones à forte densité le système cultural comporte souvent deux cultures par an ou des cultures à cycles longs mais épuisantes.

Ce système est pratiqué depuis plusieurs décennies sans apport de fumure donc sans transfert de fertilité, avec une remontée biotique limitée par l'enracinement superficiel des cultures pratiquées.

Les opérations précédentes ont porté en priorité des travaux de conservation physique des sols à l'aide des bandes d'arrêt en courbes de niveaux et de la mise en place des haies vives.

Le problème de la fertilité n'avait pas échappé aux promoteurs :

- introduction du bovin au piquet
- fertilisation chimique en cas de maraîchage
- rotation des cultures avec des légumineuses.
- Une stratégie auto-centrée excluant l'apport d'intrants et limitant la restauration de la fertilité à la seule fumure organique disponible sur place : l'utilisation de la biomasse, pouvant être produite localement par l'exploitant.
- Il n'existe pas de principes uniques applicables sur l'ensemble des Comores pour conserver et restaurer la fertilité des sols.
- L'adaptation au contexte social, au climat local, aux caractéristiques du sol et à leur degré d'épuisement doit constituer la règle.

L'érosion hydrique est un des facteurs principaux de la dégradation des terres entraînant du coup leur perte de fertilité. Par ailleurs, du fait du déboisement, certaines régions commencent à connaître l'érosion éolienne

Références bibliographiques

- BDPEA-SCETAGRI, 1991, *Étude de la stratégie agricole des Comores*, rapport final, tome VI : les ressources, 63 pp.
- LATRILLE, E., 1975, *Grande Comore, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales*, rapport IRAT, archipel des Comores, 315 pp.
- LEXA, J.-P., MARITAN, R., 1995, *De la recherche-développement aux Comores : dix ans de coopération dans le développement rural des Comores*, 8 pp.
- QUANTIN, P., 1986, *Analyse d'essais de fertilisation sur des sols des îles Comores*, mission ORSTOM, 83 pp.
- SIBELEIN, 1995, *L'innovation du milieu paysan ou la capacité des acteurs locaux à innover en présence d'intervenants extérieurs*, Nouvelle pratique de fertilisation mise en embocage dans le Nyoumakélé, 293 pp.

GCES dans les terrains de parcours au Maroc oriental

MILOUD CHAKER

faculté des lettres et sciences humaines, Rabat
Tél. : +6 70 80 872, Courriel : mchaker2@caramail.com

1. Problématique

Au Maroc, les terrains de parcours continuent à jouer un rôle socioéconomique irremplaçable. Cependant, actuellement presque 90 % des parcours au Maroc sont déclarés dégradés. Ainsi, dans la vallée de la Moulouya et les hauts plateaux de l'Oriental, plus de 40 % des terrains de parcours sont fortement dégradés.

Parmi les principaux aspects de la dégradation relevés :

- la régression continue du couvert végétal à un rythme dépassant 1%/an à partir de 1950 ;
- l'extension des formes d'érosion hydrique et éolienne ;
- l'extension des cultures pluviales mécanisées aux dépens des parcours.

Les nouvelles pratiques culturales ont contribué à généraliser la fragilisation des sols et à accentuer l'agressivité des réponses hydrologiques. Les phénomènes d'hydrophobicité ont accentué la perturbation des systèmes d'infiltration et par conséquent nous assistons à des ruissellements intenses provoquant une érosion ravinante, de plus en plus généralisée, particulièrement dans les dépressions et terrasses limoneuses, considérées comme étant en équilibre. Les ruissellements aréolaires déchaussent les touffes du couvert végétal, particulièrement l'alfa et l'armoise, ainsi, les racines mises en saillie, sont rapidement desséchées et le processus de dégradation s'aggrave.

Dans cet article, il est question de mettre en évidence les efforts déployés par l'Etat, pour mettre en place une stratégie de développement durable de ces parcours ; la réaction et le comportement des paysans concernés et enfin, l'apport de la recherche pour contribuer à mettre en place un système d'exploitation et de gestion conservatoire des parcours dans l'Oriental.

2. Dégradation des parcours dans le Maroc oriental et les formes d'intervention de l'État

Les milieux steppiques connaissent des transformations socioéconomiques importantes, particulièrement suite au *Dahir* du 15 août 1928 qui a décidé que tous les terrains alfatiers, soit plus de 3 000 000 ha, font partie intégrante du domaine de l'Etat, sous réserve d'usage au parcours et aux besoins domestiques par

les populations ayant droit. Cependant, presque la totalité de ces espaces alfatiers ne sont toujours pas délimités par les Eaux et Forêts et continuent à subir une forte dégradation. Les massifs forestiers semi-arides de l'Oriental connaissent à leur tour une steppisation suite à une surcharge pastorale et des prélèvements excessifs pour couvrir les multiples besoins des populations.

2.1. Caractéristiques et formes de dégradation des parcours steppiques

Au Maroc oriental, l'alfa produit à elle seule 286 000 000 d'UF/an, dans des conditions écologiques relativement simples. Cette graminée résiste au froid, -16 °C, supporte la chaleur + de 40 °C, avec une limite inférieure de 150 mm/an, et un seuil supérieur de 500 mm. Elle supporte l'enneigement prolongé, et s'adapte aux sols légers, en principe moins sollicités pour la mise en culture. La phytomasse aérienne de la partie verte, de l'alfa, est de l'ordre de 1460 kg MS/ha/an. Le surpâturage reste la cause primordiale de sa dégradation même si cette graminée est d'une médiocre appétibilité et sa valeur fourragère baisse à moins de 0,20 UF/kg MS en période sèche.

Les parcours steppiques des hautes plaines ont été marqués par une dégradation intense, affectant le couvert végétal, la biodiversité et le sol. La dégradation la plus perceptible est celle qui a touché certaines plantes pérennes caractérisant la physionomie de ces parcours. Ainsi, en moins de dix ans, le passage des nappes alfatières vers d'autres formations, comme l'armoise blanche, a été noté.

2.2. Les facteurs et processus de dégradation.

Dès que les espaces ruraux sont, petit à petit, intégrés à l'économie du marché, de nouveaux objectifs sont apparus : d'où une forte pression sur les ressources naturelles.

Les changements qui ont ébranlé l'équilibre des parcours steppiques semblent être principalement dus à des raisons socioéconomiques, alors que les fluctuations climatiques constituent un facteur aggravant.

Les courbes des précipitations dans les milieux steppiques marocains, montrent qu'il est difficile d'incriminer le climat. En effet, sous les mêmes conditions naturelles, nous avons des auréoles de dégradation, permettant la présence des espaces fortement dégradés à coté d'autres en équilibre. En effet, auprès des points d'eau et le long des itinéraires fréquemment fréquentés, les touffes d'alfa sont souvent fortement broutées et se présentent alors comme des coussinets sans limbes.

L'exploitation traditionnelle de ces parcours collectifs, se pratiquait par le déplacement des nomades au gré des pluies, de l'abondance, la richesse des pâturages et la disponibilité des points d'eau. Alors que les éleveurs transhumants se déplacent selon les saisons et des itinéraires connus. Les notions de *Margade*, le *Walf*, *Ittisaa*... qui sont des notions d'ordre écologique, signifiant le respect des espaces voisinant l'habitat d'un éleveur, lieu où ses animaux sont accoutumés et acclimatés (Chiche, 1995). Il est donc clair que les éleveurs, exploitaient leurs parcours avec précaution. C'est au berger de faire le choix des points d'eau, des

terroirs fourragers à fréquenter et l'évaluation de l'état des parcours. En choisissant son lieu de campement, l'éleveur respecte automatiquement le règlement instauré par la société pastorale, à savoir le respect de *lawkar* ou voisinage. Ainsi, la charge pastorale se trouve relativement bien répartie sur tous les parcours. En cas de sécheresse durable, les éleveurs sont contraints de multiplier leurs déplacements (entre 40 à 50 campements/ans), ainsi, les parcours n'ont jamais atteints un degré de dégradation irréversible.

2.3. Prélèvements pour utilisations domestiques

Dans les espaces alfatiers, nous assistons à une dégradation par strates de l'écosystème alfatier. Parfois l'alfa est l'unique source d'énergie domestique gratuite, ainsi un foyer peut consommer jusqu'à 50 kg par jour, soit 50 à 80 touffes qui sont déracinées, d'où les vides qui restent difficiles à combler autour des campements.

2.4. Nouveaux processus de dégradation des parcours

Pendant longtemps, les caractéristiques de ces parcours ont imposé aux éleveurs des limites d'une utilisation rationnelle des ressources naturelles, basée sur la mobilité traditionnelle des animaux et des hommes pour profiter de la complémentarité entre les différents types de terroirs et pour se prémunir contre les aléas climatiques. Ainsi, les différents terroirs des parcours connaissent à tour de rôle des phases de repos.

Actuellement, l'influence de plusieurs facteurs endogènes et exogènes, a suscité des besoins accrus, d'où l'intensification des moyens et facteurs de production dans le but d'améliorer les conditions de vie. Ces changements se traduisent par la mise en cultures mécanisées des parcours les plus productifs, la mécanisation des moyens de déplacements et des travaux agricoles.

La stratégie de la complémentarité, a permis l'élargissement de la taille du cheptel, devenant insensible aux aléas climatiques, par conséquent les parcours ne répondent plus aux besoins des troupeaux. La société pastorale s'est divisée en grands éleveurs, possédant les grands moyens pour effectuer les déplacements rapides et se ravitailler sur place, et les petits éleveurs qui se trouvent devant l'obligation de se sédentariser autour des points d'eau dans des parcours déjà fortement dégradés. Ce sont donc les éleveurs qui ne peuvent surmonter leurs difficultés que par la transformation d'une partie des parcours en terres de céréaliculture pour répondre aux besoins urgents. Devant cette situation préoccupante, les pouvoirs publics ont jugé opportun d'intervenir au cours des années 1990 pour répondre à un certain nombre d'objectifs. C'est dans cette optique que s'inscrivent les actions du Projet de développement des parcours et de l'élevage dans l'Oriental (P.D.P.E.O).

3. Intervention des pouvoirs publics

3.1. Recherche d'une gestion conservatoire permettant un développement intégré et durable.

Pour relever le défi de la dégradation des parcours collectifs, le Maroc oriental a été choisi par les décideurs comme zone de mise en place d'un projet de développement et de pilotage, servant de modèle pour les autres régions similaires, où l'approche peut être reproductible. Le Projet de développement des parcours et de l'élevage dans l'Oriental (PDPEO), concerne tous les parcours collectifs des hauts plateaux, soit plus de 3 000 000 d'hectares de steppes et matorrals plus ou moins clairs. Le budget engagé est de l'ordre de 412 000 000 de dirhams. Les objectifs visés, sont l'accroissement de la productivité des parcours et de l'élevage, l'amélioration des conditions de vie des éleveurs, la protection et la gestion de l'environnement. Pour ce faire, l'État a choisi comme stratégie d'approche la mise en place des assises d'un développement rural intégré, basé sur la création des coopératives pastorales ethnico-lignagères, qui vont assurer la gestion collective et durable des parcours.

3.2. Quelques résultats préliminaires du PDPEO

Actuellement, après une durée de vie de quinze ans, ce projet traverse une phase critique. En fait, malgré que ce projet a créé une dynamique positive incontestable au sein d'une communauté pastorale traditionnelle, un échec final reste toujours fort probable, particulièrement si certaines réorientations stratégiques ne sont pas prises et mises en œuvre d'urgence.

En réalité, la stratégie du PDPEO, basée sur « se regrouper pour se développer », n'arrive pas encore à revitaliser les collectivités ethniques visées, et responsabiliser les coopératives pour mettre en place une gestion durable de leurs ressources (Harrach, 1997). Le rôle des pouvoirs publics reste encore capital dans la gestion des coopératives du moment que les populations locales ne peuvent /ou ne veulent pas assumer la responsabilité de gestion de leurs parcours. Ainsi, le passage de la solidarité traditionnelle et ethnique à des organisations démocratiques modernes de type coopératives, visé par les concepteurs du projet, reste un véritable problème.

3.3. Parmi les composantes du projet

- Plantation d'arbustes fourragers (1700 ha), re-semis (20 000 ha), scarifiage (60 000 ha), mises en défens (750 000 Ha) ;
- L'hydraulique pastorale, incluse dans ce volet, vise à améliorer le maillage des points d'eau (forages, citernes, camions-citernes) ;
- Un volet de développement de l'élevage dont les deux lignes d'action principales concernent des programmes de santé animale et un programme d'amélioration génétique ;
- Un volet de crédit, principalement orienté vers les petits éleveurs ;
- Un volet de renforcement institutionnel, y compris la mise en place d'une unité de direction du projet et une unité de suivi-évaluation.

3.4. Les réalisations du projet

Les actions de mise en défens sont les plus spectaculaires et les plus déterminantes dans le *processus* d'adhésion des éleveurs au projet. La superficie prévue pour cette action durant la période du projet est de 750 000 ha. La superficie délimitée fin 1995 est de 422 500 ha.

Malheureusement, les entretiens avec les éleveurs et les observations directes permettent d'interpréter que, dans l'état actuel, les coopératives ne sont considérées par les adhérents que comme cadre pour accéder aux dons et subventions de l'État. En effet, même si le nombre de coopératives et des adhérents augmentent, les espaces aménagés et mis en défens restent figés et n'ont pas dépassé les 10 % de l'espace total. La technique de la mise en repos a donné des résultats satisfaisants, aussi bien sur le plan écologique que sur le plan socioéconomique. Cependant, l'exécution des mises en repos se heurte à de nombreuses difficultés notamment les délits de pacage. En réalité le projet a accentué les écarts entre les éleveurs, par l'émergence d'une minorité qui a profité au maximum du collectif grâce à l'octroi des équipements qui leurs permettent de s'adapter aux aléas climatiques et aux déplacements rapides vers les meilleurs parcours. Ainsi, la majorité des petits éleveurs se sédentarisent avec le désir de s'approprier chacun une partie du collectif, tout en conservant le droit d'usage sur les terres défrichées et mises en cultures et les parcours environnants. Nous assistons alors à une altération et dévalorisation des valeurs traditionnelles sur lesquelles s'articulent les coopératives pastorales, ethnico-lignagères. Ainsi, on peut parler d'un risque de continuer à parier à gérer ces espaces en se basant sur des solidarités et cohésions traditionnelles du moment qu'elles ont favorisé, d'un autre côté, l'appropriation et l'individualisme.

Malgré la taille du projet et l'importance des fonds mobilisés par l'État, les études diachroniques menées sur le terrain, montrent clairement que la dégradation des parcours s'accroît. En effet, les équipements, les dons et subventions d'État aux éleveurs, n'ont fait qu'accroître la dégradation des écosystèmes pastoraux.

4. Apport de la recherche, quelles tendances et quelles stratégies ?

Mis à part la minorité d'éleveurs notables, profitant pleinement du collectif, les autres éleveurs s'orientent vers la fixation, l'appropriation et le passage vers une activité agropastorale. Par contre, les services extérieurs du ministère de l'Agriculture, DPA de Ain Beni Mathar, expliquent l'accroissement de la dégradation des terres par la transformation des terrains de parcours en céréaliculture et souhaitent l'instauration d'une interdiction totale de la mise en culture dans les hauts plateaux. Il est donc question de savoir quel serait l'impact environnemental du désir à continuer à transformer les terrains de parcours en terres de cultures pluviales?

4.1. Résultats des mesures expérimentales.

Il est question d'essayer de tirer profit des mesures expérimentales menées à l'échelle des parcelles de type Wischmeier et des micros-placettes sous pluies simulées. Les résultats des réponses hydrologiques et des pertes en sols, en relation avec les formes d'utilisation et d'occupation des terres, nous permettront de mettre en évidence les systèmes de production érosifs, aboutissant à une forte dégradation des écosystèmes pastoraux.

Les mesures effectuées sous pluies naturelles dans les steppes d'El Aioun-Taourirt, confirment que la mise en culture fragilise à terme les sols, d'où leur dégradation sous les processus d'érosion hydriques et éoliens (Chaker, 1997).

À titre indicatif, certains résultats des mesures effectuées durant cinq ans sous pluies naturelles, montrent que les terres défrichées et mises en culture ou laissées en jachère produisent des ruissellements et pertes en sol plus importants que les terrains de parcours environnants, se trouvant sous les mêmes conditions naturelles, cas de l'alfa ne couvrant d'ailleurs que 15 % de la surface. Par contre, dès que la densité du couvert végétal permanent dépasse 30 %, les processus érosifs hydriques deviennent plus faibles.

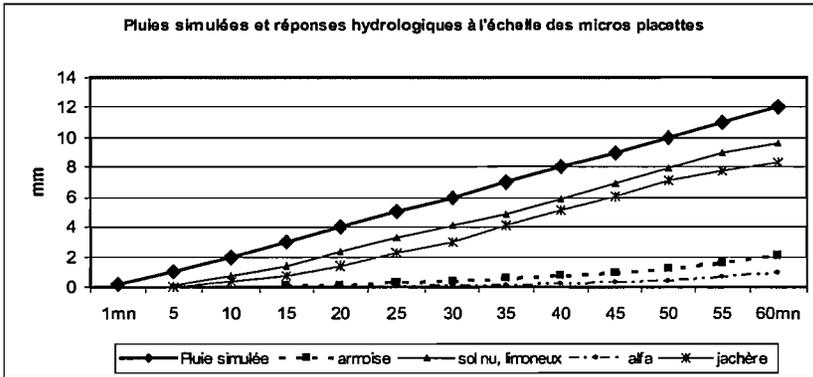
Les ruissellements supérieurs à 1 mm par événement pluviométrique, durant la période d'observation et de quantification, montrent que même lorsque la nappe alfatière est dégradée, elle reste moins érodée que les terres agricoles.

La turbidité est nettement plus faible dans l'alfa dégradée (toutes les mesures de turbidité restent inférieures à 10 g/litre), par rapport à la jachère et les parcelles semées en orge.

A l'échelle d'un terroir, les mesures effectuées par la techniques du césium 137, confirment la même tendance ; ainsi, dans des terres où la céréaliculture est pratiquée depuis plus de trente ans, nous avons relevé une dégradation moyenne de l'ordre de 300 g/m²/an, alors que les terres de parcours, les valeurs varient entre 14 et 140 g/m²/an, suivant les états de surface et le degré de dégradation du couvert végétal (Chaker, 1997).

Sous pluies simulées, la technique repose sur l'utilisation d'un mini-simulateur, doté d'un système d'arrosage porté à 2 m de hauteur. Le débit du gicleur (intensité) est contrôlé par la pression administrée par deux pompes. Dans cette étude nous avons travaillé à une intensité de l'ordre de 50 mm/h, sur une placette circulaire, couvrant 0,24 m².

Dans les parcours steppiques de la Moulouya, les réponses hydrologiques des terres de parcours en comparaison avec les terres de céréalicultures, sont exprimées dans le graphique ci-dessous.



Dans un même site, les sols nus et la jachère d'une année, produisent des ruissellements importants, par contre, la simulation sur des touffes d'arrose et d'alfa (courbes discontinues), montre que la tranche infiltrée est remarquable.

5. Conclusion

Après quinze ans d'existence, le PDPEO n'arrive pas encore à bien structurer et responsabiliser les coopératives afin de prendre en main la gestion des parcours.

Actuellement, à l'inverse de la stratégie des concepteurs du projet, basée sur la gestion collective des parcours, les éleveurs se sédentarisent et désirent l'appropriation de l'usage des terres de parcours. De même, à l'inverse du projet qui vise l'amélioration de la production fourragère par la mise en défens et l'introduction des plantes fourragères, les éleveurs tentent de surmonter les difficultés du déficit fourrager par l'extension de la céréaliculture pluviale aux dépens des parcours. Ainsi, toute tentative d'aménagement adéquate de ces espaces doit prendre en considération le caractère érosif de la mise en culture céréalière, les faibles rendements, mais aussi les besoins urgents des éleveurs sédentarisés qui ne peuvent surmonter leurs difficultés actuelles que par une activité agropastorale.

Enfin, il est important de signaler que dans les parcours privés des steppes du couloir El Aioun-Taourirt, les paysans optent pour une gestion conservatoire des eaux et des sols, basée sur l'introduction en bandes des plantes fourragères dans les champs céréaliers. Cette technique a réduit sensiblement le ruissellement et les pertes en sol et a augmenté les rendements et les potentialités fourragères.

Références bibliographiques

BOURBOUZE, A., DONADIEU, P., 1987, « L'élevage sur parcours en régions méditerranéennes », *Options Méditerranéennes*, CIHEAM-IAMM, novembre 1987

CHAKER, M., 1997, « Processus de dégradation des terres et désertification dans les pays d'El Aioun-Tanacherfi, Maroc oriental », *Méditerranée* 70, 1-2 : 5-14

CHICHE, J., 1995, « Pratiques traditionnelles et normes modernes de la gestion de l'élevage pastoral au Maroc », séminaire international du réseau parcours « Sylvopastoralisme et développement de la gestion traditionnelle à l'aménagement », CIHEAM-IAMM., *Parcours demain*, numéro spécial, Tabarka, Tunisie

HARRACH, M., 1997, Organisation coopérative de gestion de l'espace et dynamique du système agropastoral dans l'Orient du Maroc, CIHEAM/IAMM de Montpellier

Dynamique de la déforestation et érosion du sol dans la région de Vavatenine (côte orientale de Madagascar)

JAORIZIKY

département de géographie, Université de Toamasina, Madagascar,
Tél. : +261 53 300 81 - GSM : 032 40 023 49
Courriel : jao@univ-toamasina.mg

Résumé

Considérée comme inépuisable par le roi Andrianampoinimerina au XVIII^e siècle, la forêt pluviale de la côte orientale a beaucoup reculé au cours des siècles et elle continue d'être rongée, à cause des défrichements par le brûlis.

Les récits de voyages d'Hastie (1822) et de A. Copalle (1825) ainsi que les articles de A. Grandidier (1875) et de L. Jeannelle (1900) nous fournissent des renseignements précieux et des remarques pertinentes sur l'étendue du massif forestier et sa destruction au XIX^e et au début du XX^e siècles :

– Selon son journal du 6 mai au 4 août 1822, Hastie a effectué un voyage de Tananarive à Foulpointe en passant par Ambatondrazaka. Il a traversé la forêt de l'Est malgache et la distance parcourue est de l'ordre de 60 km.

– Copalle a, par contre, estimé la largeur de la forêt à 80 km.

– Au lieu de donner la largeur de la forêt comme ses prédécesseurs, Grandidier a adopté la délimitation par altitude : « La seconde zone forestière occupe la montagne, depuis les premiers contreforts d'une altitude de 400-500 m »

– Jeannelle, quand à lui, considère que la largeur maximale du massif forestier de l'Est est de l'ordre 45 km.

Les photos aériennes de 1949, 1957, 1967 ainsi que les images satellites de 1992 nous fournissent des informations précises sur l'évolution de l'aire forestière et la dynamique de la déforestation dans la région de Vavatenina, au XX^e siècle :

– en 1957, la forêt primaire occupait 150 000 ha. La surface déboisée atteignait déjà 140 000 ha, soit 48 % de la région.

– en 1992, il ne restait plus que 65 000 ha de forêt primaire (21%) et la surface déboisée s'étendait sur 225 000 ha, soit 79 % de la région.

La charge anthropique constitue le principal facteur de l'érosion du sol dans la région. Les manifestations de la pression peuvent être directes (l'orpaillage) ou indirectes (le *tavy*).

Dans la recherche de l'or, les orpailleurs utilisent deux méthodes d'exploitation : creusement des puits appelés *fatana* et extraction à ciel ouvert. Mais quelque soit la méthode utilisée, le volume des terres déplacées est toujours considérable.

– L'exploitation par *fatana* consiste à creuser un puit, de forme cylindrique, de l'ordre d'un mètre de diamètre et de 2 m de profondeur dans les alluvions anciennes.

– L'extraction à ciel ouvert : lorsque les stériles sont peu épais les orpailleurs procèdent à l'enlèvement à ciel ouvert. Cette méthode d'exploitation provoque une perte en terres beaucoup plus importante que la première.

Dans un site aurifère, les terres constituées par les stériles (le plus important en volume) sont abandonnées sur place tandis que les terres aurifères seront transportées et lavées dans la rivière ou le bas-fond le plus proche.

– Les alluvions laissées sur place, après extraction, vont subir une érosion intense par le phénomène de *splash* (particulièrement efficace sur un sol nu et matériaux meubles) et le ruissellement, à la suite des averses.

– Les alluvions aurifères subissent un traitement et, à la suite des fortes averses, ses « résidus » seront transportés et déposés dans les bas-fonds qui deviennent inutilisables pour la riziculture à court et moyen termes, en raison de leur ensablement progressif.

Par la destruction de la couverture forestière dans la région, l'homme expose le sol à l'érosion dont les manifestations se présentent, le plus souvent, sous forme de mouvements de masse. On y observe essentiellement les glissements de type « planche » où les plans de glissement sont rectilignes. Ces modelés d'érosion sont conditionnés par plusieurs paramètres dont la nature et la structure des matériaux affectés, la valeur de la pente, la pluviométrie, la couverture végétale naturelle et la gestion du milieu.

Bref, on peut dire que l'homme joue un rôle important dans l'érosion des sols : les conséquences de ses activités peuvent être tangibles dans l'immédiat (cas de l'orpaillage) ou se produire ultérieurement (cas de l'érosion à la suite de la destruction de la couverture forestière par le *tavy*).

Mots clés : Déforestation ; dynamique ; orpaillage ; *tavy* ; glissement (de terrain) ; Madagascar.

Références bibliographiques

JAORIZIKY, 2002, *Contribution à l'étude du milieu de la façade orientale de Madagascar, Cas de la région de Vavatenina (province de Tamatave)*, thèse pour le doctorat en géographie, Université d'Antananarivo, 273 pp.

JEANNELLE, L., 1900, « Les forêts dans les provinces de Tamatave et de Fénérive-Sont », in *Revue Notes, Reconnaissances et Explorations*, pp. 223-229

KIENNER, A., 1957, « Esquisse forestière de la province de Tamatave, Aperçu de quelques problèmes forestiers et conservation des sols », *Bulletin de Madagascar* 133 : 493-520

RATOVOSON, C., 1979, « Les problèmes du *tavy* sur la côte Est malgache et les solutions possibles », *Mad. Rev. de Géog.*, Tananarive, 35 : 141-161

Pratiques paysannes et gestion de l'érosion, exemples malgaches. Une ingénierie écologique indigène

CHANTAL BLANC-PAMARD¹ , HERVÉ RAKOTO RAMIARANTSOA²

¹CNRS, Centre d'études africaines, EHESS, Paris,
Courriel : cbp@ehess.fr

²COTEM, Université de Poitiers, département de géographie,
Courriel : Herve.Rakoto@mshs.univ-poitiers.fr

Introduction

Madagascar, l'île « rouge » de ses sols mis à nu, détiendrait le record mondial de l'érosion (Ravel, 1989). Le discours actuel en rend les sociétés paysannes responsables et s'accorde avec l'état de grande pauvreté économique auquel on attribue la responsabilité de comportements peu soucieux de la conservation d'un environnement viable (Rossi, 1979). Simultanément, depuis les années 80, deux éléments modifient la donne. Au niveau local, la volonté de décentraliser la gestion des ressources naturelles (RN) fait dorénavant du transfert de gestion des RN renouvelables un élément de bonne gouvernance. La question de la biodiversité, qui s'est imposée à une échelle mondiale, est le second élément. Sa valorisation, la réglementation de son accès ont transformé le rôle et l'importance des acteurs scientifiques et non-scientifiques de ce domaine.

Qu'en est-il dans le champ de l'érosion des sols ? En effet, si les pédologues en ont été longtemps les principaux producteurs de connaissances et d'outils de décision, la prise en compte des acteurs et pratiques paysannes est désormais essentielle. Dans les pays tropicaux aux pluies souvent violentes et concentrées sur quelques mois, l'érosion hydrique est un risque connu. Sur les hautes terres centrales malgaches et leur versant oriental, la pente accentue la vitesse du ruissellement ; le contrôle de ce dernier est l'objet d'une attention particulière des paysans car sa maîtrise est fondamentale pour une gestion de la fertilité (Roose, 1994 ; Reij *et al.*, 1996).

Cette gestion de l'érosion est menée à la fois dans l'espace, à différentes échelles, et dans le temps, à des moments précis du calendrier agricole. En fonction de finalités et de risques connus, les paysans décident ou non d'intervenir dans un double objectif de production et de protection. Notre objectif ici est d'analyser la logique décisionnelle des acteurs paysans face à l'érosion, et de mettre en valeur leurs pratiques et modes de gestion des sols.

1. La logique décisionnelle des acteurs face à l'érosion

Hénin (1958) soulignait l'importance « de mieux comprendre la "tournure d'esprit" des praticiens et la valeur de leurs affirmations ». Mais quel crédit accorder aux savoirs profanes ? Quel poids leur attribuer, quand les schèmes paysans d'aménagement diffèrent des rationalités techniques des naturalistes ? Un premier exemple d'analyse des pratiques paysannes introduira notre propos. Sur le versant ouest forestier betsiléon, un discours associé à la dynamique du corridor fustige la déforestation et dénonce la culture d'abattis-brûlis sur pente. Pourtant, l'observation de parcelles cultivées sur fortes pentes note des pratiques paysannes soucieuses d'une maîtrise du milieu, qui mobilisent un savoir-faire suivant une logique toute autre que celle de dégradation. Sur de tels sites, diverses façons culturales, que la rationalité technique néglige, soulignent que le risque d'érosion est intégré. Une toposéquence sur une pente de plus de 60° fait ressortir les caractéristiques suivantes (fig. 1) :

- des sols peu épais, pénévulés dans la partie amont, peu évolués d'apport colluvial vers le bas, en position de tête de vallon ;

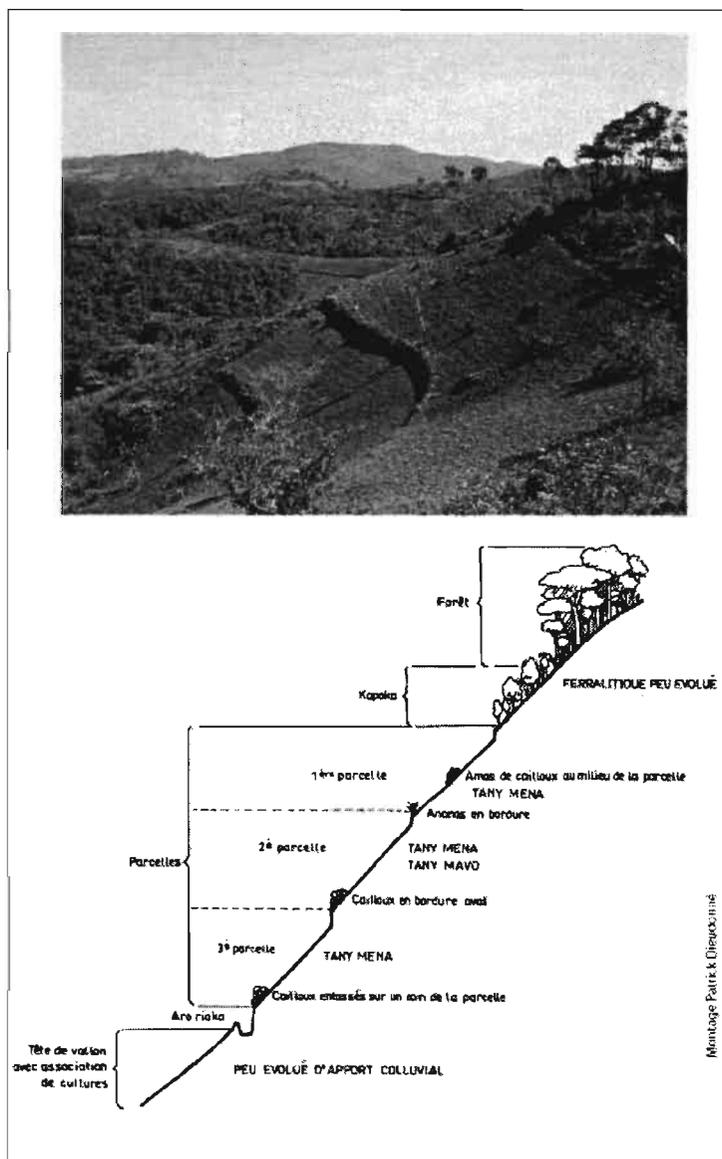
- une succession de quatre facettes du haut vers le bas. D'abord, une forêt conservée. Ensuite, un *kapòka*, recrû forestier post-cultural de trois ans qui jouxte la forêt et complète le rôle protecteur de celle-ci. Lui succèdent des parcelles cultivées associant différentes plantes, sans qu'aucune des trois parcelles ne présente de rigole protectrice dans sa partie amont : les espaces à couverture végétale plus ou moins dense qui les dominent dispensent de leur mise en place ; par contre, des ananas en bordure aval de la première parcelle et des pierres entassées limitant la deuxième parcelle témoignent d'un aménagement. La dernière facette en bas de versant bénéficie d'une rigole de protection, *aro riaka*, car la perception paysanne y note une puissance érosive accentuée des eaux.

Une logique adaptée à la nature et à la position topographique des facettes intègre l'ensemble du versant et infirme un diagnostic par trop négatif de la mise en valeur des pentes. La production scientifique corrobore ce choix des agriculteurs. Bourgeat *et al.*, (1973) montrent en effet que 70 % des variations des rendements en maïs dépendent des propriétés physiques des unités pédo-morphologiques : les reliefs les plus accentués sont les zones les plus favorables alors que les reliefs moins marqués (anciens niveaux d'érosion peu disséqués) ont des propriétés physiques des sols moins performantes. Ainsi, si l'érosion hydrique a le plus souvent une connotation négative, les paysans reconnaissent une érosion utile et une érosion nuisible qu'il leur revient de gérer (Blanc-Pamard, 1986). Une très riche terminologie relative aux sols révèle une « ethno-agronomie » (Rakoto, 1997) qui « sait faire » avec l'érosion. Elle installe des réseaux de protection sur les versants, comme elle peut aussi faire du sol le support d'une érosion utilisée, quand l'entraînement superficiel des éléments fins fait partie du mode opératoire : « il n'y a pas de fertilité en soi » (Sebillotte, 1989), mais en rapport avec des modalités culturelles d'utilisation de l'espace. Il n'existe pas un modèle d'aména-

5. Diagnostic du risque et prise en compte des contraintes paysannes

gement antiérosif, mais des aménagements en fonction des terroirs et de leurs caractéristiques physiques, des activités et des moyens d'une agriculture essentiellement manuelle.

Figure 1. Pratiques paysannes et gestion de pente.



2. Les modes de gestion des sols dans l'espace

2.1. Billons et sillons

Dans les montagnes de l'Ankaratra (Blanc-Pamard et Rakoto, 2000), le *tolaka*, associé à la culture de la pomme de terre, marque le paysage des versants par une alternance de billons -largeur de 1,40 m- et de sillons - profondeur de 20-25 cm et largeur de 70 cm- parallèles à la pente, comme des alignements de « vermicelles » sur les photographies aériennes. Avec la pression démographique et une extension des terres épuisées par une utilisation continue des terres, cette alternance laisse la place depuis les années 70 aux *veli-kiba*, larges billons à morphologie de « cannellonis » de 6 m x 3 m en moyenne ; ils se trouvent séparés par de plus profonds sillons et le dispositif est perpendiculaire à la pente (fig. 2). Ces deux caractéristiques soulignent le souci désormais présent de protection des sols.

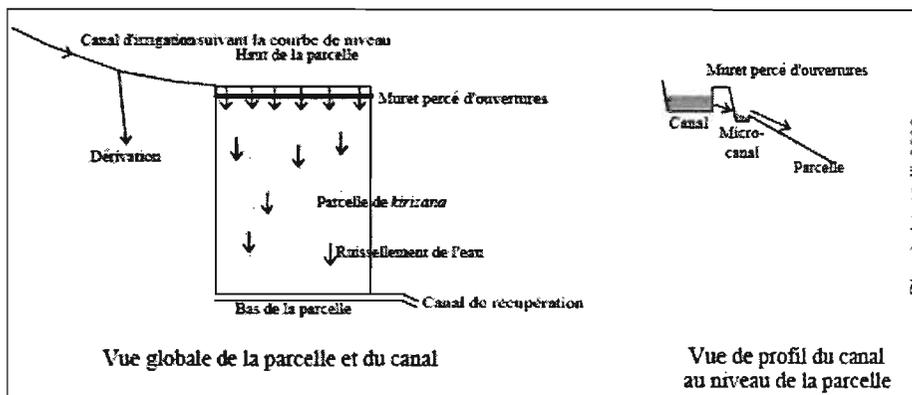
Figure 2. Combinaisons de diverses formes d'orientations de billons sur le versant.



2.2. Ruissellement en nappe et riziculture

Sur parcelles pentues de 10 à 60 degrés, la riziculture de ruissellement en nappe (fig. 3) est une technique particulière observée sous une pluviométrie minimale de 1800 mm/an, chez les Tsimihéty et les Betsimisaraka (Locatelli, 2000). Les parcelles de riz sont situées dans la partie inférieure du versant, irrigable. Leur limite supérieure est bordée par un canal qui suit une courbe de niveau et d'où l'eau s'écoule à travers un petit muret percé d'ouvertures. L'aménagement veut assurer une bonne répartition de l'eau sur toute la parcelle tout en freinant son ruissellement. Un canal identique et parallèle à celui d'amont longe le bas de la rizière pour récupérer les eaux d'irrigation mais aussi contrôler les excès d'eau : ces eaux vont à leur tour, par étalement, irriguer une autre parcelle en contrebas.

Figure 3. Riziculture et ruissellement en nappe.



D'après Locatelli, 2000

2.3. Rigoles de protection : un réseau antiérosif d'amont en aval

Sur les hautes terres de l'Imerina, entre 1200 et 1600 m d'altitude, des collines aux pentes plus ou moins fortes, lieux de l'élevage et des cultures pluviales, alternent avec un réseau de bas-fonds qui concentrent les rizières. L'eau est le trait d'union de ce milieu différencié. Les fossés, *aro-riaka* (fig. 4) protégeant chaque parcelle de versant, s'inscrivent comme une pièce du puzzle d'un schéma anti-érosif global : ils canalisent le ruissellement et évacuent les eaux dans un drain qui ceinture le bas-fond en aval. Les pratiques intègrent ici une succession de parcelles sur une pente.

2.4. Terrasses et intensification

Enfin, une intensification en réponse à une augmentation de la pression démographique aboutit à la construction de banquettes sur des pentes aménagées, alors totalement cultivées (fig. 5). On observe une juxtaposition de parcelles dont la bordure aval est soit un talus, soit une murette de pierres. Sur les parties sommitales faiblement déclives des versants, le labour continu dans le sens de la pente construit des formes en rideaux. Dans le cas des champs empierreés, un important travail d'épierrement place les pierres sur la bordure aval avant d'entamer une construction progressive de la parcelle vers un niveau horizontal. Il n'y a pas ici dégradation de l'environnement car la pression démographique génère des innovations paysannes, dans des conditions d'une meilleure valorisation de la production sur le marché.

Figure 4. Le réseau antiérosif de versant.

A. Le faisceau de rigoles de protection. B. La protection de parcelles.

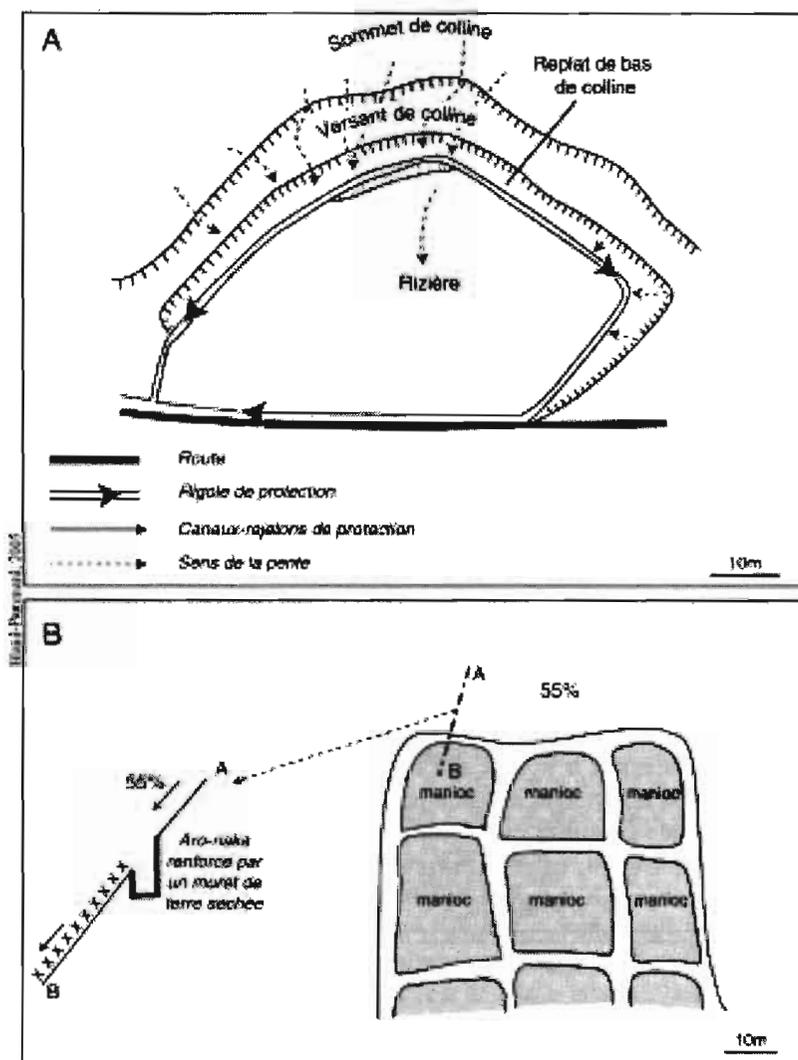
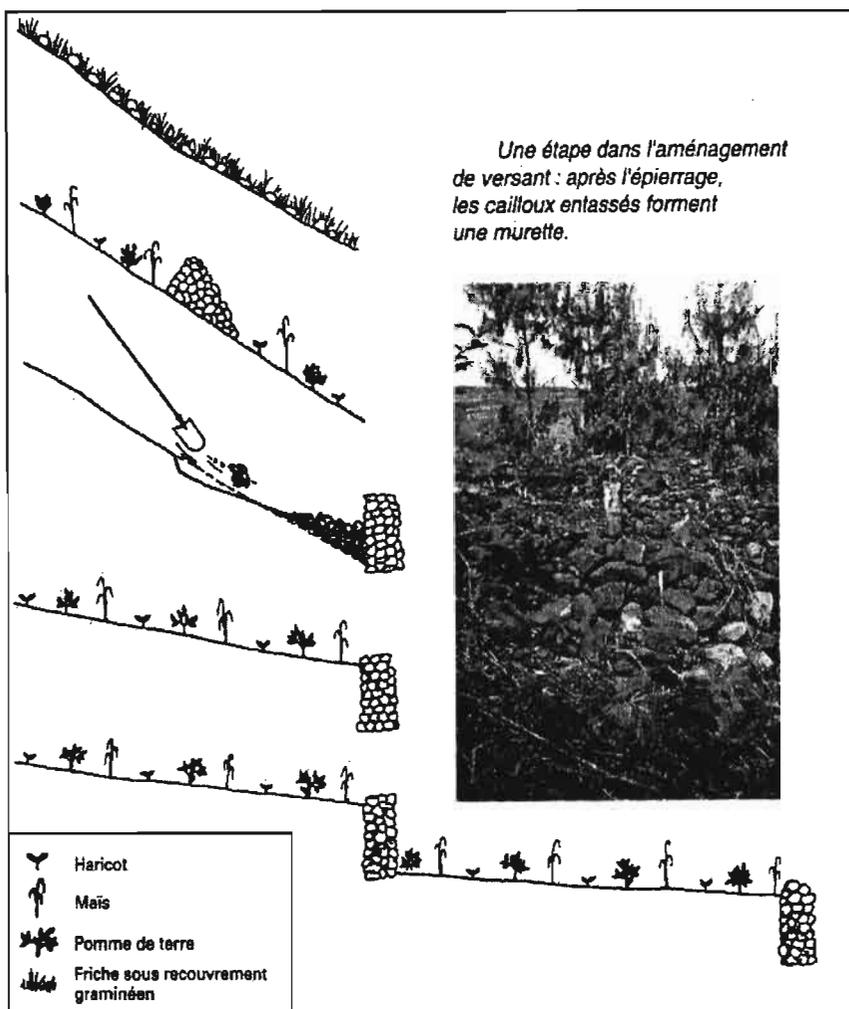


Figure 5. La construction de terrasses progressives de culture sur pentes.



3. Les modes de gestion des sols dans le temps

Le feu est un outil écologique de la gestion paysanne du milieu.

3.1. Contrôle du feu, contrôle de l'érosion

En région centrale de la côte Est, le pays betsimisaraka connaît un climat chaud et humide. Il est couvert par une formation végétale secondaire liée au *tavy*, terme qui désigne à la fois la parcelle et le système de culture itinérant sur brûlis après défrichement. Le risque érosif sur des pentes raides souvent voisines de 50° est bien connu des paysans. Aussi, la préparation du terrain en octobre correspond-elle à un moment particulier, celui où le sol mis à nu par le défrichement voit son érosion limitée à la fois par des pluies réduites et par la présence de troncs et branches abattus et laissés à terre. De plus, la végétation coupée et laissée à terre peut sécher pendant cette période et se consommer mieux. La date de mise à feu, très précise, profite d'une très courte période sèche et le feu, contrôlé, a lieu juste avant le semis pour éviter la prolifération des adventices : les pluies sont alors les bienvenues (Blanc-Pamard, Ruf, 1992).

3.2. Le feu, une intervention écologique

Avec le feu mis à l'échelle d'un bassin-versant, il s'agit d'une mesure de conservation visant à la stabilisation du sol par une correction de la dynamique écologique. Alors que le labour est une intervention technique, nous qualifions le feu d'intervention écologique visant à passer d'un état à un autre.

En Imérina central, dans le vallon de Maropetrika (Blanc-Pamard, 2000) et sur versant convexe d'interfluve, le feu (*doro-tanety*) obéit à deux principales raisons selon les acteurs :

- apports fertilisants des cendres amenées par les eaux de pluie sur les bas de versant où sont pratiquées les cultures pluviales.

- reprise de la végétation d'*Aristida* pour freiner l'érosion et assurer un pâturage en fin de saison sèche aux zébus.

Pour ce dernier objectif, la mise à feu doit impérativement se faire avant « les pluies qui séparent l'année en deux », ce qui a lieu en août (août : 9,2 mm de pluie, donnée mensuelle moyenne sur quarante-quatre ans). Si le feu est mis après cette pluie, il n'a plus l'effet recherché. *Aristida* reste alors en touffes espacées, le recouvrement n'est pas continu et l'érosion, importante (saupoudrage de sable, de petits morceaux de quartz) : le *doro-tanety* est « bon » (*tsara*) à l'échelle du vallon étudié seulement si la date du feu est respectée. L'échelle et le moment du feu sont deux éléments que le paysan sait devoir maîtriser.

Le feu vise ainsi à modifier l'état d'un système pour le rendre plus résistant aux risques craints.

4. Conclusion

L'ingénierie écologique indigène a depuis longtemps mis au point des procédés rendant possible une meilleure protection de la biodiversité, dans un objectif de production.

En faisant ressortir ces aspects qui relèvent des logiques des systèmes de production paysans, notre intervention propose d'apporter sa contribution à une meilleure connaissance des « pratiques antiérosives eau et sol » qui sont un des cinq éléments de l'équation universelle de l'érosion (Wischmeier). Elle se situe dans le contexte très actuel de gouvernance par implication des populations locales, de transfert de gestion des ressources naturelles. Elle souligne une logique des pratiques paysannes de gestion de l'érosion qu'il faut replacer dans le cadre englobant de leur espace de vie. En effet, analysées séparément, celles-ci peuvent sembler mauvaises ou améliorables aux yeux de l'agronome ou du scientifique, au risque de plus perturber le système que de le renouveler réellement. La science du sol est interpellée pour que, au-delà de ses conceptions techniques et biophysiques du traitement des terres, elle envisage, dans une situation d'interconnaissance entre chercheurs et acteurs ruraux, de réfléchir à une production locale de savoirs orientés vers une dynamique de l'action, dans le respect de l'environnement.

Références bibliographiques

- BLANC-PAMARD, C., 1986, « Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des Hautes Terres malgaches », *Milieus et Paysages*, Chatelin, Y., Riou, G., (édit.), Paris, Masson, pp. 17-34
- BLANC-PAMARD, C., 2000, « Histoire d'un vallon (Hautes Terres centrales de Madagascar) », *Les temps de l'environnement*, Barrué-Pastor, M., Bertrand, G., (édit.), PUM Toulouse, 544 pp.
- BLANC-PAMARD, C., RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 2000, *Le Terroir et son double, Tsarahonana 1966-1992*, Madagascar, postface de J. Bonnemaïson, Paris, IRD, coll. « À travers champs », 256 pp.
- BLANC-PAMARD, C., RUF, F., 1992, *La transition caféière (Côte Est de Madagascar)*, CIRAD/CNRS-CEAF, collection « Documents systèmes agraires » n° 16, 248 pp.
- BLANC-PAMARD, C., RAKOTO RAMIARANTSOA, H., ANDRIANTSEHENO, D., 2005, *Foncier et Territoires, entre pouvoirs locaux et politiques publiques environnementales. Pratiques, acteurs, enjeux (corridor betsileo, Madagascar)*, GEREM IRD-CNRE, CNRS-EHESS CEAF, ICOTEM, UR, 168 pp.
- BLANC-PAMARD, C., RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 2005 à paraître, « Couleurs des sols et savoirs paysans ». *L'érosion entre société, climat et paléo-environnement*, actes de la table-ronde en l'honneur de René Neboit-Guilhot, Université de Clermont-Ferrand-II, 25-27 mars 2004
- BOURGEAT, F., VAN NHAN, H., VICARIOT, F., ZEBROWSKI, C., 1973, « Relations entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les Hautes Terres malgaches », *Cahiers de l'Orstom, sér. Biol*, n° 19, pp. 23-41
- HÉNIN, (S.), 1958, « Réflexions sur la valeur de la connaissance empirique », *C.R. Acad. Agric. Fr.*, séance du 17 décembre, pp. 881-883
- LOCATELLI, B., 2000, *Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides l'exemple de Mananara (Madagascar)*, thèse, ENGREF
- RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 1995, *Chair de la terre, œil de l'eau... Paysanneries et Recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar)*, IRD, coll. À travers champs, 370 pp.
- RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 1997, « Paysanneries mérina des hautes terres centrales malgaches : une ethno-agronomie déphasée ? » *Les Cahiers d'outre-mer*, n° 197, pp. 43-56
- SÉBILLOTTE, M. (dir.), 1989, *Fertilité et Systèmes de production*, INRA, Écologie et Aménagement Rural, 369 pp.
- RAVEL, G., 1989, « Madagascar : record mondial de l'érosion, la surface cultivée ne représente que 5 % de la superficie de l'île », *Marchés tropicaux et méditerranéens*, 2 269, pp. 1224-1225
- REIJ, C., SCOONES, I., TOULMIN, C., (édit.), 1996, *Sustaining the soil. Indigenous soil and water conservation in Africa*, Earthscan, 224 pp.

ROSSI, G., 1979, « L'érosion à Madagascar : l'importance des facteurs humains », *Les Cahiers d'outre-mer*, 32, 128, pp. 355-370

ROOSE, É., 1994, « Introduction à la gestion conservatoire des eaux et des sols (GCES), nouvelle stratégie de lutte anti-érosive », *Bulletin pédologique FAO*, n° 70, Rome, 420 pp.

Diagnostic régional de la gestion du risque érosif Étude autour du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar)

GEORGES SERPANTIÉ, ERWAN COADOU LE BROZEC,
DOMOINA RAKOTOSON, ALBERT RAKOTONIRINA, AURÉLIE TOILLIER

IRD, programme CNRE-IRD GEREM, B. P. 434-101, Antananarivo, Madagascar,
Courriels : serpantie@ird.mg ; toillier@ird.mg

1. Problématique

La réduction de la pauvreté, la durabilité du développement des activités agrosylvo-pastorales, la préservation des richesses de l'environnement naturel, et la décentralisation de leur gestion sont les maîtres-mots de l'action en zone rurale malgache. Dans un tel contexte, la déforestation, la pression sur les terres et leur corollaire fréquent, l'érosion des sols et la perte de leurs aptitudes deviennent logiquement une préoccupation de fond. Comment gérer territoires et sols en vue d'une exploitation productive et durable ? Les **conditions régionales et locales** de l'exploitation (climat, sol, topographie et paysage végétal, conditions socioculturelles, marchés, offre technique disponible) doivent être confrontées aux **conditions propres**, moyens et objectifs socioéconomiques, modes de faire-valoir, pratiques et perceptions qui prévalent chez les acteurs (paysans, intervenants). La variété de ces conditions exclut toute approche partielle, standardisée et universelle, et appelle des diagnostics ciblés et complets, outils pour la définition, par les acteurs, de leurs stratégies d'action.

Cet article donne un exemple d'une telle démarche de diagnostic à l'échelon régional. Nous présentons ici les premiers résultats d'une étude-formation menée à Madagascar, dans le cadre du programme GEREM (CNRE-IRD). Il s'agissait, avec des étudiants agronomes, forestiers et géographes, d'évaluer la gestion du risque érosif dans la région du corridor forestier de Fianarantsoa, une zone frontière entre Hautes Terres et Basses Terres de l'Est, dans un contexte d'accroissement de l'emprise des cultures sur *tanety* (versants), de conversion des forêts artificielles de pins, et raccourcissement de jachères forestières, dans les terroirs périphériques au corridor. Ce *processus* peut être attribué à la croissance démographique mais aussi à des mesures de conservation qui réduisent les revenus forestiers traditionnels ainsi que l'accès aux réserves foncières en jachère (Blanc-Pamard, Ralaivita, 2004).

Cette communication présente les méthodes et résultats mis en œuvre dans ce diagnostic ainsi que les premiers résultats obtenus.

2. Analyse bibliographique : recherche de liens entre pratiques, dynamiques des milieux et érosion à l'Est des Hautes Terres

Les données expérimentales sur le facteur érosion des couverts végétaux et des techniques culturales doivent être prises en compte dans un diagnostic régional, mais resituées dans leur contexte d'origine. Le tableau 1 résume quelques travaux sur le « système *tavy* » dans l'Est (défriche-brûlis sur pentes fortes suivi de deux ans de riz pluvial sans labour et cinq à sept ans de jachère).

On peut être étonné de la grande différence de résultats pour le seul riz sur brûlis entre Andasibe et Beforona. Outre de réelles différences de dimensions de parcelles, de milieu climatique et édaphique (l'agressivité du climat de Beforona est supérieure) il faut reconnaître que le nombre d'années de mesure est faible eu égard à la nature exceptionnelle des événements érosifs (liés essentiellement aux épisodes cycloniques). Mais un autre facteur a probablement joué : Beforona est anciennement exploité (jachères sous-arbustives) alors que les parcelles de Andasibe étaient défrichées à partir de *savokas* (jachères) arbustives. Le « système *tavy* » n'a certainement pas les mêmes conséquences dans différentes régions et sur un milieu neuf ou usé. Les conséquences érosives du « système *tavy* », bénignes au moment du premier *tavy* sur forêt, s'aggravent après une succession de cycles, au fur et à mesure que l'érodibilité du sol dégradé s'accroît. Si les mêmes techniques ne donnent pas le même rendement suivant les situations, elles ne font pas non plus la même érosion.

Tableau 1 Données expérimentales sur les effets de certains modes de gestion des terres en zone Est.

Auteurs	Méthode	Site	variables*	forêt secondaire	riz <i>tavy</i>	jachères de <i>tavy</i> , savanes	andains + cultures+ bananiers	Gingem- bre labouré
Bailly <i>et al.</i> (1974), p 62	mesures à l'exutoire de 3 petits bassins- versants de 1,5 ha environ pendant deux ans	station forestière d'Andasibe ; <i>savokas</i> de Maroloana, corridor forestier, alt 900m, P= 1900 mm	Kr % P en t.ha ⁻¹ .an ⁻¹	6,2 ε	13,2 4,6	>6 ε	9,2 0,9	-
Brand, Rakotovoao (1997) pp13.51	Mesures à l'exutoire de parcelles de 20 m pendant deux ans.	Beforona (30 km d'Andasibe), terroirs, altitude 300-800 m, P=2800 mm	Kr % P	1 ε	19,0 14,6	7 ε	-	19 144

* Kr= Taux annuel de ruissellement ; P= Pertes en terre annuelles

Quoi qu'il en soit, l'érosion moyenne sur système *tavy* reste toujours modérée, à l'échelle d'un cycle complet (1,5 à 4 t/ha/an, soit 0,1 à 0,25mm de sol/an), certes supérieure à un système agroforestier bien protégé (0,9 t/an/ha) mais très inférieure à une culture labourée et sarclée à jachère courte (50 t/ha/an). Le travail du sol le rend sensible à l'érosion ravinante et ces cultures présentent une mauvaise couverture (le gingembre ne couvre encore que partiellement le sol à la récolte). De plus, le *tavy* pourrait être amélioré : des jachères alternant avec des cultures sur la pente pourraient récupérer une partie des matériaux déplacés, comme le fait le système à andains.

Cet exemple illustre l'importance à accorder aux états réels des milieux étudiés, ce qui ne peut se faire que sur la base d'un diagnostic local après zonage.

3. Zonage de la région du corridor de Fianarantsoa

Zonage sous-régional

La région du corridor est marquée par une rapide variation de milieux physiques et de climats qu'accompagne une variation de sociétés humaines (figure 1). De l'Ouest élevé (climat frais) à l'Est (basses terres, climat chaud), citons :

L'Ouest

– la **lisière des savanes Betsileo** (collines pâturées, brûlées et cultivées en cultures sèches, et bas-fonds rizicoles), à forte densité de population, alt. 1000 m, P=1500 mm. Morphologiquement, il s'agit d'une surface d'aplanissement fini tertiaire disséquée sur gneiss (1000 m), au relief émoussé (croupes basses et allongées séparées par de larges bas-fonds rizicoles, sommets à sols ferrallitiques remaniés et à structure dégradée sous prairie, pentes à sols tronqués « pénévoulés », bas de pentes à sols développés sur des colluvions ou sur la base des altérations encore riches en minéraux primaires), pentes : 20-30°

– la **partie ouest habitée du corridor forestier** à 1200 m d'altitude, sous 2 000 mm de pluies, l'humidité freinant la progression des feux. Succédant aux basses collines sur *gneiss*, vient un talus de raccord à relief juvénile (fortes pentes), avec des sols de nature variée (associations de sols ferrallitiques typiques, de sols tronqués « pénévoulés », de sols peu évolués, de sols à carapace gibbsitique) ; couvert d'une mosaïque de forêts reliques, jachères arbustives, vergers et parcelles cultivées intensivement en cultures labourées alternant avec des jachères herbacées, et aménagées en banquettes. A l'Est de ce talus, vient une surface d'aplanissement méso-tertiaire disséquée sur granitoïdes (1200 m) et portant souvent sur pente des sols pénévoulés tronqués, faisant affleurer parfois la roche mère. Cette surface est encore en majeure partie forestière, en jachère ou en fourrés à Fougères et Ericaées dans les zones anciennement gérées en pâturage par des feux.

L'Est

– la **partie est presque inhabitée du corridor forestier**, sous 3 500 mm de pluies, impropre au riz pluvial et sans bas-fonds, non brûlée, à 1 100 m d'altitude,

– le **grand escarpement Tanala**, couvert de nuages et exposé aux vents d'Est, qui aggravent la baisse de température altitudinale, où la forêt apparaît à la cote 800 m environ, sous l'effet de systèmes de cultures de pente (riz, manioc, haricot, bananier) qui perdent de l'intérêt au dessus de ce niveau. Sur cet escarpement, aux sols peu évolués dans les éboulis s'associent des sols rajeunis sur pente.

– La **lisière Tanala**, peuplée, à 600 m d'altitude (plus chaud), sous 3 000 mm de pluie, constituée d'un semis de collines à pentes fortes et rectilignes et arêtes étroites (relief juvénile « polyédrique ») et étroits bas-fonds. Les pentes sont cou-

vertes de grandes parcelles de riz sur brûlis, manioc sur précédent riz, et jachères *kapoka* à sous-arbustes, forêts sommitales et caféières en bas de pente.

Zonage local

À l'Ouest du corridor, la variabilité des situations porte surtout sur l'éloignement au corridor et à la dynamique des forêts artificielles (certaines étant maintenues, d'autres défrichées). À l'Est du corridor, c'est l'ancienneté de la déforestation (fortement liée au dynamisme de population de chaque village) et la distance aux voies de communication qui sont des causes de variabilité des situations.

4. Caractériser l'érosion potentielle et réelle par zone, en regard du milieu et des pratiques paysannes.

Par des mesures physiques, recherche de symptômes sur transects et parcours systématiques, étude des pratiques de gestion des terres dans le temps et dans l'espace à plusieurs échelles (exploitation, versant, territoires villageois), on cherche ici à établir un constat sur les phénomènes érosifs et à en identifier des causes parmi les modes de gestion des terres.

Les terrains et leur susceptibilité

À l'Ouest

Sur 15 profils réalisés sous diverses végétations, tous les horizons A étudiés ont un taux de matière organique supérieur à 5 % considéré parfois comme un seuil d'érodibilité négligeable. (Bouchard, 1966). Sauf exceptions, les indices de structure mesurés (I_s Hénin $< 0,5$) et calculés sont effectivement « exceptionnels » à « très bons ». Les sols forestiers de la station voisine d'Ampamaherana ont une érodibilité $K = 0,03$, classée comme « très résistant à l'érosion », mais il est précisé que cette résistance s'estompe rapidement en cas de mise en culture renouvelée. Ces sols de texture sablo-argileuse (Sa) à As en surface ont une excellente porosité ($> 60\%$) et une infiltrabilité de surface le plus souvent supérieure à 500 mm/h. En revanche l'horizon B est marqué une fois sur deux d'une très faible infiltrabilité (proche de 0) que l'on peut relier à une texture « argile sableuse », à $I_s > 0,5$, à une faible teneur en MO, et une structure peu marquée. L'absence de pellicules de battance dans les cultures sur brûlis montre que seul peut se produire un ruissellement d'engorgement dès que l'horizon A est saturé (contenant maximal sur 30 cm : 180 mm, donc le ruissellement peut commencer à partir de 60 à 120 mm de pluie cumulée selon l'état d'humectation préalable du A et l'importance de l'enracinement ligneux). C'est la saturation du A qui provoque les ruissellements. C'est donc plus l'intensité journalière qui joue, compte tenu de la mauvaise perméabilité des horizons B. En revanche un tel ruissellement n'est pas forcément suivi d'érosion sur les parcelles végétalisées ou même en défriche-brûlis. En revanche sur les parcelles plusieurs fois cultivées et surtout labourées (patates, haricots, manioc peuvent être peu couvrants en février mars sur les parcelles tardi-

ves) s'observent des symptômes de dégradation structurale de surface. Mais elles sont aménagées pour en réduire les conséquences en matière de ruissellement et érosion (rigoles, banquettes).

Globalement, ces indices montrent une faible érodibilité des sols, une couverture végétale dense, et une susceptibilité au ruissellement réduite aux parcelles labourées suivies de longues périodes pluvieuses, susceptibilité limitée par les mesures préventives des paysans.

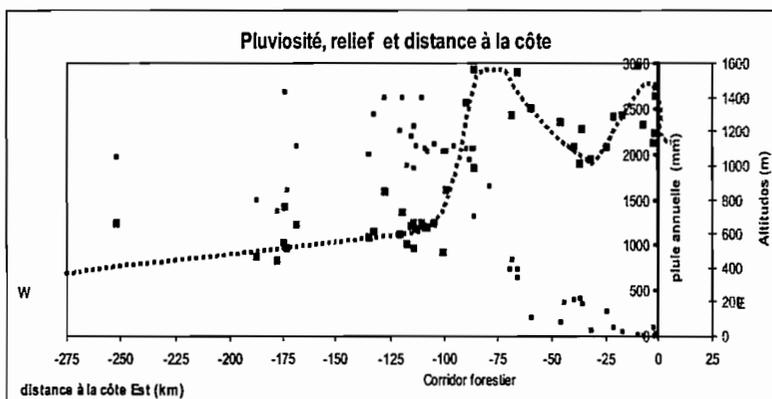
À l'Est, il n'y a pas de différence significative de part et d'autre du corridor en matière d'infiltrabilité. L'infiltration à travers les horizons B dépend des fissures (autour des racines d'arbres). Les horizons A et B sont plus épais qu'à l'Ouest. On trouve aussi de nombreux cas de troncature haute (A absent ou « sols rajeunis »), signalant des glissements de terrain relativement récents même sous forêt. Cette région se caractérise en effet par l'instabilité des pentes fortes (30 à 40°), leur état meuble et humide toute l'année, et l'existence de ruissellements généralisés qui réclame une couverture végétale dense et un « filet de sécurité » de racines d'arbres.

La principale différence entre les deux côtés du corridor tient plutôt aux pentes (20° à l'Ouest ; 40° à l'Est) ainsi qu'à la faible cohésion du sol et du sous-sol, toujours meubles à l'Est, plus cohérents à l'Ouest.

Le climat et son agressivité

La figure 1 replace la zone du corridor dans la pluviosité régionale. Le corridor correspond précisément à une zone de rupture climatique, touchant à la fois à la température (altitudes) et à l'humidité.

Figure 1.



Le tableau 2 résume les données disponibles sur les caractères climatiques et met en évidence une très forte agressivité climatique à l'Est, plus marquée par les cyclones et leurs pluies de longue durée que l'Ouest.

Tableau 2. Comparaison des risques de pluviosité de part et d'autre du corridor.

	Ouest	Est
Pluie annuelle	1600 mm (Ampamaherana)	3000 mm (Tolongoina)
Erosivité (Malvos <i>et al.</i> , 1976)	476 (Ampamaherana)	975 (Toamasina)
Intensité max en 15mn de fréquence annuelle (Chaperon <i>et al.</i> , 1993)	100 mm/h (Fianarantsoa)	92 mm/h (Mananjary)
Fréquence inter-annuelle des pluies cycloniques de >120 mm/j (Chaperon <i>et al.</i> , 1993)	0,8 années sur 10 (Fianarantsoa)	4,4 années sur 10 (Ifanadiana)

Symptômes constatés et pratiques antiérosives

À l'Ouest, les symptômes constatés et spatialisés d'érosion en masse sont très rares et limités à la zone du talus de raccord 1000-1200 m sur des pentes de 50°. Seules les parcelles plusieurs fois remises en culture depuis le tavy initial montrent des indices de ruissellement et d'érosion nets, mais limités par les banquettes et rigoles réalisées dès le début du labour, au bout de 3 cycles culture-jachère généralement. Le labour répond à une détérioration de l'état structural. Il limite le ruissellement mais accroît certainement le risque érosif. Des griffes et petites ravines sont visibles sur certaines banquettes lorsque les dispositifs paysans de déviation des ruissellements entrants et de correction de pente ont été dépassés par un événement pluvieux sur un champ récemment travaillé. Mais cette occurrence est rare à l'échelle d'un terroir, compte tenu du grand étalement des travaux et de la taille réduite des parcelles travaillées.

Outre une pluviométrie moindre, les pentes moyennes, la nature moins meuble du profil (existence d'une saison sèche), sont des atouts pour limiter fortement les risques d'effondrement ou de glissements qui restent exceptionnels, et autorisent donc les aménagements en banquettes sans risque.

À l'Est

En pays Tanala, l'essentiel des symptômes constatés ou déclarés est représenté par des glissements de terrain dans les zones défrichées, et par des glissements de terrain et une érosion en nappe (surtout sur les terres appauvries et dans le manioc récolté en saison sèche qui perturbe le sol) dans les vieux terroirs. En dehors de l'absence de labour et de la remise en jachère rapide, qui sont de sages précautions en soi, les paysans ne réalisent pas d'aménagements particuliers sur les pentes, excepté qu'ils couvrent les sols désherbés de lits de fougères. Les Betsiléo qui s'installent en pays Tanala ne font rien de plus, alors qu'ils font des banquettes à l'Ouest. Seules des zones peu pentues sont cultivées en gingembre sur banquettes labourées.

Les observations et enquêtes effectuées dans cette région écologiquement sensible permettent donc de fortement relativiser le phénomène d'érosion dans les terroirs récemment défrichés en gestion « cultures temporaires sans travail du

sol ». Il s'agit bien d'une gestion prudente. Les banquettes et rigoles ne sont réalisées que sur les milieux les moins sensibles aux mouvements de masse (Ouest, faibles pentes à l'Est). Mais ce diagnostic s'aggrave dans les vieux terroirs, les terrains étant plus érodibles. La question se pose donc des limites de ces pratiques préventives au delà d'une certaine intensité d'exploitation, c'est-à-dire au-delà d'une certaine densité de peuplement.

5. Enquêtes sur les savoirs sur l'érosion, et sur sa gestion par l'ensemble des paysans et des intervenants extérieurs

Il s'agit d'abord de caractériser le degré de sensibilisation des paysans sur les phénomènes érosifs et d'identifier les objectifs (y-a-t-il une gestion propre de l'érosion ou un simple évitement ?) et les conditions (notamment les coûts et les bénéfices) des pratiques liées à cette gestion. On étudie pour cela temps de travaux, organisation des travaux, discours des paysans, discours et actions des intervenants extérieurs, degré d'adoption de nouvelles idées techniques.

Les deux côtés du corridor, un système élaboré de termes vernaculaires (généralement différents) s'applique à toutes les facettes du problème de la gestion des sols : types de pentes, types de sols, facteurs du ruissellement, de l'érosion en nappe, en ravine ou en masse, durées de jachères nécessaires en fonction des cas de figure, utilité et nécessité d'un aménagement physique, révélant des savoirs élaborés. On a même identifié à l'Est un qualificatif pour des phénomènes peu connus dans la littérature scientifique, tels que les *longeona*, phénomènes de pertes, drains souterrains et résurgences de *ranovohitra* (ruissellements) liés probablement à des macro-chenaux biologiques, et facteurs déclenchants de certains mouvements de masse.

Côté Ouest, les aménagements physiques effectués localement traditionnellement (**épierrage, rigoles, banquettes ou rideaux, terrasses**) sur de petites surfaces demandant un investissement raisonnable et surtout progressif sont finalement peu différents en terme d'efficacité apparente et de coûts réels que les propositions standard des intervenants en matière de lutte antiérosive « en courbe de niveau » dans cette même région, et sont donc redondantes. Il faut excepter les nouvelles grandes parcelles de manioc réalisées sur d'anciens reboisements sur pentes plus fragiles, qui appellent effectivement un appui en organisation et en moyens. Il apparaîtrait cependant que les pratiques paysannes actuelles portent souvent la marque de programmes d'appui menés anciennement (plantations agroforestières, modelés particuliers), ce qui appelle une évaluation spécifique pour en saisir l'impact et l'utilité finale.

Côté Tanala, les principaux appuis concernent la couverture des talus de chemin de fer par le vetiver et des fruitiers (technique bien adoptée grâce à un encadrement rapproché et des incitations financières), l'agro-foresterie sur des espaces privilégiés. Aucune véritable alternative aux *tavy* sur jachères si décriés n'est encore proposée. La question de l'érosion des pentes ne manquera pas de s'aggraver avec la réduction de l'espace affecté à l'agriculture dans les villages

encore forestiers (mesures de conservation) et par la croissance de population dans les villages non forestiers.

6. Conclusion

En zone Est Corridor, sur pentes, le système *tavy*, même dans les vieux terroirs, resterait donc un moindre mal eu égard aux systèmes de culture labourés (gingembre, etc), lesquels exigent des situations particulières (zones de replats ou bas-versants protégés) doublés de précautions techniques (mini-parcelles, pentes faibles et banquettes, haies de fixation des talus, couvertures, fumiers) déjà vulgarisées ou en voie de l'être. Les deux systèmes ne peuvent donc pas être substitués sur les mêmes sites, ils se complètent dans le paysage bien plus qu'ils ne s'opposent.

En prévision cependant d'un accroissement de la pression sur la terre, liée aux mesures de conservation forestière et à l'accroissement démographique, de nouvelles idées techniques ou organisationnelles sont attendues et les paysans ne seront évidemment pas en reste dans leur élaboration, soit comme innovateurs indépendants, soit comme testeurs d'idées exogènes, ce qui appelle des recherches dans ces deux directions.

À l'Est, le système *tavy* des pentes, pour l'instant au coeur de la subsistance (Nambena, 2002) et moins risqué (en cas de cyclone, le riz de *tavy* est moins endommagé que les rizières, Brand, 1997), devra trouver une réelle alternative qui ne fasse appel ni au labour, ni au terrassement (risques d'effondrements), ni aux rigoles de drainage (risques d'érosion linéaire). Dans l'attente de ces nouveaux thèmes, ce système simple et bien connu ne peut être abandonné sans importants coûts sociaux. Une diversification alimentaire (banane plantain, patate, sorgho), de l'élevage (porcs, volailles), de l'arboriculture de pente (alimentaire et monétaire) et une amélioration culturale rizicole tant en plaine que sur pentes (engrais à diffusion lente, parcelles plus petites et alternant avec les jachères, pour la récupération de sédiments, variétés à meilleur enracinement) seraient des pistes de travail. Elles requièrent, outre des études techniques, non seulement le volontarisme des paysans et de leurs appuis mais un meilleur environnement commercial, auquel il manque visiblement une agence de régulation, et un élargissement spatial des filières de commercialisation du matériel végétal amélioré et des produits de l'arboriculture. Elles sont encore trop inféodées à des bassins de production spécialisés, dans l'ancienne tradition de l'économie de plantation, et dès lors trop soumises aux risques du marché.

Remerciements à Bruno Ramarozana, Jean-Louis Rakotomanana et Danièle Ramiamanana du Fofifa, qui ont appuyé les études des sols et l'encadrement des stagiaires.

Références bibliographiques

- ANDRIANOMANANA, M., RAKOTOROA, P., RAHARINAIVO, R., 1996, *Bilan-Évaluation des projets de conservation des sols de la région de Beforona*, document PCS, ANAE-CIRAD-FOFIFA, Antananarivo
- BAILLY, C., COGNAC, B. DE, MALVOS, C., NINGRE, J.-M., SARRAILH, J.-M., 1976, « Étude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar, Expérimentation en bassins versants élémentaires », *Cahiers scientifiques, Bois et Forêts des Tropiques*, n° 4, Nogent sur Marne, CTFT, 114 pp.
- BARTHES, B., ROOSE, É., 2001, « La stabilité de l'agrégation, Un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles », *Cahiers Agriculture*, n° 10, 185-193
- BLANC-PAMARD, C., ANDRIANTSEHENO, D., RAKOTO RAMIARANTSOA, H., *Foncier et Territoires, entre pouvoirs locaux et politiques publiques environnementales, Pratiques, acteurs, enjeux (corridor betsileo, Madagascar)*, GEREM IRD-CNRE, CNRS-EHESS-CEAF, ICOTEM, IRD Ur 168, 162 pp. + ann
- BOUCHARD, L., 1966, *Étude pédologique de la région d'Alakamisy-Ambohimaha, Pce de Fianarantsoa*. rapport de stage ORSTOM, Antananarivo, 105 pp.
- BOURGEAT, F., VAN NHAN, H., VICARIOT, F., ZEBROWSKI, C., 1973, « Relations entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les Hautes Terres malgaches », *Cahiers ORSTOM Biol.*, 19, 23-41
- BOURGEAT, F., 1972, *Sols sur socle ancien à Madagascar, Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire*, mémoire ORSTOM n° 57, Paris, Orstom, 335 pp.
- BRAND, J., 1997, « Impact des cyclones », in *Cahiers Terre-Tany*, n° 6, FOFIFA-GDE/GIUB, Antananarivo-Berne, 19-33
- BRAND, J., 1997, « L'agroclimat et le cycle de l'eau », in *Cahiers Terre-Tany*, n° 6, FOFIFA-GDE/GIUB, Antananarivo-Berne, 19-33
- BRAND, J., RAKOTOVAO, W. L., 1997, « Dégradation des sols », in *Cahiers Terre-Tany*, n° 6, FOFIFA-GDE/GIUB, Antananarivo-Berne, 19-33
- CHAPERON, P., DANLOUX, J., FERRY, L., 1993, *Fleuves et Rivières de Madagascar*, Paris, IRD, 874 pp.
- COADOU LE BROZEC, E., 2004, *Diagnostic du risque érosif et de sa gestion au regard des pratiques paysannes, Etude menée aux lisières du corridor forestier de Fianarantsoa*, Madagascar, mémoire de DESS, Université Paris-XII, 71 pp.
- COIGNAC, B., BAILLY, C., MALVOS, C., HUEBER, M., RAMANANDRAY, F., 1973, « Essai d'aménagement des terres dans la zone forestière de l'Est de Madagascar, Expériences des villages de Marofala et Andranomody », *Bois et Forêts des tropiques*, n°152, nov.-dec.
- FOURNIER, J., SERPANTIE, G., DELHOUME, J.-P., GATHELIER, R., 2001, « Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina, Application à la gestion des terres cultivées », *Sud Sciences et Technologies*, EIER Ouagadougou, 5, pp. 4-15
- LEMALADE, J.-L., 1997, *Aperçu historique et spatial des opérations et projets de conservations des sols à Madagascar depuis 1950*, 65 pp., document PCS, ANAE-CIRAD-FOFIFA, Antananarivo
- LOCATELLI, B., 1996, *Les déterminants des pratiques paysannes relatives à l'érosion hydrique : étude comparative en milieu rural à Madagascar*, rapport de mission, CIRAD, Antananarivo, 69 pp.
- MALVOS, C., SARRAILH, J.-M., BAILLY, C., RAKOTOMANANA, J.-L., 1976, *Étude de la susceptibilité à l'érosion des sols de Madagascar, Expérimentations en parcelles élémentaires*, CTFT, Centre national de la recherche appliquée au développement rural, 37 pp.
- MARTIN, P., PAPY, F., SOUCHERE, V., CAPILLON, A., 1998, « Maîtrise du ruissellement et modélisation des pratiques de production », *Cahiers Agricultures*, n° 7, pp. 111-119
- MOREAU, S., 2002, *Les Gens de la lisière. La Forêt, l'Arbre et la Construction d'une civilisation paysanne Sud-betsileo, Madagascar*, thèse géographie, Univ. Paris-X, France, 2002, 667 pp.
- NAMBENA, J., 2002, *La Subsistance des ménages dans la région de Beforona*, thèse, Université Heidelberg
- PETIT, M., 1998, *Présentation physique de la grande île de Madagascar*, ACCT-FTM, 192 pp.
- RAKOTO RAMIARANTSOA, H., 1995, *Chair de la terre, œil de l'eau, Paysanneries et Recompositions de campagne en Imérina (Madagascar)*, Paris, IRD, coll. « À travers champs »
- RAKOTOMANANA, J.-L., 1987, *Climat, Érosion et Techniques culturales sur les hauts plateaux de Madagascar*, Centre national de recherche appliquée au développement rural, département de recherches forestières et piscicoles, n° 580, 16 pp.
- ROOSE, É., 1994, « Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité

des sols (GCES) », *Bulletin pédologique de la FAO*, n° 70, Rome, 420 pp.

ROOSE, É., SARRAILH, J.-M., 1990, « Érodibilité de quelques sols tropicaux, Vingt années de mesure en parcelle d'érosion sous pluies naturelles », *Cahiers ORSTOM Pédol.*, vol. XXV, n° 1-2, pp. 7-30

SERPANTIE, G., LAMACHERE, J.-M., 1992, « Contour stone bunds for water harvesting on cultivated land in the north Yatenga region of Burkina Faso », in *Érosion, conservation and small-scale farming*, Hurni, H., Tato, K., (6th International conf. held in Ethiopia and Kenya, 6-18th nov. 1989, 459-469)

SHOONMAKER FREUDENBERGER, K., 2003, « Vetiver victorious, The systematic use of vetiver to save Madagascar's FCE railway », *Technical bulletin*, n° 2003.2, Pacific rim Vetiver Network, 16 pp.

SHOONMAKER-FREUDENBERGER, K., RAVELONAHINA, J., WHYNER, D., 1999, *Le Corridor coincé*, LDI, Fianarantsoa, Madagascar, 56 pp.

TASSIN, J., 1995, « La protection des bassins-versants à Madagascar, Bilan des actions conduites dans la région du lac Alaotra ». *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 246, pp. 7-22

Étude de l'érosion hydrique au service de la lutte antierosive en Équateur

GERMAN TRUJILLO¹, GEORGES DE NONI²

¹min. Agriculture, avenue Amazonas et Eloy Alfaro, Quito, Équateur,
Courriel : german_trujillo_yandum@hotmail.com

²Directeur du centre IRD, B. P. 64501, F 34394 Montpellier,
Courriel : denoni@mpl.ird.fr

1. INTRODUCTION

L'Équateur est situé sur la façade pacifique du continent sud-américain et couvre une superficie de 270 670 km² avec une population d'environ 12 000 000 d'habitants. Le pays est traversé par la cordillère des Andes, appelée *sierra*, et s'étend de part et d'autre de la ligne équatoriale sur 1° 25' de latitude au Nord et sur 5° de latitude au Sud. Il est limité au Nord par la Colombie et, au Sud et à l'Est, par le Pérou.

Comme dans la plupart des pays en voie de développement, l'agriculture a été de tous temps pour l'Équateur l'activité principale qui a assuré la survie des populations. Malgré les initiatives de l'État pour diversifier l'activité économique d'une population en forte croissance démographique, la production agricole reste dominante et le pays n'a d'autre recours que de puiser encore dans les potentialités offertes par la ressource sol, augmentant ainsi les risques d'accélération de l'érosion.

2. ÉTUDE DE L'ÉROSION DES SOLS CULTIVÉS EN ÉQUATEUR

Cette étude a été réalisée suivant les deux approches suivantes :

- i) une approche qualitative pour établir un inventaire des dynamiques dominantes : typologie et extension spatiale,
- ii) une approche quantitative pour mesurer la gravité des dynamiques sur quelques sites représentatifs, choisis sur la base des résultats de l'approche qualitative. L'objectif était d'identifier des projets-pilotes pouvant servir d'exemples pour informer et former le paysannat local à la lutte antiérosive.

L'approche qualitative : une carte des principales dynamiques érosives affectant les zones agricoles du pays a été dressée à l'échelle de 1/1 000 000 (Almeida,

De Noni *et al.*, 1984). Cette carte souligne l'ampleur de l'érosion dans la *Sierra*. Elle montre que les dynamiques érosives forment un réseau dense de manifestations à l'intérieur de la *Sierra*, plus précisément dans la dépression inter-andine. Ce réseau est plus diffus sur les hautes terres et sur les versants externes moins peuplés. Globalement, les empreintes de l'érosion semblent plus denses dans la *Sierra* nord et centre, domaine des roches pyroclastiques, qu'elle n'est dans la *Sierra* méridionale non volcanique.

Trois dynamiques principales ressortent et révèlent l'influence de l'érosion hydryque concentrée dans la *Sierra*, ce sont :

- le ruissellement concentré relayé spatialement par le ruissellement diffus,
- les mouvements de masses relayés par le ruissellement concentré,
- et le ruissellement concentré relayé temporellement par l'érosion éolienne.

À côté des formes de ravinement classiques (rigoles, ravines, *bad lands*), l'érosion concentrée se distingue par sa capacité à faire affleurer en surface, sur de grandes étendues, une formation volcanique indurée très originale, typique en région andine, la *cangahua*, matériau peu perméable, très ruisselant et stérile pour l'agriculture.

L'approche quantitative : grâce aux enseignements de cette carte, 7 sites représentatifs ont été choisis dans la *Sierra* : Tumbaco, Cangahua, Mojanda, Riobamba dans la *Sierra* pyroclastique, Jadan et Vega Grande dans la *Sierra* non volcanique du Sud et Ventanas sur le piedmont du versant externe côtier. Sur chaque site, un couple de parcelles de ruissellement conventionnelles (cuves de récupérations des eaux + pluviographes), situés chez le paysan, a été installé pour mesurer l'érosion. Les parcelles ont 100 m² (20 x 5m) de surface ; l'une (témoin cultivé) est travaillée et cultivée selon les pratiques locales ; l'autre (témoin non cultivé) est travaillée mais ne porte ni végétaux ni culture.

Les valeurs moyennes par site des coefficients de ruissellement (Kram %) et de l'érosion (E en t .ha⁻¹.an⁻¹), pour une période de cinq ans, montrent que les pertes en eau et en terre sont élevées, notamment sur les parcelles témoins non cultivées : Kram > 10 % et perte en terre de l'ordre de 100 t.ha⁻¹.an⁻¹ (De Noni, Viennot, Trujillo, 1986).

Concernant les causes de l'érosion, la pente et l'homme jouent un rôle déterminant.

Pour la pente, les données chiffrées obtenues sur les parcelles de ruissellement montrent clairement son rôle. Les seules régressions satisfaisantes ont été obtenues en corrélant les valeurs globales d'érosion sur les sept stations et l'inclinaison de leurs pentes. Elles montrent qu'il existe une dépendance fonctionnelle entre les deux variables, l'érosion croissant de façon linéaire avec l'inclinaison de la pente. Plus de 60 % des variations de l'érosion s'expliquent par les variations de l'inclinaison de la pente ($r = 0,78$, signification au seuil de 1%). Cette conclu-

sion rejoint un certain nombre de travaux, notamment ceux de Poesen (1987), Lal (1988), Roose (1977, 1994), qui montrent également que l'érosion croît avec l'inclinaison de la pente car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15 %, ce qui est bien le cas des sept stations étudiées.

Le rôle de l'homme se détache aussi des autres facteurs. En effet, en superposant à la carte des pentes, une carte de densités de population et une carte des grands types d'occupation du sol, un certain nombre d'informations ressortent :

- i) Les densités de population les plus fortes, comprises entre 80 et 150 hab./ km² se situent principalement dans les zones où les classes de pentes sont comprises entre 25 et 40 % et supérieures à 40 %.
- ii) Ces densités de populations correspondent à des milieux où l'occupation des sols est consacrée à l'agriculture alors que, paradoxalement, les pâturages se situent sur les meilleures terres (< 12 % de pente), en général dans les fonds de vallée. Il s'agit d'un petit paysannat appelé *minifundio*.

Progressivement, le *minifundio* a créé sur les versants un damier très dense de petites parcelles de cultures, consacrées principalement à l'autosubsistance (orge, fève, pomme de terre). L'élevage est peu répandu : son développement est limité tant par le manque de capitaux nécessaires au paysan pour acheter des bêtes que par l'exiguïté des parcelles. Les surfaces cultivées sont en général inférieures à 20 ha, la taille moyenne étant de l'ordre de 5 ha et la parcelle unitaire dépasse rarement 1 ha. Il n'y a aucune limite d'altitude ni de pente pour cultiver si ce n'est l'absence de sol sur le versant. (De Noni, Viennot, Trujillo 1990).

3. LA LUTTE ANTI ÉROSIVE

Les approches qualitatives et quantitatives ont apporté les éléments clés pour entreprendre la lutte antiérosive sur l'un des 7 sites de parcelles étudiées.

Le site de Mojanda a été retenu pour les raisons suivantes :

- i) c'est un milieu d'altitude (3 300 m) qui a connu un développement important du *minifundio* au cours des trente dernières années,
- ii) l'occupation des sols est dense et les pentes sont fortes (de l'ordre de 40 %)
- iii) le sol dominant est un andosol hydraté saturé, argilo limoneux, de 1,6 à 0,8 m d'épaisseur où l'érosion a formé localement un ravinement profond.

Afin de se rapprocher le plus possible des réalités de terrain et d'intégrer la population du *minifundio* dans une action participative forte, notre action s'est appuyée sur les deux points suivants :

- i) choix de méthodes conservatoires simples, efficaces et adaptées au contexte socioéconomique local. Les enquêtes réalisées sur le site révèle l'absence de stratégie locale, aussi des ouvrages simples, disposés perpen-

diculairement à la plus grande pente, ont été envisagés pour freiner l'énergie du ruissellement et le transfert de l'eau, l'objectif étant de favoriser la formation progressive de « pseudo terrasses » tenant compte de l'importance du facteur « pente ». L'environnement étant dépourvu de pierres, en raison de l'importante couche de pyroclastiques, les agriculteurs utilisent la bande enherbée ou le muret formé de mottes de terre et d'herbe avec racines (*chambas* dans le langage local) pour cloisonner leurs parcelles. On s'est donc inspiré de cette tradition locale.

-ii) tester expérimentalement l'efficacité de ces méthodes, avec le concours du paysan. De nouvelles parcelles de ruissellement (parcelles améliorées), plus grandes (50 x 20 m), ont été installées pour tester les méthodes conservatoires et placées à côté des premières parcelles témoins afin de mesurer l'érosion et de pouvoir comparer les résultats entre parcelles. Deux parcelles améliorées ont été construites à Mojanda : l'une avec des murets de mottes d'herbe qui, retournées et empilées, ont permis de créer des terrasses perméables de construction progressives et l'autre, avec des bandes enherbées qui ont évolué, peu à peu, en terrasse.

Après cinq années de mesures, les résultats obtenus sont très encourageants par rapport à ceux enregistrés sur les parcelles témoins : Kram < 0,2% et érosion < 0,3 t.ha⁻¹ (De Noni, Viennot, Trujillo, 1990b)

Néanmoins, notre action ne s'est pas limitée à la seule prise en compte de l'évaluation des pertes en eau et en terre elle a pris en compte d'autres éléments indispensables à la réussite d'une stratégie antiérosive, notamment au plan de la sensibilisation du paysannat concernant :

– le coût d'installation et d'entretien des ouvrages. Pour les cinq années culturelles considérées, ce coût, estimé à 250 euros par hectare, est relativement bas et adapté aux conditions économiques du paysannat local.

Selon la dureté des matériaux utilisés pour la construction du talus, il faut compter 3 à 5 hommes/jours/ha. Noter que selon une tradition ancestrale (inca) la participation communautaire aux gros travaux de terrassement est habituelle. Le coût des engrais et semences sélectionnées est amorti par le prêt bancaire aux familles qui est de l'ordre de 150 euros par famille. Deux éléments principaux ont permis d'obtenir ce résultat : d'une part, les ouvrages évoluant progressivement et naturellement en pseudo terrasses, le temps de travail consacré par l'agriculteur à ce type d'activité est minimal ; d'autre part, l'utilisation exclusive de matériaux autochtones revient à un coût très bas et permet à l'agriculteur d'acquérir rapidement la maîtrise nécessaire pour construire ces ouvrages.

les rendements : la récolte de pommes de terre a été multipliée par 2 et celles de fève par 4. Cette évolution permet ainsi au paysan de sortir du cadre restreint de l'autosubsistance et de s'insérer à l'économie local du marché.

Notre action s'est terminée à Mojanda par une application de notre stratégie hors du cadre expérimental pour tester sa faisabilité en vraie grandeur. Une tren-

taine de familles ont participé à l'opération définie par les règles suivantes :

- une somme d'argent remboursable au bout d'une année selon un taux d'intérêt faible (10 %, les taux locaux étant supérieurs à 50 %), de l'ordre de 150 euros, était prêtée à chaque famille afin d'améliorer la qualité des intrants (achat de semences améliorés, d'engrais etc. ...),
- pour accéder à ce prêt et démontrer ainsi leurs motivations, les paysans s'engageaient volontairement à installer sur leurs parcelles les ouvrages conservatoires testés sur le site.

Au bout de deux années de suivi, on constatait que les agriculteurs géraient sans problème particulier les ouvrages conservatoires, qu'ils étaient satisfaits des rendements obtenus et qu'ils respectaient avec régularité les échéances de remboursement du crédit. Cet exemple, qui a connu un vif succès, montre que les paysans peuvent s'intégrer positivement à une opération de conservation des sols, sur la base d'une concertation entre les différents acteurs : agriculteurs, techniciens, chercheurs et responsables politico-économiques.

4. CONCLUSION

De nombreux programmes de conservation des sols connaissent un taux important d'échecs (Hudson, 1991) parce qu'ils délaissent l'étude des véritables causes de l'érosion et parce qu'ils sont fondés sur l'introduction de pratiques extérieures à la région, minimisant ainsi la participation du paysannat. En contrepartie, notre recherche montre qu'on peut arriver à de bons résultats en s'appuyant sur les données de la recherche et sur les usages et traditions locales. Il devient alors possible de conduire en vraie grandeur un programme concerté entre les différents acteurs, avec la participation centrale des paysans

Références bibliographiques

- ALMEIDA, G., DE NONI, G., NOUVELOT, J.F., TRUJILLO, G., WINCKELL, A., 1984, *Los principales procesos erosivos en Ecuador*, PRONAREG – PRONACOS – ORSTOM, Quito, 31 pp., avec une carte (2 couleurs) à l'échelle de 1/1 000 000
- DE NONI, G., TRUJILLO, G., VIENNOT, M., 1986, « L'érosion et la conservation des sols en Équateur », *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, 22, 2 : 235-245
- DE NONI, G., TRUJILLO, G., VIENNOT, M., 1990 b – Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Équateur, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, vol. XXV, n° 1-2, pp.183-196
- HUDSON, N.W., 1991, « A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects », *FAO Soil Bulletin*, n°64, Rome, 65 pp.
- LAL, R., 1988, *Soil erosion research methods*, Soil and water conservation society (Ankeny, Iowa – USA) and Soil conservation and environment international society of soil science (Wageningen, Pays Bas), 244 pp.
- POESEN, J., 1987, « The role of slope angle in surface seal formation », in V. Gardner (edit.), *International Geomorphology II*, pp. 437-448
- ROOSE, É., 1977, *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest ; Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*, « Travaux et documents de l'ORSTOM », Paris, n° 78, 108 pp.
- ROOSE, É., 1994, Introduction à la GCES, *Bull. Pédologique FAO*, n° 70, Rome, 420 pp.

Ruissellement, érosion et gestion conservatoire des andosols : cas des systèmes cultureux en Équateur et en Martinique

**BOUNMANH KHAMSOUK¹, GEORGES DE NONI²,
ÉRIC ROOSE², MARC DOREL³**

¹BANALLIANCE, rue L.-G. Damas, 97232 Lamentin, Martinique,
Courriel : benoit@banalliance.com

²IRD, B. P. 5 045, 34032 Montpellier, France,
Courriels : denoni@mpl.ird.fr ; roose@mpl.ird.fr

³CIRAD Neuf Châteaux, 97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe,
Courriel : marc.dorel@cirad.fr

Abstract

Because of their remarkable physico-chemical properties, Andosols are considered generally as fertile soils, well aggregated and very resistant to water erosion. Nevertheless recent measurements in cropped Andosols under bananas plantations in Martinique island and food crops in Ecuador steeplands have shown that its is necessary to moderate this opinion. Field studies with runoff plots were installed in volcanic steeplands which are densely covered with crops : (i) – In Martinique, ten runoff plots (100-200 m²) are set up in a banana plantation located on a clay volcanic Nitisol on 10-25-40 % slopes ; (ii) - in Ecuador, six runoff plots (100-1000 m²) on 20-40 % slopes were installed in the farmers fields with traditional crop rotation (barley, beans, potatoes) on a volcanic Mollisol. In each situation, under well mulched crops and soil conservation's practices (grass strip, stones bunds), runoff and erosion were negligible, but as soon as soils are denuded and compacted by grazing or by farmers or desiccated by the sun, it was observed in each situation moderate increase of runoff (10 to 30 % of the rain amount) and severe erosion up to 150 t.ha⁻¹.year¹.

Looking to soil surface features, it was observed very few sealing crust, very stable aggregates but high susceptibility to compaction. As soon as fields have more than 15% slope, runoff is collected in rills and gullies. Erosion is not a selective process because runoff is able to take off aggregated topsoil as a whole. In opposite to general opinion runoff does not increase with the slope steepness but erosion increase strongly, so that from 20 to 40 % slope erosion processes change from sheet and rill erosion to rill and creep erosion. Between 10 and 40 %

slope, when cropped plots are mulched by crops residues or weeds, runoff and erosion are insignificant.

In conclusion, simple antierosive measures (mulch, 10-20 m of grass strips, stone bunds) can be used by farmers when they are obliged to crop very steep hillslopes because of the increase of infiltration and the decrease of sealing crust formation.

Key words: Ecuador ; Martinique island ; volcanic soils ; erosion risks ; slope effect ; erosion process ; soil and water management.

1 Introduction

En raison de leurs propriétés physicochimiques remarquables, les sols volcaniques sont souvent considérés comme des sols fertiles, très bien structurés et résistants à l'érosion hydrique. Mais des études sur des sols volcaniques accidentés cultivés sous systèmes bananiers en Martinique et sous cultures vivrières traditionnelles en Équateur doivent relativiser ces idées reçues (De Noni *et al.*, 1984, 1986 ; Khamsook, Roose, 2003). En effet, en raison des conditions hostiles (pluies agressives voire tempête tropicale, topographies accidentées), l'érosion hydrique sur ces terres volcaniques cultivées d'altitude peut provoquer une dégradation environnementale importante dans ces pays. Le présent article va traiter de l'érosion hydrique et de ses *processus* mesurés sur les andosols latino-caribéenne et propose quelques mesures simples et efficaces pour limiter la perte en terre.

2 Site, matériels et méthodes

Malgré leurs différences et l'éloignement géographique entre l'Équateur (1°25 N - 5° S ; 75°-81° W) et la Martinique (14-16° N ; 60-62° W), des études sur l'érosion hydrique des sols volcaniques cultivés ont montré des résultats similaires, notamment à travers les *processus* érosifs.

a) Équateur

Dans les montagnes volcaniques de la Sierra (altitude : 1 500-3 200 m ; pluviosité : 1 000-2 000 mm/an), l'érosion du sol peut être très active en raison de l'exploitation intense des versants pentus par la population rurale. Face à ce problème, une étude expérimentale sur l'érosion d'un mollisol (tableau 1) est donc réalisée sur deux sites caractéristiques : à Mojanda (3 000 m) cultivé en haricot et à Tumbaco (2 600 m) cultivé en maïs.

b) Martinique

Source économique importante de l'île, la production intensive de banane Cavendish d'exportation occupe près de 8 200 ha de terres agricoles du nord et du centre de l'île (altitude : 5-800 m ; pluviosité : 500-5 000 mm/an) et cette culture industrielle peut présenter des risques de dégradation environnementale (érosion des sols, pollution des eaux). Pour estimer ces risques, une étude expérimentale

sur l'érosion d'un Nitisol (tableau 1) a été réalisée dans la plantation bananière Rivière Lézarde (25-40 m d'altitude) située en région centrale de l'île.

Pour déterminer l'érosion et ses processus, des parcelles expérimentales (100-200 m²) en Martinique et (100-1000 m²) en Équateur ont été installées selon des critères bien déterminés (Wischmeier, Smith, 1958, 1978 ; Roose, 1980 ; Hudson, 1996) sur les versants accidentés exploités par les cultures spécifiques : systèmes bananiers en Martinique et cultures céréalières et traditionnelles en Équateur. Ruissellement et érosion sont directement mesurés au champ après chaque pluie érosive : la précision des résultats, fiable pour les pluies faibles à modérées, devient approximative sous les grands événements tels les tempêtes tropicales (P>100 mm en 24 heures).

Tableau 1. Caractéristiques des sols superficiels (0-10 cm) étudiés en Équateur et en Martinique.

	Équateur	Martinique
Classification FAO du sol	Mollisol	Nitisol
Pente (%)	20-40	10-40
Densité apparente (g/cm³)	0,9	0,77-0,92
Acidité (pH eau)	5,4-7,4	4,9-5,7
Taux d'argile (%)	14,5-24	62-74
Taux de matière organique (%)	2-2,3	2,7-3,3
Indice d'érodibilité du sol*	0,30	0,08-0,1

* d'après Wischmeier *et al.* (1971)

Situées sur différentes pentes variant de 10 à 40 %, les parcelles d'érosion portent des traitements cultivés spécifiques décrits ci-dessous et qui sont répétés durant deux ans en Martinique et durant cinq ans en Équateur.

- Sol nu (100 m²) : traitement standard pour mesurer le comportement du sol sous l'agressivité des pluies (Wischmeier, Smith, 1958, 1978). En tout, cinq parcelles sont installées : deux en Équateur (Tw) et (Mw), trois en Martinique (Nu11), (Nu25) et (Nu40).

- Systèmes cultivés : traitement type des cultures rencontrées dans les deux pays. En Équateur, deux parcelles (100 m²) portent des traitements culturaux traditionnels avec le maïs (Tt) et avec des rotations annuelles haricot-pomme de terre-orge (Mt) ; deux autres essais (1000 m²) cultivés avec une gestion conservatoire du sol soit par des bandes enherbées (Te), soit par des cordons progressives de pierres (Me). En Martinique, sept parcelles (200 m²) portent des systèmes culturaux typiques avec des bananeraies établies (Ba9 et Ba11), des cannes à sucre paillées (Ca10, Ca25 et Ca40), des ananas billonnés traditionnels (An7) et des ananas plantés à plat avec paillis (An9).

La pluviosité est déterminée par son intensité en trente minutes (mm.h^{-1}) à partir d'une station météorologique automatique. Le ruissellement est défini par deux paramètres : le coefficient de ruissellement annuel Cram (%), rapport annuel du ruissellement sur la pluviosité et le coefficient de ruissellement maximal Crmax (%), rapport du ruissellement maximal sur son averse érosive. L'érosion E ($\text{t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) est estimée par le poids total sec de perte en terre évacuée par le ruissellement (sédiments de fond et matière en suspension). En outre, le taux de macro-agrégats ($>200 \mu\text{m}$) érodés est déterminé par un tamisage à l'eau des sédiments humides sur certains traitements sensibles. D'autres paramètres (humidité pondérale du sol, taux de surfaces couvertes dues au paillis et couverture végétale) sont également mesurés mensuellement.

3 Résultats

3.1 Pluviosité

Dans les hautes montagnes équatoriales, la pluviosité annuelle est plus faible qu'en plaines : 700 mm.an^{-1} à Tumbaco et 900 mm.an^{-1} à Mojanda. Les intensités des pluies sont généralement inférieures à 40 mm.h^{-1} durant trente minutes et quelques fortes averses pouvant atteindre des intensités de $40\text{-}80 \text{ mm.h}^{-1}$ sont responsables de 80 % de la perte en terre annuelle mesurée. En Martinique, la pluviosité annuelle à Rivière Lézarde s'élève à $2\,420 \text{ mm.an}^{-1}$. Les fortes averses érosives se manifestent durant la saison cyclonique (juillet-novembre), avec des tempêtes de $74\text{-}190 \text{ mm}$ d'eau et d'intensité de $37\text{-}76 \text{ mm.h}^{-1}$ en trente minutes. C'est durant cette période que l'érosion mesurée est la plus active.

3.2 Paramètres culturaux des traitements testés

Quatre situations sont distinctes au niveau des états de surfaces durant les campagnes de mesures : (i) – les sols nus où des débris organiques et les cailloux représentent moins de 20 % de la surface parcellaire ; (ii) – les bananeraies établies où les résidus organiques occupent constamment 40-60 % de la surface ; (iii) – les traitements classiques (ananas billonné en Martinique et rotation vivrière orge-pomme de terre-maïs-haricot en Équateur) où la couverture végétale couvre progressivement la parcelle de 35 % jusqu'à 80 % de sa surface ; (iv) – les traitements à mulch (canne à sucre et ananas à plat) où le paillis représente plus de 60 % de la surface.

Quant à l'humidité du sol, celle-ci varie de 30 % à 65 % sur les traitements testés en Martinique tandis qu'elle reste inférieure à 25 % sur les systèmes testés en Équateur.

3.3 Ruissellement et érosion des andosols cultivés

Les résultats du ruissellement et de l'érosion sont récapitulés dans le tableau 2.

Tableau 2. Ruissellement et érosion mesurés sur les systèmes culturaux typiques de l'Équateur et de la Martinique (et détermination du taux de macro-agrégats érodés).

Traitements	Parcelle d'érosion	Pente (%)	Ruissellement		Erosion E (t/ha/an)	Taux de Macro-agrégats (%)
			Cram (%)	Crmax (%)		
EQUATEUR						
Sol nu	Tw	20	18,6	63	87,2	X
	Mw	40	8,8	34	131,6	X
Culture céréalière traditionnelle	Tt	20	6,1	34	19,3	X
	Mt	40	0,6	6,2	0,8	X
Culture céréalière avec gestion conservatoire du sol	Te	20	2,1	5,8	4,4	X
	Me	40	0,1	2,4	0,4	X
MARTINIQUE						
Sol nu	Nu11	11	7,1	45	86	84
	Nu25	25	5,2	32	127,5	75
	Nu40	40	4,3	28	147,5	79
Canne à sucre paillée	Ca10	11	0,5	6	0,1	X
	Ca25	25	0,6	6	0,1	X
	Ca40	40	0,7	8	0,2	X
Bananaïe établie avec gestion du paillis	Ba9	9	2,4	24	0,4	X
	Ba11	11	2,8	27	0,5	X
Ananas mécanisé et billonné	An7	7	11,5	51		78
Ananas à plat avec paillage	An9	9	0,6	7		X

x : non déterminé

4 - Discussion

Malgré des contextes différents entre l'Équateur et la Martinique, les résultats observés dans les deux pays montrent des caractéristiques remarquables et communes, décrites ci-dessous.

* L'effet de l'augmentation de pente sur la diminution du ruissellement ont été soulignés également sur des sols d'Afrique (Heusch, 1971 ; Roose, 1980 ; Roose *et al.*, 1993) ou dans des *processus* de ruissellement hortonien (Poesen, 1984) ou plus récemment lors des simulations de pluies (Khamsouk, 2001 ; Janeau *et al.*, 2003). Quelques interprétations explicatives sont retenues : (i) – sur forte pente, l'infiltration sous l'action gravitaire augmenterait et ressuierait rapidement le sol (Heusch, 1971) ; (ii) – la hausse de l'infiltration sur les pentes serait due à l'ouverture accrue du sol superficiel par le craquèlement/cisaillement due à l'érosion (Govers, 1990) ; surtout, l'encroustement de la surface du sol, très rapide sur faible pente est détruite à mesure qu'elle se forme par l'énergie du ruissellement très forte sur pente de plus de 15 % (Roose, 1980).

* L'effet de la pente sur l'érosion qui croît avec la pente en raison de la capacité de transport accrue du ruissellement. Cette perte en terre sur les fortes pentes est due à un changement de *processus* érosif évoluant d'une érosion concentrée en rigole à une érosion concentrée par reptation comme des boules de neige (De Noni *et al.*, 1984, 1986 ; Khamsouk, Roose, 2003). Des auteurs ont établi une augmentation exponentielle de l'érosion avec la pente (Zingg, 1940 ; Hudson, Jackson, 1959, Lal, 1976). Ici, sur ces deux sols volcaniques, la relation entre pente et perte en terre est linéaire.

* Le processus érosif non sélectif qui entraîne des agrégats peu émoussés et en forte concentration hors de la parcelle d'érosion. Malgré la grande stabilité des agrégats due aux propriétés du sol (fort taux d'argile et de MO, peu de matière en suspension dans le ruissellement, constituants volcaniques), l'érosion des agrégats reste élevée sur les fortes pentes : la capacité de transport du ruissellement est donc suffisamment élevée pour éroder les agrégats du sol superficiel dans sa totalité.

* La faisabilité de conserver les ressources en sol contre l'érosion. La couverture du sol reste un moyen simple et efficace pour limiter l'érosion. En effet, à travers les résultats mesurés sur les traitements gérant les résidus organiques en surface sur des versants pentus (> 20 %), le ruissellement et l'érosion sont faibles en Équateur et en Martinique. Ici, le rôle efficace du paillage et des adventices contre l'érosion est bien évident quel que soit les types de cultures testés : leur action peut également réduire les pertes chimiques dues au ruissellement et à la perte en terre (Lal, 1979 ; Duchaufour *et al.*, 1991 ; Roose, 1980, 1994 ; Rishirumhirwa, 1997). En Équateur, la mise en place de bandes enherbées et de cordons de pierres limitent également l'érosion en ralentissant la capacité de transport du ruissellement. Toutes ces pratiques de gestion conservatrice du sol sont simples à appliquer par les agriculteurs et ne nécessitent pas d'aménagement lourd, ni onéreux.

Finalement, les résultats obtenus sur les andosols pentus en Équateur et Martinique montrent que l'érosion de ces sols volcaniques peut être sévère, surtout en condition de culture intensive sur fortes pentes quand le sol est dénudé, travaillé par des machines lourdes, puis tassé et desséché par les pratiques de production végétale. Face à ces risques de dégradation, la gestion conservatoire du sol reste facilement réalisable par de simples pratiques antiérosives (paillage en bande, bande enherbée, cordons de pierres) favorisant à la fois l'infiltration de l'eau pluviale et la diminution de la vitesse du ruissellement et de l'érosion hydrique. Ces simples pratiques doivent être faciles à appliquer dans des conditions acceptables pour les agriculteurs car ces premiers acteurs contribuent directement à la conservation des ressources en sol et à la protection de l'environnement.

Références bibliographiques

- DE NONI, G., NOUVELOT, J.-F., TRUJILLO, G., 1984, *Érosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador : a case study*, Sixth international soil classification workshop, Chile and Ecuador part 1, SMSS (Washington), PUCS (Santiago de Chile), pp. 263-274
- DE NONI, G., NOUVELOT, J.F., TRUJILLO, G., 1986, « Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos : las parcelas de Alangasi y llalo », CEDIG-ORSTOM, *Documentos de investigación*, n° 6, pp. 35-47
- DUCHAUFOUR, H., BIZIMANA, M., MIKOKORO, C., 1991, *Rapport annuel ISABU 1989-1990, partie érosion*, département des études du milieu et des systèmes de production, programme argoforesterie, sylviculture et érosion, ISABU
- GOVERS, G., 1990, « A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation », in *Geomorphology-Hydrology-Soils*, Catena supplement, n° 18, pp. 91-111
- HEUSCH, B., 1971, « Estimation et contrôle de l'érosion hydrique », *Société des sciences naturelles et*

5. Diagnostic du risque et prise en compte des contraintes paysannes

physiques du Maroc, n° 37, pp. 41-54

HUDSON, N.W., JACKSON, D.C., 1959, « Results achieved in the measurements of erosion and runoff in Southern Rhodesia », in *C.R. 3^e Inter-African Soils Conf. Dalaba, section 2*, pp. 1-15

HUDSON, N.W., 1996, « Mesures de terrain de l'érosion et d'écoulement des eaux de surface », *Bulletin pédologique de la FAO*, Rome

JANEAU, J.L., BRICQUET, J.P., PLANCHON, O., VALENTIN, C., 2003, « Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand », *European Journal of Soil Science*, n° 54, pp. 543-553

KHAMSOUK, B., 2001, *Impact de la culture bananière sur l'environnement, Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite)*, thèse École nationale supérieure d'agronomie de Montpellier, Montpellier

KHAMSOUK, B., ROOSE, É., 2003, « Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique », *Cahier Agricultures*, vol. 12, n° 3, pp. 145-151

LAL, R., 1976, « Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria, Effects of slope, crop rotation and residue management », *Geoderma*, n° 16, pp. 363-375

LAL, R., 1979, « Soil erosion problem on an alfisol in Western Nigeria and their control », *IITA Technical Bulletin*, n°1

POESEN, J., 1984, « The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume », *Geomorphologie*, n° 49, pp. 117-131

RISHIRUMUHIRWA, T., 1997, *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles dans les hauts plateaux de l'Afrique orientale (Application au cas de la région Kirimiro-Burundi)*, thèse n° 1636, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne

ROOSE, É., 1980, « Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale », *Travaux et Documents ORSTOM*, n° 130, Paris

ROOSE, É., ARABI, M., BRAHAMIA, K., CHEBBANI, R., MAZOUR, M., MORSLI, B., 1993, « Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne, Réduction des risques érosifs et infiltration de la production agricole pour la GCES, Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion », *Cahiers ORSTOM Pédologie*, n° 28, pp. 289-308

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

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., 1958, « Rainfall energy and its relationship to soil loss », *American Geophysicist Union*, n° 39, pp. 285-291

WISCHMEIER, W. H., JONHSON, C. B., CROSS, B. V., 1971, « A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites », *Journal of Soil and Water Conservation*, n° 26, pp. 189-192

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., 1978, « Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning », United States Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, n° 282

ZINGG, A. W., 1940, « Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff », *Agriculture Engineering*, n° 21, pp. 59-64

6.

**Conclusions des Journées
scientifiques et coordonnées
des participants**

CONCLUSIONS DES JOURNÉES SCIENTIFIQUES

1) Conclusions des rapporteurs de chaque thème

Chaque rapporteur a retenu pour son thème les idées fortes suivantes :

Thème 1. Synthèses

Un volume important de données a été produit sur l'érosion, notamment hydrique. L'exploitation de ces connaissances reste encore trop restreinte eu égard aux enjeux pour protéger les sociétés contre l'érosion,

Le succès de la lutte antiérosive est très lié à la participation des paysans,

Les financements pour contrer l'érosion sont lents à mettre en œuvre, il est très important de les évaluer et de les pérenniser.

Thème 2. *Processus* d'érosion

Ce thème s'est focalisé sur l'étude des *lavaka*. Bien qu'anciennes, les recherches sur les *lavaka* proposent encore différents scénarios. Les spécialistes de la question ne sont pas d'accord sinon pour dire qu'il existe des *lavaka* anciens et d'autres d'évolution récente. Une synthèse sur le sujet serait nécessaire eu égard au volume de données accumulées sur le sujet jusqu'à présent.

Thème 3. Méthodes : indicateurs, SIG et cartographie

Parmi les méthodes modernes d'analyse du milieu naturel et des activités humaines et donc de l'érosion, les SIG et la télédétection offrent des possibilités nouvelles très intéressantes pour préciser l'évolution des *processus*.

D'autres méthodes sont en cours de développement pour compléter les méthodes classiques, basées sur l'utilisation d'indicateurs, de marqueurs isotopiques, d'appareils de mesures tel l'érodimètre à aiguilles.

Thème 4. Techniques de GCES

L'intérêt de mesurer l'érosion pour bien comprendre ses causes et ainsi en déduire des méthodes et alternatives de lutte efficaces. En ce sens, les recherches sur parcelles expérimentales, bien qu'anciennes, restent un outil performant pour valider les modèles d'estimation de l'érosion.

Depuis plus d'un demi-siècle, les chercheurs et développeurs ont mis au point des alternatives pertinentes et efficaces. On a tendance à faire table rase des expériences passées alors que celles-ci sont très enrichissantes. Dans ce contexte, les savoir-faire tiennent une place essentielle.

Thème 5. Diagnostic du risque et prise en compte des contraintes paysannes

Outre les savoir-faire paysans, sur l'indispensable implication de ceux-ci. Au travers des différents exemples géographiques présentés (Madagascar, Afrique et Amérique du Sud), la participation des paysans aux différentes étapes du programme est une composante essentielle pour le succès des programmes de lutte antiérosive.

Globalement, la composante socioéconomique, est un facteur déterminant tant pour comprendre la dynamique des *processus* que pour accompagner plus en aval la lutte contre l'érosion.

2) Intervention de É. Roose, coordonnateur du réseau EGCES de l'AUF

É. Roose a construit sa conclusion autour des points suivants :

- richesse et succès de ce séminaire qui a réuni 83 participants, de 14 nationalités et de divers horizons (chercheurs, professeurs, ONG et développeurs),

- concept de GCES : traduction du *land husbandry* de nos partenaires anglo-saxons, la GCES a fait progressivement son chemin et s'impose aujourd'hui comme la stratégie la mieux adaptée, en répondant aux besoins des paysans et en réconciliant gestionnaires des terres et techniciens. Ses objectifs majeurs sont : augmenter la productivité des terres, améliorer la biodiversité et favoriser l'évolution du niveau de vie des paysans, tout en réduisant les risques d'érosion et en améliorant l'environnement rural,

- poursuivre les recherches sur l'érosion et les étendre à d'autres types de *processus* moins connus que l'érosion en nappe telles l'érosion due au travail du sol, le ravinement, l'érosion en masse et par le vent,

- valoriser davantage la restauration de sols et inciter les chercheurs et ingénieurs à plus s'y intéresser. Mieux comprendre comment les paysans font pour restaurer leurs terres,

- rappel des conditions de publication des actes de ces Journées scientifiques. Une version préliminaire des actes a été diffusée aux participants, la version définitive est prévue pour le début 2006. Les textes sont compris entre 4 et 6 pages (bibliographie et illustrations comprises). Les versions longues seront regroupées sur un cédérom, quant aux meilleurs textes, ils pourront être édités dans les revues de l'AUF, *Sécheresse* et/ou *Cahiers agricultures*,

- rappel de la prochaine réunion internationale de l'ISCO au Maroc, à Marrakech, du 14 au 19 mai 2006. Une session spéciale sera dédiée au réseau EGCES de l'AUF sur les stratégies traditionnelles,

Enfin, il remercie les principaux co-organisateurs de cet événement : S. Ratsivalaka, professeur à l'Université d'Antananarivo qu'il invite à constituer un réseau Érosion local, G. Serpantié chercheur de l'IRD en poste à Antananarivo et G. De Noni, secrétaire du réseau EGCES de l'AUF.

3) Remarques des participants présents dans la salle

Les principales remarques ont concerné les thèmes suivants :

- importance de la spatialisation et des méthodes informatiques pour la connaissance des *processus*,
- accroître l'implication des sciences sociales dans les recherches sur l'érosion : mieux préciser les coûts de l'érosion, de la lutte antiérosive et mieux prendre en compte l'acceptabilité des populations,
- mieux préciser la notion de risque qui est le résultat entre aléa et vulnérabilité,
- tirer une synthèse de toutes les études faites à Madagascar sur l'érosion, notamment essayer de conclure sur la genèse des *lavaka*.

4) Intervention de K. Boulkroune

Responsable du programme Environnement de l'AUF, K. Boulkroune présente les objectifs et différents programmes de l'AUF. Il centre son discours notamment sur l'opération concernant les réseaux qui a permis la réalisation de ces journées à Madagascar, première réunion régionale du réseau EGCES.

**JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU RESEAU ÉROSION ET
GCES DE L'AUF
« ÉROSION ET GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU
ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS »
25, 26 ET 27 OCTOBRE 2005 – ANTANANARIVO**

Liste des participants

<u>Nom Prénom</u>	<u>Institution</u>	<u>Email</u>	<u>adresse</u>
Allemagne			
1. König Dieter	département de géographie, Université Koblenz-Landau,	dkoenig@uni-koblenz.de	Universitätsstrabe,1, D-56070 Koblenz Allemagne
Burundi			
2. Rishirumuhirwa Théodomir	AGROBIOTEC	agrobiotec2002@yahoo.fr	B. P. 5667 Kinindo Bujumbura, Burundi
Equateur			
3. Trujillo German	MAG Equateur	German_trujillo-yandun@hotmail.com	Min. Agriculture, av. Amazonas et Eloy Alfaro, Quito, Équateur
France			
4. Blanc-Pamard Chantal	CNRS	cbp@ehess.fr	Centre d'études africaines, EHESS, 54, boulevard Ras- pail, Paris 75 006 France
5. Boulkroune Khalef	AUF	khalefboulkroune@auf.org	4, Place de la Sorbonne 75005 Paris France
6. De Noni Georges	Centre IRD	denoni@mplird.fr	B.P. 64501, F34394 Mont- pellier cedex 5 France
7. Mietton Michel	CRGA Université J. Moulin	mmietton@yahoo.fr	Université Lyon III UMR 5600, 69002, Lyon, France
8. Monnin Hugues	Jeunesse et Solida- rité internationale (JSI)	odilemonnin@neuffr	24, av. Wilson 25200 Montbéliard France
9. Monnin Odile	JSI, 24 Av Wilson	odilemonnin@neuffr	24, av. Wilson, 25200 Montbéliard France
10. Muller Bertrand	CIRAD	bertrand.muller@cirad.fr	avenue Agropolis, TA 40/01, 34398 Montpellier cedex 5, France

11 Puech Christian	Maison de la Télédétection	puech@teledetection.fr	UMR TETIS, 500, rue J.-F. Breton, 34093 Montpellier, cedex 5 France
12. Roose Eric	Centre IRD	roose@mplird.fr	B.P. 64501, 34394 Montpellier, cedex 5 France
Ile de la Réunion			
13. Chabalière Pierre-François	ORAD	pierre.chabaliere@cirad.fr	B.P. 20, 97408, Saint Denis messagerie, cedex 9, La Réunion, France
14. Sarraillh Jean Michel	ORAD/UMR Peuplements végétaux et bioagresseurs en milieu tropical	sarrailh@cirad.fr	7, chemin de l'IRAT, 97410 Saint Pierre, La Réunion, France
Kenya			
15. Hatibu Nuhu Hemed	SARECA Soil and Water Management Research Network for Eastern and Central	n.hatibu@cgiar.org	Africa, P.B. 39063 – 00623, Nairobi, Kenya
Madagascar			
16. Albrecht Alain	Institut de recherche pour le développement (IRD)	alain.albrecht@mplird.fr Albrecht@ird.mg	B.P. 434, Antananarivo 101, Madagascar
17. Andriamampianina Nicolas	FOFIFA, MENRES	nico_wlm@yahoo.fr	FOFIFA, Ambatobe, Antananarivo 101, Madagascar
18. Andriamihamina Mparany	département de géographie Université d'Antananarivo	mparany_andriamihana@yahoo.fr	B.P. 6321, Antananarivo 101, Madagascar
19. Andrianavalona Mianinjatovo Haja M.	département de géographie Université d'Antananarivo	hajandrianavalona@yahoo.fr	B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
20. Andrianiana Jean Marie	Bibliothèque Universitaire, Université d'Antananarivo	bu@univ-antananarivo.mg	Madagascar
21. Bouchara Soidridine	Projet FCE Réhabilitation	bouchroi@yahoo.fr	Fianarantsoa
22. Decaudin Bernard	Projet Madsup, Université d'Antananarivo	bernardcaudin@hotmail.com	Madagascar
23. Douzet Jean-Marie	ORAD, URPS CRID (FOFIFA, UA)	douzet@cirad.fr	B.P. 230, Antsirabe 110, Madagascar
24. Feller Christian	IRD	feller@ird.mg	B.P. 434, Antananarivo 101, Madagascar
25. Fontannaz Rémy	PLAE	fontannaz@simicromg	B.P. 371, Mahajanga Madagascar

6. Conclusions des journées Scientifiques et adresses des participants

26. Houssein André	DESS fonder Université Antananarivo	ahoussein@syfedreferfmg	Madagascar
27. Leroux Yannick	FSP FORMA	assforma@wanadoo.mg	Madagascar
28. Miandrinandrasana Clément	département de chimie minérale et de chimie physique	clement_miandri001@yahoo.fr	faculté des sciences, Université d'Antananarivo, Antananarivo 101, Madagascar
29. Nary Herinirina Iarivo	FTM	narynini@yahoo.fr	Lalana Dama-Ntsoa RJB, Ambanidia B.P. 323, Antananarivo 101, Madagascar
30. Nomenjanahary Safidy	ESPA, Université d'Antananarivo	Nom.safidy@yahoo.fr	Madagascar
31. Partiot Michel	CIRAD		Madagascar
32. Rabarimanana Mamy Herisoa	PGRM Projet de gouvernance des ressources minérales	rab_mamy@yahoo.fr	B.P.280, Lot IIY20 Bis Ambaranjana Antananarivo 101 Madagascar
33. Rabearimanana Lucile	AUF, Université d'Antananarivo		Madagascar
34. Rabeharisoa Lilia	laboratoire des radio-isotopes Université d'Antananarivo	lrabehar@referfmg	B.P.3383, Antananarivo 101, Madagascar
35. Rabemananjara Toky Harimalalaina	FLSH/Géographie Université Antananarivo		BP 907, 101 Antananarivo Madagascar
36. Rabenantoandro Yvonne	FOFIFA	fofifamada@wanadoo.mg	direction générale B.P. 1690, Antananarivo 101, Madagascar
37. Rabenoro Irène	VP1 Université d'Antananarivo	irenerabenoro@blueline.mg	FLSH, B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
38. Rabeson Raymond	FOFIFA MENRES	Rabesonraymond@wanadoo.mg	Madagascar
39. Rafalimanana Oliva	ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (MAEP Direction de l'Appui aux Investissements Ruraux (ex-Génie Rural)	genieur@wanadoo.mg	Madagascar
40. Rafolo Andrianaivoarivony	département de civilisations Université d'Antananarivo		Madagascar

41. Raharijaona Raharison Léa	École supérieure polytechnique d'Antananarivo Université d'Antananarivo	ljarahari2001@yahoo.fr	BP.1500, Antananarivo 101, Madagascar
42. Raharinivo Viviane	Université Antananarivo Faculté des Sciences		Madagascar
43. Rahelisoa Fenomanana	Projet FCER Composante Communautaire,	KSF@chemonics.mg	immeuble Tranon'ny Trondro Projet, 2è étage, Anjoma Fianarantsoa 301 Madagascar
44. Rahetindralambo Rakoto	ONE	rakoto@pnae.mg	Madagascar
45. Rahonintsoa Eliane	ENS Université Antananarivo		Madagascar
46. Rajoelson Gabrielle	Université Antananarivo		Madagascar
47. Rakotoarijaona Jean Roger	ONE		Madagascar
48. Rakotomanga Volaso Sandrine	Université Antananarivo		Madagascar
49. Rakotondralambo Andriantahina	ANAE	anae@wanadoo.mg	Madagascar
50. Rakotondramanana	GSDM	Gsdm.de@wanadoo.mg	Madagascar
51. Rakotondramanana Modeste	IRD	modeste@ird.mg	Programme GEREM CNRE/IRD, B.P.434 Antananarivo 101, Madagascar
52. Rakotondraompiana Solofo	Institut & Observatoire géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo	sorako@univ-antananarivo.mg	B.P.3843, Antananarivo 101, Madagascar
53. Rakotondrazafy Amos Fety michel	faculté des sciences Université d'Antananarivo		Madagascar
54. Rakotonirina Louis Albert	ESSA Forêt, Université d'Antananarivo	al_lova@yahoo.fr	B.P.175, Antananarivo 101, Madagascar
55. Rakoto Ramiarantsoa Hervé	ICOTEM Université de Poitiers département de géographie	Herve.Rakoto@mshs.univ-poitiers.fr	97 av. du recteur Pineau, 86 000 Poitiers, France
56. Ramangason Guy Suzon	ANGAP		Madagascar

6. Conclusions des journées Scientifiques et adresses des participants

57. Ramanoelina Panja	ESSA Université d'Antananarivo		Madagascar
58. Ranaivoson Socrate	CNRE	aroby@ird.mg	Madagascar
59. Randriamanantsoa Jeans	Projet FCER	KSF@chemonics.mg	immeuble Tranonhy Trondro, 2 ^e étage, Anjomà, Fianarantsoa 301, Madagascar
60. Randrianaivojaona Joseph	MAEP		Madagascar
61. Ranorolalao Yvonne	Département de chimie Faculté des Sciences Université Fianarantsoa	bapayvo@univ-fianar.mg	Madagascar
62. Hiarimamane RASOAMANONTANY	BOI – AUF	Hiarimananasoamanontany@auf.org	Madagascar
63. Ratahinjanahary Valentine	FLSH Université Antananarivo		Madagascar
64. Ratolojanahary	faculté des sciences, Université Antananarivo		Madagascar
65. Ratsimbazafy	École normale supérieure Université Fianarantsoa	tsimba@univ-fianar.mg	Madagascar
66. Ratsimbazafy Bruno	IOGA, Université d'Antananarivo		B.P. 3843, Antananarivo 101, Madagascar
68. Ratsisompatrivo Jean Solo	ERI/USAID		Madagascar
69. Ratsivalaka Randriamanga Simone	FLSH géographie, Université Antananarivo	baratsiv@wanadoo.mg	B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
70. Razafimahafa Reine	FLSH géographie Université Antananarivo	reinerazaf@yahoo.fr	B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
71. Razanajonarijery Noly	Programme GÉREM CNRE/IRD	noly@ird.mg	Programme GÉREM CNRE/IRD B.P. 434, Antananarivo 101, Madagascar
72. Razanadrafara Mamy Reine	FLSH géographie Université Antananarivo		B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
73. Razanaka Samuel	CNRE		Madagascar
74. Razafindraboto Etienne	Projet FCER Composante Communautaire	KSF@chemonics.mg	immeuble Tranonhy Trondro Projet, 2 ^e étage, Anjoma Fianarantsoa 301, Madagascar

75. Razafindrakoto Marie Antoinette	ESSA, Forêts, Université d'Antananarivo	i2c@bluelinemg makisatoo@univ-antananarivo	B.P.175, Antananarivo 101, Madagascar
76. Razafindramanga Minoniaina Luce	ESSA, Forêts, Université d'Antananarivo	mrzafindramanga@simicromg; minorazafindramanga@univ-antananarivo.mg	B.P.175, Antananarivo 101, Madagascar
74. Razafy Fara Lala	ESSA, Forêts, Université d'Antananarivo	flrazafy@simicromg	B.P.175, Antananarivo 101, Madagascar
77. Serpantié Georges	IRD Programme GEREM/CNRE/IRD	serpantie@ird.mg	B.P. 434, Antananarivo 101, Madagascar
78. Vololonirainy Ravoniarjaona	FLSH/géographie Université Antananarivo	rvolonirainy@wanadoo.mg	B.P. 907, Antananarivo 101, Madagascar
Mali			
79. Diallo Drissa *	laboratoire d'agropédologie, IPR/IFRA de Katibougou	drdiallo@ird.fr	B.P. 6, Koulikoro, Mali
Maroc			
80. Chaker Miloud*	Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Rabat	mchaker2@caramail.com	Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Rabat Maroc
81. Laouina Abdellah*	faculté des lettres et sciences humaines Université Rabat	cugn@wanadonnet.ma	Faculté des lettres et sciences humaines Université Rabat Maroc
Mayotte			
82. Chamssidine Houlam*	CRAD	houlam.chamssidine@cirad.fr	BP 1304, 97600 Mamoudzou Mayotte
Vietnam			
83. Pham Quang Ha*	Institut des sols et des fertilisants (NISF)	pqha-nisf@hn.vnn.vn	Dong Ngac Tu liem, Hanoi, Vietnam

Achévé d'imprimer
Novembre 2006

Imprimé en France par Dupli-Print
2, rue Descartes
Z.I. Sezac - 95330 Domont
Tél : 01 39 35 54 54
Fax : 01 34 39 09 95
www.dupli-print.fr

Le problème de l'érosion et de la conservation de l'eau et de la fertilité des sols est très ancien puisque bien des civilisations ont disparu du fait des interventions maladroites de l'homme sur les ressources en eau et en sols. C'est aussi une problématique très moderne à Madagascar car elle s'inscrit dans la perspective du développement durable.

Or, ce document rapporte 43 communications présentées aux Journées scientifiques organisées par le réseau EGCES de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF), en coopération avec l'université d'Antananarivo, le SCAC, l'IRD, le CIRAD, le FOFIFA, l'ANAE et le FORMA.

Ces actes contiennent des **synthèses sur les recherches** développées ces dernières années par les animateurs du comité de suivi du Réseau à Madagascar, en Afrique, en Équateur, au Vietnam et dans d'autres pays montagneux de l'océan Indien. Ils tentent aussi de **faire le point des recherches actuelles** concernant les processus d'érosion, les indicateurs et la répartition spatiale des risques, les techniques de lutte et la prise en compte des contraintes humaines dans la gestion des ressources naturelles : l'eau, la biomasse et la fertilité des sols.

Ce document intéressera les chercheurs des disciplines concernées par l'environnement, mais aussi les enseignants, les étudiants et les responsables du développement rural.

Sous la direction de

Dr Simone Ratsivalaka, professeur à l'université d'Antananarivo, responsable de la filière spécialisée Environnement et Aménagement du territoire (FSEAT) au département de géographie.

Dr Georges Serpantié, agronome, chargé de recherche à l'IRD. Il co-dirige à Madagascar le programme CEREM sur la gestion des espaces ruraux du corridor forestier Ranomafana-Andringitra.

Dr Georges De Noni, est géographe, directeur de recherche à l'IRD. Il est aujourd'hui directeur du Centre IRD de Montpellier et secrétaire scientifique du réseau Érosion et GCES de l'AUF.

Dr Éric Roose, agro-pédologue, directeur de recherche à l'IRD. Il est coordonnateur du réseau Érosion et GCES de l'AUF.

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 scientifiques en langue française. 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 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.

Prix Nord : 45 euros

Prix Sud : 15 euros

ISBN : 2-84703-032-8




Éditions scientifiques GB


Agence universitaire de la Francophonie