

SCIENCE ET CHANGEMENTS PLANÉTAIRES

SECHERESSE

VOLUME 15
NUMÉRO 1
JANVIER-FÉVRIER-MARS 2004

Spécial
Érosion

A* 33558 Ex 2

Éditorial

La gestion conservatoire de l'eau, et de la fertilité des sols :
une stratégie nouvelle de la lutte antiérosive pour le développement durable
Eric Roose

Historique de la lutte antiérosive

Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive :
vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)
Eric Roose

La zone soudano-sahélienne

L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte
Charles L. Bielders, Jean-Louis Rajot, Karlheinz Michels

Érosion et conservation des sols en montagne sahélienne : le cas de l'Éthiopie du Nord
Jan Nyssen, Jean Poesen, Jan Moeyersons, Jozef Deckers, Mitiku Haile

Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux
et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso
Robert Zougmore, Korodjouma Ouattara, Abdoulaye Mando, Badiori Ouattara
Expériences de récupération de sols sahéliens dégradés grâce à l'incorporation de doses variables
de fumier et d'un hydorrétenteur fertilisant

Jean-Marie Karimou Ambouta, Ibrahim Bouzou Moussa
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
Drissa Diallo, Bernard Barthès, Didier Orange, Eric Roose

Les zones de montagne méditerranéennes

Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc)
Abdellah Laouina, Céleste Coelho, Coen Ritsema, Miloud Chaker, Rachida Nafaa, Imad Fenjiro, Mustapha Antari, Antonio Ferreira, Simone Van Dijck

Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval :
exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient

Jean Albergel, Slah Nasri, Mohamed Boufaroua, Abdallah Droubi, Abdel Aziz Merzouk

Bilan de l'enquête sur la défense et restauration des sols (DRS) en Algérie
Mourad Arabi, Oum Elkhir Kedaïd, Lakhdar Bourougaa, Tarik Asla, Eric Roose

Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement
et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie
Boukhil Morsli, Mohammed Mazour, Nadjai Mededjel, Abdelkrim Hamoudi, Eric Roose

Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols
des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc)
Mohamed Sabir, Bernard Barthes, Eric Roose

Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement
et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France)
Didier Blavet, Georges De Noni, Eric Roose, Ludovic Maillou, Jean-Yves Laurent, Jean Asseline

La recherche en Afrique

Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique :
revue et perspectives
Eric Roose, Georges De Noni

www.john-libbey-eurotext.fr

JL John Libbey
EUROTEXT

Prix au numéro :
21 € pays du Nord
11 € pays du Sud



Agence
universitaire
de la
Francophonie

Fonds Documentaire IRD



010033559

Cahiers d'études et de recherches francophones



Le réseau Érosion francophone

Pour quoi faire ?

Depuis un siècle, la dégradation des sols est un phénomène pré-occupant au niveau mondial : 10 millions d'hectares de terres cultivables sont perdues chaque année.

En 1990, le projet GLASOD (*Global assessment of the status of human-induced soil degradation*) a terminé une première carte de la répartition des processus de dégradation des terres : 16 % des terres exploitables étaient déjà dégradées, dont 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 ou de l'envasement des barrages que sur la disponibilité en eau de qualité.

D'ici 20 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.

Le réseau Érosion francophone a 20 ans

Devant l'urgence des problèmes de durabilité des systèmes de production en milieu tropical et tempéré, l'Institut de recherche pour le développement IRD (ex-Orstom), avec l'aide de la Coopération française et de quelques partenaires (Centre technique de coopération agricole et rurale, CTA ; Observatoire du Sahara et du Sahel, OSS ; GTZ, Agence allemande pour la coopération technique ; École nationale forestière des ingénieurs, 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 21 bulletins de 50 à 600 pages, 3 *Cahiers Orstom Pédologie* et un *Orstom Actualités*, participé à diverses revues, dont *Sécheresse* 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).

Le nouveau réseau Érosion et CGES de l'Agence universitaire de la Francophonie

En 2003, l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) 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 quelques thèmes qui seront choisis parmi les sujets ci-dessous, par des représentants des quatre continents au cours de la réunion fondatrice, le 20 avril 2004 à Paris :

- méthodologie : mesurer ou estimer, à l'aide d'indicateurs, les risques des divers processus dans l'espace ;
- aspects socio-économiques 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 reprendra les objectifs du réseau Érosion, tout en en développant de nouveaux :

- aider au désenclavement des chercheurs, des laboratoires et des équipes de recherche des pays du Sud ;
- favoriser les échanges entre tous les chercheurs utilisant le français comme langue de travail, quelle que soit leur zone géographique (coopération Nord-Nord, Sud-Sud, Nord-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, en particulier pour la rédaction de leur production scientifique à travers les revues *Sécheresse* et *Agricultures*.

Le réseau Érosion et GCES organisera des journées scientifiques tous les deux ans, 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 :

Eric Roose

Coordinateur de la réunion de constitution du réseau
Institut de recherche pour le développement (IRD)

BP 64501

34394 MONTPELLIER CEDEX 5

Tél : 04 67 41 62 65

<Eric.Roose@mpl.ird.fr>

Éditeur

John Libbey Eurotext Limited

127, avenue de la République

92120 Montrouge, France

Tél. : 01 46 73 06 60

Fax : 01 40 84 09 99

Mél : contact@john-libbey-eurotext.fr

Secrétaire de rédaction

Chantal Delooz-Karageorgiadès

<chantal.delooz@jle.com>

Secrétaire

Sophie Bartholome

Sommaire/Contents

Éditorial/Editorial

- 5 La gestion conservatoire de l'eau, et de la fertilité des sols : une stratégie nouvelle de la lutte antiérosive pour le développement durable

Land husbandry: A new erosion control strategy for sustainable development

Éric Roose

Historique de la lutte antiérosive/ Erosion Control Strategies: Historical Highlights

- 9 Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive – Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

Evolution of soil and water conservation strategies – Towards land husbandry

Éric Roose

La zone soudano-sahélienne/ The Sudanese-Sahelian Area

- 19 L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturelles actuelles et méthodes de lutte

Wind erosion in the Nigerian Sahel: Impact of present cultural practices and control measures

Charles L. Bielders, Jean-Louis Rajot, Karlheinz Michels

- 33 Érosion et conservation des sols en montagne sahélienne : le cas de l'Éthiopie du Nord

Soil erosion and conservation in Sahelian highlands: The case of Northern Ethiopia

Jan Nyssen, Jean Poesen, Jan Moeyersons, Jozef Deckers, Mitiku Haile

- 41 Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso

Interaction between nutrients and water and soil conservation techniques in runoff control and soil fertility management strategies in Burkina Faso

Robert Zougmore, Korodjouma Ouattara, Abdoulaye Mando, Badiori Ouattara

- 49 Expériences de récupération de sols sahéliens dégradés grâce à l'incorporation de doses variables de fumier et d'un hydrotenseur fertilisant

Restoring the fertility of degraded Sahelian soils using variable dung and hydro retaining fertilizer doses: A return on experiment

Jean-Marie Karimou Ambouta, Ibrahim Bouzou Moussa

- 57 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

Comparison between aggregate or clod stability and runoff and interrill erosion risks measured on runoff plots in the Sudanese zone of Mali

Drissa Diallo, Bernard Barthès, Didier Orange, Éric Roose

Fonds Documentaire IRD

Cote : A* : 33558 Ex : 2

Correspondants

N. Akrimi (Tunisie)
M. De Boodt (Belgique)
N. Bounaga (Algérie)
F. Lopéz Bermúdez (Espagne)

Abonnements

John Libbey Eurotext
18-24 quai de la Marne
75164 Paris Cedex 19
Tél. : 01 44 84 86 80
Fax : 01 42 00 56 92
E-mail : atei@dipinfo.fr

ISSN 1147-7806

Commission paritaire n° 72222

La revue « Sécheresse » est référencée dans les bases Pascal, CAB International, Orchis, Agris et Resagri

Pré-presse

Jouve (Mayenne)

Impression

Corlet Imprimeur, SA, ZI route de Vire
14110 Condé-sur-Noireau - N° 77180

Index des annonceurs

John Libbey Eurotext : 4^e de couv.

Couverture (d'après un cliché de la Société astronomique de France) Coopérative de Création

Bulletin d'abonnement : 3^e de couv.

Conseils aux auteurs : p. 130.

Le journal *Sécheresse* a reçu le concours des organismes suivants :

- le ministère de l'Environnement (France)
- le ministère délégué à la Coopération et à la Francophonie (France)
- le ministère des Affaires étrangères (France)
- l'Observatoire du Sahara et du Sahel (France)
- le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref - France)
- le Centre de coopération internationale en recherche agronomique (Cirad - France)
- l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO-Italie)
- le Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS)
- l'Institut de recherche scientifique pour le développement en coopération (IRD - France)
- le Centre technique agronomique (CTA-Pays-Bas)
- l'Institut national de la recherche agronomique (Inra - France)
- le Centre national de la recherche scientifique (CNRS - France)
- l'Institut national de la recherche scientifique (INRS/Eau - Québec)
- l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (Maroc)

Les zones de montagne méditerranéennes/ The Mediterranean Highlands

- 65 Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc)
Soil water dynamics and land management under global change in a semiarid Mediterranean area (Rabat, Morocco)
Abdellah Laouina, Céleste Coelho, Coen Ritsema, Miloud Chaker, Rachida Nafaa, Imad Fenjira, Mustapha Antari, Antonio Ferreira, Simone Van Dijk
- 78 Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient
Small dams and hill reservoirs: Innovative management for water conservation and for protecting downstream infrastructures. The examples of small dams in Northern Africa and the Middle East
Jean Albergel, Slah Nasri, Mohamed Boufaroua, Abdallah Droubi, Abdel Aziz Merzouk
- 87 Bilan de l'enquête sur la défense et restauration des sols (DRS) en Algérie
Assessment of a 40-year strategy of soil defence and restoration in Algeria
Mourad Arabi, Oum Elkhir Kedaid, Lakhdar Bourougaa, Tarik Asla, Éric Roose
- 96 Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie
Impact of land use on runoff and erosion risks in the semiarid hillslopes of North Western Algeria
Boutkhil Morsli, Mohammed Mazour, Nadjai Mededjel, Abdelkrim Hamoudi, Éric Roose
- 105 Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc)
Assessing runoff and erosion risk indicators on the main soils of the Mediterranean mountains of the Western Rif area (Morocco)
Mohamed Sabir, Bernard Barthes, Éric Roose
- 111 Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France)
Influence of cultural practices on the risks of runoff and interrill erosion under vineyard in Ardeche (France)
Didier Blavet, Georges De Noni, Éric Roose, Ludovic Maillou, Jean-Yves Laurent, Jean Asseline
- ## La recherche en Afrique/Research in Africa
- 121 Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives
The Research on water erosion in Africa. Review and perspectives
Éric Roose, Georges De Noni

Nous avons appris avec tristesse le décès de Roger Pontanier, pédologue, Directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD, ex-Orstom), survenu le 18 décembre 2003, à l'âge de 62 ans. Il a effectué la majorité de sa carrière en expatriation en Tunisie, au Cameroun et au Sénégal. Ses liens avec la Tunisie sont particulièrement forts puisqu'il a travaillé 27 ans dans le sud de ce pays. Il a été pour notre revue un relecteur attentif et disponible.

La gestion conservatoire de l'eau, et de la fertilité des sols : une stratégie nouvelle de la lutte antiérosive pour le développement durable

Eric Roose

Unité de recherche 041
« Séquestration du carbone » (Seq-c)
Réseau Érosion
Centre IRD
BP 64501
34394 Montpellier
France
<Eric.Roose@mpl.ird.fr>

L'érosion est un problème vieux comme le monde : elle a sculpté nos paysages mais aussi construit les deltas fertiles. Cependant, depuis un siècle, avec le développement exponentiel de la population, les processus de dégradation des terres ont pris des dimensions inquiétantes pour la gestion durable du monde : plus de 16 % des terres cultivables ont été dégradées, essentiellement par l'érosion hydrique (55 %) et éolienne (28 %).

Dans les milieux tropicaux humides, la destruction des grands massifs forestiers entraîne une perte irrémédiable de la biodiversité, la modification du bilan hydrique régional et probablement le réchauffement mondial. Mais c'est dans les zones semi-arides que la surexploitation du couvert végétal entraîne les conséquences les plus néfastes sur le plan de la dégradation de la productivité des terres, de l'aridification du pédo-climat, de



Figure 1. Le problème de l'érosion accélérée.

Au Maghreb, la forêt méditerranéenne (voir reliques), surexploitée et surpâturée, a finalement été défrichée et cultivée sans aménagement depuis deux générations. L'érosion (en nappe et aratoire) a découpé l'horizon humifère, le ruissellement a créé du ravinement et des mouvements de masse à partir des pentes convexes. Sans intervention, la terre sera détruite en un siècle. Tous les acteurs du drame sont encore présents qui montrent la complexité du développement rural durable.

l'envasement accéléré des barrages et de la disponibilité en eaux de qualité : dans vingt ans, la plupart des pays sahéliens et méditerranéens vont cruellement manquer d'eau, alors que ces populations connaissent une croissance sans précédent.

C'est pourquoi en 2001, *Sécheresse* a décidé de consacrer un numéro au thème de l'érosion en milieu semi-aride et de favoriser les études sur l'évolution positive récente des stratégies de lutte antiérosive et de réhabilitation de la capacité de production des sols dégradés : la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).

Ce dossier est structuré en quatre parties : une introduction générale sur l'évolution des stratégies de lutte antiérosive, cinq dossiers abordant les problèmes de la zone soudano-sahélienne africaine, six documents sur les zones de montagne méditerranéennes et enfin, en conclusion, un document sur l'état actuel des recherches sur l'érosion.

Historique de la lutte antiérosive

Face aux problèmes d'érosion, les communautés rurales ont développé une série de stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols bien adaptées à leurs conditions socio-économiques. Comme celles-ci ont beaucoup évolué, ces approches ont souvent été abandonnées, car trop peu valorisantes du travail qu'elles exigent. Depuis l'ère industrielle, à l'occasion des crises économiques et environnementales, ont été développées des stratégies modernes d'équipement du milieu rural en petite hydraulique : la restauration des terrains de montagne (RTM) dans les Alpes en 1850, la conservation des eaux et des sols (CES) en 1930 aux États-Unis, et la défense et restauration des sols (DRS) depuis 1940 autour du bassin méditerranéen. Mais depuis l'atelier de Porto Rico (1987), les causes de l'échec de cette approche ont été étudiées et la GCES, une nouvelle démarche, plus positive, qui tente de mieux tenir compte des contraintes paysannes et cherche à valoriser le travail tout en réduisant les risques d'érosion, a été proposée. Au lieu des terrasses mécaniques qui n'ont pas résolu les problèmes de dégradation des sols cultivés, sont testées chez les paysans, diverses techniques biologiques qui améliorent l'infiltration, couvrent mieux le sol et surtout améliorent la productivité du sol et du travail.

La zone soudano-sahélienne

• *Érosion éolienne et pratiques culturales dans le Sahel nigérien.* L'érosion éolienne

constitue, pour les cultures, une menace importante en début de saison des pluies sur les sols sableux. Mais l'essentiel des sédiments se dépose à l'intérieur du terroir, mis à part les particules les plus légères et les plus fertiles. Les paysans ont développé une série de techniques visant à couvrir le sol (gestion des adventices et des résidus de culture, défrichement sélectif et sans brûlis des jachères, bordures des champs en végétation pérenne) et à piéger les sédiments en augmentant la rugosité du milieu (lignes d'herbes ou d'arbres, cultures intercalaires, zaï). La pression foncière est telle, qu'à l'avenir, seules les techniques antiérosives qui renforcent la fertilité du sol ou la production de sous-produits intéressants seront retenues.

• *Érosion et CES en montagne sahélienne éthiopienne.* Les divers processus d'érosion à l'œuvre dans ces montagnes ont été évalués (67 % par érosion en nappe, 33 % par ravinement), processus induits par les activités humaines telles que la déforestation, le surpâturage, la mise en culture et surtout les pistes. Actuellement, le taux d'érosion semble diminuer du fait des techniques antiérosives récemment mises en œuvre sur les versants (murets de pierres, rideaux d'arbres et mise en défens) et dans les ravines (seuils en pierres sèches et végétalisation).

• *Rôle des nutriments dans le succès des techniques de CES au Burkina.* Les techniques de CES (zaï et demi-lune, cordons de pierres, lignes d'herbes) réduisent le ruissellement et l'érosion, mais augmentent très peu les rendements des cultures : il faut les combiner avec la fertilisation organique et minérale pour profiter des eaux infiltrées. La fumure organique (fumier, compost ou paillage) s'est avérée plus efficace qu'un apport minéral ordinaire qui acidifie le sol, l'idéal étant de combiner la fumure organique (peu disponible) et la fumure minérale.

• *Effets du fumier et du Polyter sur l'érosion et la production d'un sol encroûté du Niger.* Pour améliorer les conditions physiques d'un sol battant à l'intérieur de dispositifs de CES, ont été comparés l'apport de poudrette (1,25 t/ha) et celui de trois doses d'acrylate de Na, produit hydrodétendeur en même temps que fertilisant (NPK et oligo-éléments). Ces traitements, à faibles doses, ont eu un impact sur le ruissellement et l'érosion, mais cet impact reste insuffisant. Le fumier a amélioré très significativement les rendements en grain et paille, de même que le Polyter, mais les gains modestes dus au Polyter ne justifient pas l'utilisation de ce produit importé comme substitut au fumier local.

• *Comparaison de tests de stabilité des agrégats et des mottes aux risques de ruissellement et d'érosion mesurés sur parcelles au Sud-Mali.* Les sols ferrugineux tropicaux sont particulièrement peu stables et donnent lieu à fort ruissellement et érosion. En revanche, les Vertisols calciques, plus argileux et mieux structurés, sont plus résistants à l'érosion en nappe mais non au ravinement. Le mode d'utilisation de ces sols a aussi une forte influence sur l'érosion : jachères et semis direct sous litière protègent mieux les terres de l'érosion que le labour. Deux tests de laboratoire combinés ont bien reflété ces différences.

Les zones de montagne méditerranéennes

• *Évolution de la dynamique de l'eau et de la gestion des terres au Maroc.* La surexploitation des forêts, le surpâturage et finalement la mise en culture de terres fragiles entraînent l'augmentation du ruissellement et une diminution des eaux utiles et fragilisent donc la résistance du milieu aux périodes déficitaires. En choisissant des cultures à cycles courts et l'élevage extensif, les paysans tentent de s'adapter aux changements climatiques, mais il vaudrait mieux tirer profit des précipitations en couvrant mieux les terres et en développant des techniques culturales capables de maintenir la porosité des horizons de surface.

• *Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de CES en Afrique du Nord.* La gestion du ruissellement a longtemps été orientée vers la construction de grands barrages. Cependant, le nombre de sites n'est pas infini et les petits barrages permettent de redistribuer les eaux plus près des paysans, de développer des centres de développement rural et de mieux gérer les risques environnementaux à leur source. Mais les petits barrages ont une durée de vie très limitée si on n'a pas prévu l'aménagement préalable de l'ensemble du bassin-versant. Il faut donc aboutir à une stratégie d'aménagement durable du terroir rural pour optimiser la disponibilité en eau de bonne qualité tout en réduisant la production de sédiments : on en revient à une lutte biologique appuyant des techniques mécaniques.

• *Bilan d'enquête sur la DRS en Algérie.* Après 40 années d'efforts considérables pour juguler l'érosion, l'Algérie dispose d'un terrain expérimental immense pour évaluer l'efficacité technique, sociale et environnementale d'une stratégie de DRS en montagne méditerranéenne semi-aride.

L'enquête menée par une douzaine de chercheurs et les services des Forêts d'une trentaine de départements du nord de l'Algérie aboutit à une conclusion grave : sur 385 000 hectares aménagés, 80 % sont constitués de divers types de banquettes, dont 20 % ont été volontairement détruites par les labours, 30 % ont favorisé le ravinement et les glissements de terrain, 30 % sont en mauvais état et n'ont jamais été entretenues, et seulement 20 % sont en bon état de marche, mais on peut se demander s'ils ont jamais connu de sérieux problèmes d'érosion. La majorité des paysans rejettent cette approche technocratique qui soustrait 5 à 15 % des terres cultivables sans améliorer les rendements. Devant un tel gaspillage, on comprend l'urgence des recherches sur les stratégies plus proches des besoins des paysans comme la GCES qui réduit les risques de ruissellement et d'érosion tout en améliorant sérieusement les revenus de la terre et du travail.

- *Influence de l'utilisation des terres sur les risques d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie.* Une autre équipe de recherche a montré que l'érosion en nappe sur versants cultivés ou bien couverts reste modeste si on maintient une bonne porosité de la surface du sol soit par des techniques culturales appropriées soit par la jachère améliorée. En revanche, lors des averses particulièrement agressives tombant sur sol nu, encroûté, surpâturé ou déjà saturé, le ruissellement abondant creuse des ravines sur les fortes pentes, provoque des inondations, glissements de terrains et dégradations des berges et l'envasement rapide des lacs de retenue. La lutte antiérosive doit donc comporter un volet amélioration des systèmes de production par les paysans et un volet plus technique de restauration des ravines, aménagement des oueds et des pistes, et reforestation des terrains trop superficiels ou pentus pour protéger les aménagements et les agglomérations urbaines à l'aval.

- *Indicateurs de risques d'érosion sur les principaux sols d'un terroir du Rif occidental, Maroc.* Les mesures localisées de l'érosion posent toujours des problèmes de variabilité spatiale lorsqu'on veut appliquer les évaluations à l'échelle du terroir ou du bassin-versant. Cette recherche a tenté de combiner une enquête rapide en milieu villageois, à des simulations de pluies et études de laboratoire pour comparer le diagnostic du terroir par les villageois à celui des scientifiques. Partant des connaissances traditionnelles des sols et de leur utilisation, on a comparé les indicateurs d'infiltration, les états de la surface des sols et les tests de stabilité des macro-agrégats sur cinq sols et quatre couverts végétaux. On a montré que le ruissellement et les pertes en terre sont liés à ces indicateurs. À l'aide d'un système d'information géographique (SIG), il est donc possible d'établir une carte des risques et d'indiquer les meilleures utilisations des terres pour stabiliser le terroir tout en intégrant les connaissances paysannes.

- *Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France).* La vigne couvre mal le sol : c'est un système méditerranéen très intéressant pour tester l'impact des techniques culturales. Sur un vignoble de 12 % de pente, 36 pluies simulées ont été réalisées pour sélectionner les techniques les plus réductrices du risque de ruissellement. Le paillage et le sarclo-empierrement sont les techniques les plus favorables, tandis que le désherbage chimique total et le sarclo-dépierrage sont les pires : le sarclage conventionnel et l'enherbement ont donné des réponses intermédiaires. Après analyse des paramètres explicatifs, on montre que l'érosion est réduite par la couverture de la surface du sol (pailles, résidus, cailloux posés et adventices rampantes), et le ruissellement par la porosité et la stabilité des macro-agrégats de l'horizon superficiel. Les cailloux posés à la surface d'un sol poreux protègent les agrégats, maintiennent une

bonne infiltration et réduisent l'érosion tandis que des cailloux enfouis ou piégés dans les croûtes réduisent l'infiltration. Ces tests rapides permettent d'orienter les recherches mais doivent être confirmés par des études plus durables en parcelles de plus de 20 m de long et par des enquêtes pour vérifier l'acceptabilité par les viticulteurs des techniques conservatoires les plus efficaces.

La recherche en Afrique

Les problèmes d'érosion autour du bassin méditerranéen et du Sahara sont connus depuis des siècles, mais les recherches ont démarré depuis moins de 50 ans. Or l'Afrique a vu sa population multipliée par cinq en un siècle, d'où une accélération brutale des dégâts d'érosion et l'importance des recherches sur la mise au point de techniques efficaces de lutte et de restauration de la productivité des sols. L'application de l'équation USLE (*Universal Soil Loss Equation*) a permis de constater l'agressivité, la bonne résistance des sols à la battance des pluies et l'efficacité du couvert végétal au ras du sol. En revanche, le facteur topographique est plus complexe que prévu et les techniques antiérosives (labour et billons en courbes de niveau) ne sont efficaces que sur des pentes faibles (< 10 %). La lutte antiérosive (LAE), dès lors, peut évoluer des grands travaux de terrassement vers des approches participatives fondées sur l'adaptation du système de production, la mise au point de techniques biologiques combinées avec des compléments de nutriments pour mieux valoriser la terre et le travail en milieu rural. À l'avenir, les recherches devraient s'orienter vers l'érosion aratoire, le ravinement, l'aménagement des pistes, des ravins et des oueds qui concentrent les eaux de surface. Un des principes de la GCES consiste à transformer les dangers des eaux de ruissellement en chances pour irriguer localement des cultures rentables : cette approche interpelle les paysans car elle leur restitue leur liberté d'innover. ■

L'échec de la défense et restauration des sols (DRS)
(photo E. Roose).



Certaines terres rouges (fersiallitiques et couches Permo-Trias) sont particulièrement fragiles. Ce versant du Rif (Beni Bouffrah) a fait l'objet d'un aménagement de DRS (reforestation en pins sur banquettes) dont il ne reste que quelques traces. Les paysans ont repris les terres cultivables, formé des talus et aménagé les ravines (seuils valorisés par des Eucalyptus). Cette exploitation extensive aboutira à l'abandon de ces terres ruinées.

Préalables à la GCES (photo E. Roose).



Le dialogue entre chercheurs et paysans doit aboutir au diagnostic : dans le Rif semi-aride, le ravinement domine largement l'évolution du paysage. Il faut donc trouver ensemble tous les moyens pour retenir l'eau sur les champs ou en aval pour l'irrigation d'un jardin.

Gestion du ruissellement dans le Rif (photo E. Roose).



Les chemins parcourus par le bétail entre le village et le parcours (draille) sont souvent creux, pavés et servent de drain aux eaux de ruissellement provenant des parcours souvent très dégradés. Ce ruissellement chargé de matières nutritives est recyclé et orienté vers des champs cultivés ou des ravines aménagées.

Aménagement combiné des colluvions (photo E. Roose).



Terrasses en gradins, murettes en pierres sèches, capture des sources et irrigation par seguia, fumure sur céréales et légumes, travail du sol à l'araire, plantations fruitières des terres caillouteuses ou trop raides. Plus haut, terrasses progressives avec cordons de pierres et cultures extensives (céréales) ou arbustives (noyers).

Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive — Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

Éric Roose

Institut de recherche pour le développement (IRD),
Réseau Érosion
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5
<roose@mpl.ird.fr>

Résumé

Toutes les sociétés rencontrent des problèmes de dégradation du milieu par divers types d'érosion et ont tenté d'y porter remède par des stratégies traditionnelles adaptées aux pressions foncières, en aménageant les eaux de surface pour améliorer la productivité des sols et stabiliser les versants. Leur abandon ne signifie pas leur manque d'efficacité antiérosive, mais l'évolution du milieu socio-économique.

Depuis l'ère industrielle, les États centralisés ont dépêché leurs ingénieurs en milieu rural pour tenter de réduire les nuisances de l'érosion 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 créées des stratégies d'équipement en petite hydraulique agricole : la restauration des terrains de montagne (RTM), en 1850, dans les Alpes et Pyrénées, la conservation de l'eau et des sols (CES), en 1930, dans la Grande Plaine américaine, puis la défense et restauration des sols (DRS) (1940-1980), dans les montagnes qui entourent la Méditerranée. Au séminaire de Porto Rico (1987) furent étudiées les multiples causes des échecs 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) fut donc proposée qui tente de mieux prendre en compte les préoccupations immédiates des paysans : assurer leur survie, en valorisant la terre et le travail. C'est une véritable révolution pour les conservacionistas, qui entraîne une modification des priorités : 1. D'abord améliorer la gestion des bonnes terres qui réagissent le mieux aux investissements avant de s'occuper « des terres mortes » d'où s'échappent beaucoup de sédiments. 2. Engager un dialogue entre les techniciens et les paysans dès le début des projets sur la perception par les paysans des problèmes d'érosion et de leurs solutions. 3. Rechercher de nouveaux systèmes de production en vue d'une gestion plus rentable et plus durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. 4. Confier à une équipe spécialisée de l'État, le traitement délicat de l'érosion catastrophique (ravines, mouvements de masse, inondations et aménagement des rivières), mais responsabiliser les paysans sur l'amélioration de l'environnement rural. L'auteur présente enfin l'évolution des techniques de LAE en Afrique depuis la colonisation et rapporte les tendances actuelles dégagées lors du colloque de Yaoundé sur « l'homme et l'érosion ». D'une part, l'influence de l'érosion est très néfaste sur la productivité des terres, mais, d'autre part, la recherche développe des méthodes de lutte antiérosive simples et efficaces et propose des techniques pour restaurer la capacité de production des sols dégradés suffisamment épais.

Mots clés : Lutte antiérosive ; Historique.



Summary

Evolution of soil and water conservation strategies — Towards land husbandry

Faced with the damages caused to the environment as a result of erosion, man has long tried to reduce them through traditional strategies adapted to land pressure and geared to improving water control for a better soil fertility and productivity. The fact that they have been dropped does not mean that these strategies are not efficient, but simply that they are no longer adapted to today's socio-economic conditions. From the mid-1850s onwards, centralised governments started sending their engineers to the countryside with a view to reduce the damages to the quality of the water and to industrial or urban equipments erosion brought in its stride. Parallel to a series of economic and ecological crises, agricultural hydraulic equipment strategies were gradually designed : soil restoration in mountain terrains (RTM, restauration des terrains de montagne) in 1850, in the Alps and the Pyrenees ; soil and water conservation (SWC) during the 1930 Great Plain crisis in the United States ; and soil and defence restoration (DRS, défense et restauration des sols), from 1940 to 1980 in the mountains of the Mediterranean. Analysing the various reasons for the failure of SWC-based projects, the Porto Rico workshop of 1987 pointed out to the non-involvement of the farmers in the decision-making process as well as to the inefficiency of the techniques proposed to improve soil productivity. A new strategy (land husbandry) was proposed that would better take into account the vital problems of the farmers, i.e. how to survive while making the best possible use of land and labour. To soil conservationists, this was a revolution entailing a redefinition of priorities : i) first of all, improve the management of the « best » land to increase farmers' benefits and then deal with the « bad » lands which produce most of the sediments ; ii) second, initiate a participative approach bringing together technicians and farmers, right from the beginning of a project, so as to find out how farmers perceive erosion problems and how these can be best dealt with ; iii) develop new farming systems for a more cost-effective and more sustainable water, biomass, and soil fertility management ; iv) let government-appointed specialists tackle catastrophic erosion damages (torrential gullies, landslides, floods and river control) while letting farmers be responsible for improving the rural environment. As a conclusion to this paper, the evolution of erosion control techniques in Africa from the colonial period till the « Man & Erosion » Colloquium held in 2000 in Yaoundé, is presented. Research has demonstrated the tremendously negative impact of sheet erosion on topsoil fertility, but it has also shown the possibility to restore and even improve soil productivity using simple techniques such as direct drilling under litter or under leguminous cover. Organic matter control must be complemented by mineral nutrient in order to be combined with SWC techniques in order to enhance soil and labour productivity.

Key words: Erosion control Strategies; Historical Highlights.

Diversité des causes physiques et humaines de l'érosion

Au commencement du monde, la terre et l'eau étaient intimement liés : de cette union est née toute vie. C'était il y a 4,5 milliards d'années. Mais leur histoire allait connaître deux séries de crises, l'une géologique, et l'autre, beaucoup plus tardive, d'ordre démographique.

D'une part, quand la terre a commencé à migrer en plaques, elle a provoqué la création de montagnes et des cycles d'érosion active (phase de rhexistase de la théorie d'Erhart [1]) suivis de périodes d'« érosion normale » ($E = 0,1 \text{ t/ha/an}$) où le décapage moyen ne dépasse pas 1 mètre en 100 000 ans, sous un couvert naturel. De ces alternances entre morpho-

genèse et pédogenèse sont nés les paysages et les sols que nous rencontrons aujourd'hui.

D'autre part, ce n'est que beaucoup plus tard que les hommes et les animaux se sont multipliés au point de couvrir la majorité des terres arables. Le squelette de « Lucie » ne date que de 15 millions d'années et les grandes agglomérations de quelques siècles. Ce n'est qu'au XX^e siècle que l'Afrique a connu une croissance démographique formidable : la population a doublé tous les 25 ans, ce qui a entraîné des problèmes socio-économiques et environnementaux sans précédent. L'augmentation des besoins vitaux et sociaux a entraîné l'extension des défrichements pour les cultures et l'intensification du pâturage qui, à leur tour, ont déclenché « l'érosion accélérée » ($E = 10 \text{ à } 700 \text{ t/ha/an}$) 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). En une génération (25 ans), l'érosion peut décaper l'horizon humifère et causer l'abandon de la terre. Mais il arrive que l'érosion se développe encore plus vite. On parle « d'une érosion catastrophique » quand l'homme développe ses activités sur des terres particulièrement fragiles. Les paysages méditerranéens peuvent rester stables pendant des années, jusqu'à ce qu'une averse rare sature le sol et provoque des ravinements (100 à 300 t/ha/jour) ou pire, des glissements de terrain (plusieurs milliers de m³ de boue en une heure) et des inondations brutales. En octobre 1999, dans l'Aude, département du sud de la France, il est tombé près de 500 mm en 2 jours inon-

dant tout un département (35 morts et des milliards de dégâts) : toute l'économie a été désorganisée par une seule averse tombant dans une zone méditerranéenne, montagneuse, viticole et peu couverte. Les pluies cévennoles causent régulièrement leur cortège de dégâts à l'automne, quand la masse d'air chaud et humide de la Méditerranée rencontre un front froid venu du nord : exemple, le 28 octobre 1988, à Nîmes, il est tombé 650 mm en 6 heures, et le 9 septembre 2002, à Sommière, dans le Gard, 600 mm en deux jours.

En définitive, l'érosion reste encore mal connue et surtout mal maîtrisée, car elle est discontinue dans le temps et dans l'espace. Les processus, les causes et les facteurs déterminant l'érosion étant très variables, il n'y a pas de recette généralisable de lutte antiérosive. Il ne s'agit pas seulement d'un simple problème technique ; l'érosion c'est aussi le signe de la dégradation d'une société en mutation. La presse et les politiciens se mobilisent lors des catastrophes, mais négligent le travail de sappe des éléments qui, pluie après pluie, préparent les drames [2].

Dans cette synthèse seront présentés une analyse historique de l'évolution des stratégies de lutte contre l'érosion accélérée par les activités humaines dans le monde, un exemple de recherche en Algérie sur la nouvelle approche (GCES), puis l'évolution des techniques antiérosives en Afrique, et enfin, le bilan des nouvelles tendances telles qu'elles ont été exprimées au colloque international de Yaoundé en décembre 1999.

La mondialisation, une époque favorable aux remises en cause

L'érosion accélérée et la pression démographique

En agglomérant les peuples dans les villes, chaque civilisation a créé des conditions favorables au développement du ruissellement, à l'accélération de l'érosion et de la dégradation de la fertilité des sols. Les villes et les routes sont des milieux peu perméables qui accumulent les volumes ruisselés, accélèrent le ravinement, provoquent des inondations et des dépôts de boues. La demande urbaine en vivres entraîne l'extension des cultures sur des terres plus fragiles, l'intensification des techniques culturales et l'augmentation des risques de dégradation des sols.

L'opinion générale pense qu'il y a des liens étroits entre la dégradation du milieu et la densité démographique [projet Glad] [3]. Cependant, on a observé qu'une diminution de la population, suite à l'émigration, ne réduit pas forcément l'érosion :

le manque de main-d'œuvre pose des problèmes d'entretien des paysages et des dispositifs de gestion des eaux.

Certains pensent, au contraire, que plus la main-d'œuvre est abondante, plus les terres sont soignées et les risques d'érosion réduits (« *more people, less erosion* »). C'est le cas dans le pays bamileke au Cameroun [4], à Madagascar [5], ainsi qu'au Kenya [6], ou dans le midi de la France [7], où les terrasses ne sont plus entretenues car le travail est mieux rémunéré en ville.

Le schéma de la figure 1 montre que la relation entre la densité de la population et l'érosion n'est pas linéaire. En Afrique, Roose [8] a observé des états de crise environnementale pendant laquelle la vie est si dure que la population est obligée de choisir entre l'émigration vers des lieux plus cléments, ou la modification du système de production légué par les ancêtres. Il s'en suit une alternance de périodes de crise et de périodes plus stables, où se succèdent des systèmes de production adaptés à chaque situation foncière. A chaque stade, correspond un mode de gestion des ressources en eau, en bois, en énergie, en nutriments, en bétail, en cultures. On part d'un milieu naturel riche en diverses ressources qu'on exploite et épuise progressivement, avant de réintroduire des ressources artificielles.

Face aux crises d'érosion, deux logiques

Pour surmonter ces crises, les sociétés ont développé des stratégies de lutte anti-érosive en fonction de deux logiques [9] :

- *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 et en développant des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau sur le versant, en concentrant la biomasse et la fertilité sur les terres cultivées, et en protégeant les sols contre divers types d'érosion.

- *une logique aval, partagée par les consommateurs d'eau, les citadins et les industriels*. Leur objectif est de protéger la qualité des eaux et les aménagements. Pour le bien public, le pouvoir central envoie ses ingénieurs pour imposer dans les campagnes des équipements hydrauliques (barrages, terrasses, banquettes, drains) dont l'objectif principal est de réduire les transports solides et de protéger la qualité des eaux et les équipements (aménagements des vallées, réseau routier, ouvrages d'art et villes).

Un monde en pleine mutation économique

La mondialisation qui provoque actuellement la restructuration de l'économie, en-

traîne à sa suite une crise sociale et environnementale : c'est une époque de remise en cause favorable à l'évolution des mentalités et à la réflexion sur la gestion des ressources au niveau du terroir, des régions et des ensembles de régions.

Évolution des stratégies antiérosives dans le monde

Toutes les civilisations ont rencontré des problèmes de dégradation des terres : devant ces crises, les hommes ont réagi selon les conditions socio-économiques de leur époque [8].

Stratégies traditionnelles liées aux conditions climatiques et économiques

Depuis 7 000 ans, l'homme a accumulé des vestiges de sa lutte pour maîtriser les différentes formes d'érosion et améliorer la gestion de l'eau sur les versants et la fertilité des sols [10]. L'analyse de la répartition spatiale des systèmes de lutte et des causes de leur disparition montre que l'efficacité des méthodes traditionnelles est strictement liée aux conditions économiques des sociétés où elles se sont développées.

Deux exemples illustreront cette hypothèse.

- *La culture itinérante sur brûlis* est probablement la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre et du travail [11-13]. Pour que ce système reste équilibré (brève culture sur brûlis de la biomasse, suivie d'une longue jachère), il faut une réserve de terre considérable (10 à 20 fois la surface cultivée) et une économie d'auto-subsistance. Cette stratégie ne s'applique que sur des terres peu peuplées (moins de 20 à 40 habitants au kilomètre carré, selon la productivité régionale), suffisamment profondes et arrosées. Dès que les besoins vitaux et la pression foncière augmentent, la durée de la jachère diminue et le système commence à se dégrader : c'est le cas au Sahel et dans le Rif (Maroc).

- A l'opposé, se sont développées les *terrasses en gradins irrigués* (2 000 ans avant J.-C., en Asie) et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres (1 000 ans après J.-C., en Crète), là où la population est dense, les terres cultivables rares et le travail bon marché. Comme ces aménagements exigent un gros effort pour la construction des terrasses (700 à 1 200 hommes.jours.ha⁻¹), pour l'entretien des tols et la restauration de la fertilité des sols remués, il faut que la production soit rentable ou vitale. Ces améliorations foncières ne sont acceptées

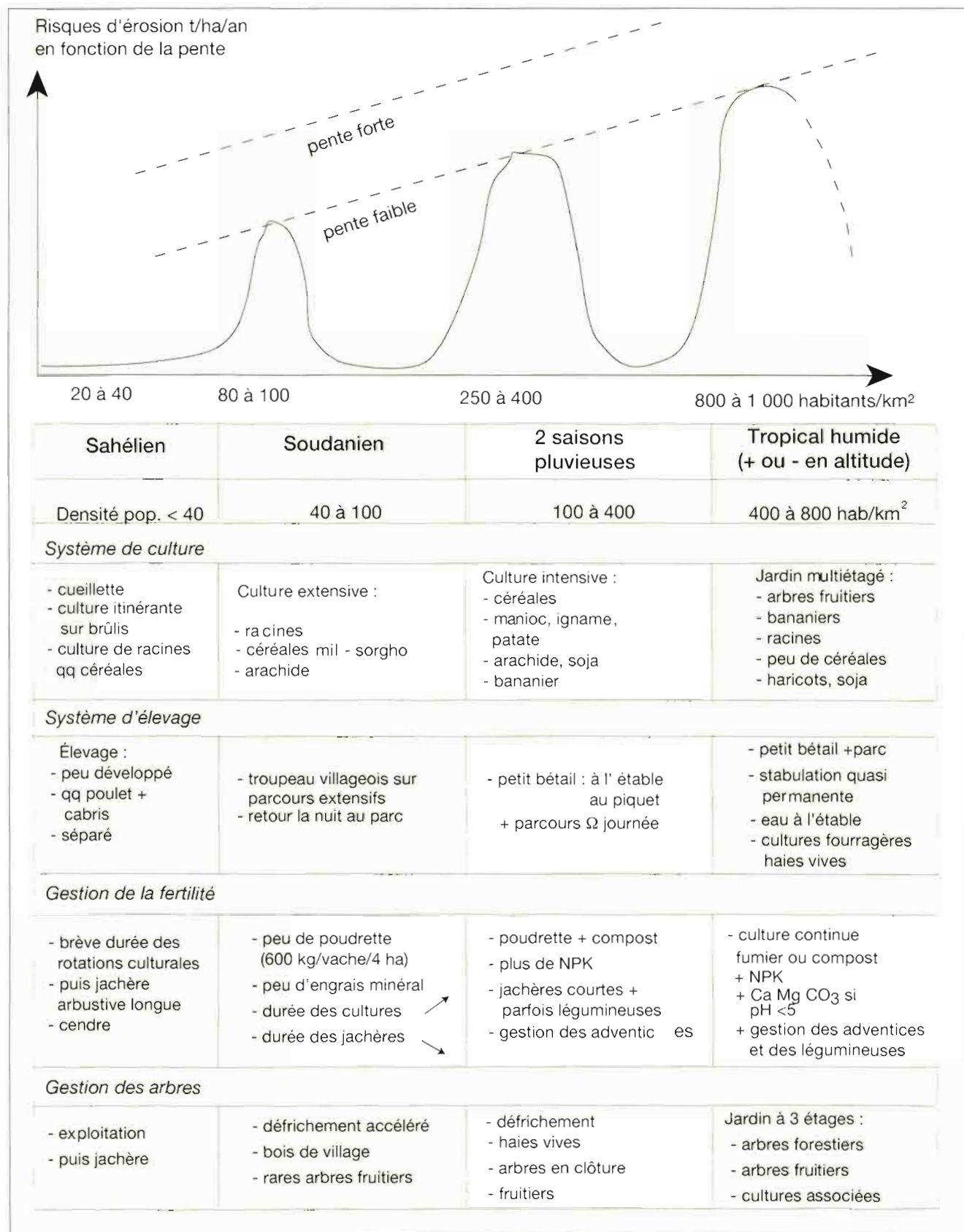


Figure 1. Relation entre la densité de la population, l'érosion, le système de culture, le système d'élevage et la gestion de la fertilité. Ce schéma adapté à l'Afrique devra être nuancé en fonction de la fréquence des pluies, de la pente et des potentialités des sols (d'après [8]).

que là où les paysans n'ont plus d'autre choix pour subsister (pressions foncières, militaires, religieuses ou économiques) ou pour produire des cultures particulièrement rentables (fleurs à Nice ou cannabis dans le Rif).

Mais actuellement, la mécanisation de l'agriculture, les salaires dans l'industrie, la crise économique, le coût de la main-d'œuvre, l'émigration et la désintégration des sociétés traditionnelles entraînent l'abandon de la plupart de ces techniques anciennes, décrites par les ethnologues, mais méprisées par les technocrates [14]. Ce n'est pas parce qu'elles sont inefficaces que ces techniques sont abandonnées, mais à cause du changement des conditions socio-économiques ou démographiques. En un siècle, la population a quintuplé, malgré les guerres, et les besoins sociaux ont augmenté plus vite encore.

Stratégies modernes d'équipement des montagnes : la logique de l'État

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

- La restauration des terrains en montagne (RTM) a été développée en France dans les années 1850, pour faire face à la crise d'érosion due aux montagnards qui ne pouvaient survivre sans mener leurs troupeaux sur les terres communales déjà surpâturées. La dégradation des couvertures végétales et le tassement des sols par le bétail ont entraîné le développement catastrophique des torrents. Pour protéger les vallées aménagées et les voies de communication, l'Office national des forêts a racheté les terres dégradées, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents [9].

- Aux États-Unis d'Amérique, le Service de conservation de l'eau et des sols (CES ou SWC en anglais) a été créé lors de la terrible crise de 1930, pour conseiller les fermiers volontaires qui demandaient aux agronomes un appui technique et financier pour lutter contre l'érosion. En effet, l'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes (coton, arachide, maïs) dans la Grande Prairie a déclenché une érosion éolienne catastrophique. Des nuages de poussières obscurcissent le ciel en plein jour (*dust bowl*) : 20 % des terres cultivables furent dégradées à cette époque. Sous la pression de l'opinion publique, l'État dut réagir et mit en place simultanément un programme de recherche et

un service de conservation de l'eau et des sols (SWC Service) au niveau de chaque comté.

Deux écoles s'affrontent encore de nos jours sur l'approche des problèmes de LAE :

- l'une, sous l'impulsion de Bennet [15] organise la lutte antiérosive (LAE) autour des moyens mécaniques de réduction de la vitesse et de l'énergie du ruissellement pour réduire le ravinement (invention des terrasses de diversion du ruissellement vers des exutoires enherbés, technique validée uniquement sur les sols argilo-limoneux) ;

- l'autre, à la suite des travaux de Ellison [16] sur la battance des gouttes de pluie et des équipes de Wischmeier et Smith [17], organise la LAE en modifiant les systèmes de culture pour absorber l'énergie des pluies sur les champs en améliorant le couvert végétal [18] et la rugosité de la surface du sol. Pour réduire le ruissellement dès son origine, la LAE s'intéresse cette fois au développement de la couverture végétale, à la gestion des résidus de culture et aux techniques culturales conservatrices.

- 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 30 à 50 ans) et à 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, correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers). Pour les forestiers, il s'agissait avant tout de mise en défens des terres dégradées par la culture et le surpâturage, de reforester les hautes vallées pour restaurer par les arbres la capacité d'infiltration des sols dégradés. « Tous les problèmes ne naissent-ils pas du surpâturage et du défrichement abusif ? » [19-21].

Cependant, depuis les années 1975, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches technocratiques menées trop rapidement, sans l'avis des « bénéficiaires ». Aux États-Unis, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de CES 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 pour les sols profonds) qui viennent polluer les eaux des barrages [22, 23]. Si la fréquence des vents de sable a été réduite aux États-Unis, la pollution des eaux, les inondations et l'envasement des barrages posent encore aujourd'hui de graves problèmes. En Algérie, malgré 800 000 hectares de reforestation (ceinture verte) et l'aménagement de banquet-

tes sur 350 000 hectares cultivés, la dégradation de la végétation et des sols continue, l'envasement des barrages et le manque de bois restent des problèmes préoccupants. En Afrique de l'Ouest et du Nord, des paysans préfèrent parfois abandonner leurs terres aménagées par l'État plutôt que d'entretenir les banquettes anti-érosives car ils craignent qu'il ne s'agisse d'un piège dressé par l'Administration pour s'emparer de leurs terres [24]. Les paysans ont vite constaté que ces banquettes faisaient perdre 5 à 15 % des surfaces cultivables, sans augmenter pour autant les rendements des parcelles restantes : celles-ci continuent d'ailleurs de se dégrader du fait de l'érosion en nappe. On comprend que les paysans se méfient des projets de LAE qui leur causent plus de gênes que de bénéfices. « Pourquoi fournir tant d'efforts, pour si peu de bénéfice sur la production ? »

La GCES, une stratégie participative visant à mieux gérer les ressources en eau, en biomasse et en nutriments

Au séminaire de Porto Rico [25], furent analysées les causes de l'échec ou de la réussite des projets englobant un large volet de LAE. Une nouvelle stratégie y est née, qui tient mieux compte des besoins immédiats des paysans et des éleveurs. Elle tente de résoudre leurs problèmes immédiats : valoriser la terre et le travail des ruraux en améliorant le système de culture, en particulier, l'infiltration de l'eau, l'enracinement et la nutrition des plantes.

Cette approche a été nommée « *Land husbandry* » par les anglophones [26, 27] et « *Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols* » (GCES) en français [8, 28].

Partant du principe que les aménagements antiérosifs ne peuvent être durables sans la participation paysanne, cette stratégie tient compte de la façon dont les ruraux perçoivent les problèmes de dégradation des sols et propose l'intensification de la productivité des terres pour faire face à la croissance démographique. En effet, le défi à relever est de doubler la production en 20 ans, tout en réduisant significativement les risques de ruissellement et d'érosion. Il s'agit d'intégrer la mentalité paysanne pour laquelle tout effort doit être payé de suite. Il n'est plus acceptable de proposer des travaux lourds de conservation des sols sur les terres raviniées, d'une part parce que bien des sols tropicaux cultivés sont déjà épuisés (il est trop tard pour les conserver : il faut restaurer leur potentiel de production) et, d'autre part, parce que la demande de produits de consommation ne peut plus attendre d'hypothétiques effets à long terme : la population rurale est trop pauvre et il faut répon-

dre à sa préoccupation immédiate (sa survie).

Les résultats récents ont bien montré qu'il ne suffit pas de réduire le ruissellement et de conserver l'épaisseur des sols pour intensifier, ou même maintenir, la productivité des terres [29]. De même, tenter de restaurer les propriétés primitives des sols ne nous paraît pas raisonnable, car le temps à patienter et le prix à investir sont trop élevés et peu rentables : en effet, les sols tropicaux vierges ne sont pas forcément riches et fertiles. Mieux vaut donc améliorer l'état structural de l'horizon où vivent les racines et nourrir directement les cultures. Les terrassements exigent des travaux considérables pour leur mise en place (de 750 à 1 200 jours de travail/ha) et leur entretien (10 à 40 jours/ha/an), mais ils n'ont pas amélioré la productivité des sols ni même réduit leur vitesse de dégradation : l'érosion en nappe et rigoles n'est pas interrompue par les fossés et autres terrasses. En revanche, on peut observer que les fossés accélèrent la concentration des eaux de surface dans les drains naturels (développement de ravines) et dans les rivières, et ils provoquent généralement une recrudescence de l'érosion des berges en fonction des nouveaux débits de pointe [30].

Dans le cadre de la GCES, la nouveauté consiste justement à gérer au mieux les terres productives, l'eau, la biomasse et les nutriments essentiels au développement harmonieux des cultures. L'intensification de la production augmente la couverture végétale, la biomasse racinaire et les résidus de culture, l'activité de la faune perforatrice du sol et la rugosité de la surface des champs : elle réduit indirectement les risques de ruissellement et d'érosion. La lutte antiérosive cesse d'être une fin en soi : elle fait partie du paquet technologique qui permet d'assurer la gestion durable de la couverture pédologique.

Les stratégies d'équipement ont concentré leur priorité sur l'aménagement des terres les plus dégradées, d'où proviennent la majorité des sédiments qui polluent les eaux indispensables aux consommateurs des villes. En créant des banquettes sur les plus mauvaises terres, on ne réduit pas les causes de l'érosion. Les enquêtes en Haïti ont montré que les paysans préfèrent investir d'abord dans leurs terres productives pour tirer le meilleur revenu de leur améliorations foncières. « Mieux vaut prévenir que guérir » et l'expérience de 50 ans de CES plus DRS a montré que l'on n'arrive pas à éteindre les foyers d'érosion.

En conclusion, on ne dispose que d'une douzaine d'années d'expérience en matière de GCES, mais cette stratégie a montré de grandes potentialités dans des régions très variées, du nord de la France

[31] au Sahel [32], des savanes soudanaises [33] aux montagnes tropicales du Rwanda [29], du Burundi [34], d'Haïti [35], des montagnes méditerranéennes [36] aux zones volcaniques de l'équateur [37].

Cette approche interpelle les paysans car elle s'appuie sur les techniques traditionnelles et exige leur conviction et la recherche en commun de solutions adaptées au diagnostic local et aux possibilités économiques de chacun. Elle valorise les capacités d'innovation des chercheurs et des paysans. Elle exige du temps, car il faut changer la mentalité d'assistés en volonté de prise en charge communautaire de l'environnement rural. Cela peut poser des problèmes avec les bailleurs de fonds qui souhaitent voir des transformations rapides du paysage en quelques années. C'est encore un vaste domaine de recherche, car la diversité des systèmes de production, des problèmes économiques et des milieux physiques est infinie. De plus, on est loin de connaître la diversité des paramètres modifiant l'intensité ou même le type d'érosion, ou l'efficacité des techniques antiérosives sur le rendement des cultures et des associations de cultures. En définitive, on peut distinguer deux domaines dans la LAE : celui de l'État qui continue à financer la RTM et les catastrophes naturelles et, par ailleurs, celui de la gestion du terroir qui est du ressort des paysans qui peuvent adapter leurs systèmes de production.

Exemple de GCES en moyenne montagne méditerranéenne d'Algérie

Le défi algérien des années 1985-1995

Depuis les années 1950, des pressions démographiques et socio-économiques ont contribué à développer une sévère dégradation de la couverture végétale, des sols et du réseau hydraulique des montagnes septentrionales de l'Algérie. Les processus en cause sont multiples : défrichement des pentes fortes pour étendre les cultures vivrières, surpâturage et feux dans les forêts méditerranéennes, faibles restitutions et minéralisation rapide des matières organiques du sol. L'érosion est partout présente : érosion en nappe sélective des particules fines les plus fertiles, décapage de l'horizon humifère par formation de rigoles et surtout par décapage mécanique par les outils de travail du sol ($E = 10$ à 50 t/ha/an), ravinement très actif lors des averses de fréquence rare tombant sur des sols nus, travaillés

et/ou saturés (100 à 300 t/ha/an), glissements de terrains argileux, marneux ou schisteux, déstabilisation des berges par les oueds et des versants par le réseau routier.

Le défi en 1985, période de récession industrielle, est de maintenir une population croissante en zone rurale, d'intensifier la production agricole et l'élevage en montagne semi-aride, tout en protégeant la qualité des eaux de surface et les barrages indispensables pour l'alimentation en eau potable des villes en forte croissance.

La recherche en coopération entre l'INRF et l'Orstom

Les directeurs de l'Institut national de recherches forestières d'Algérie (INRF) et de l'Institut de recherche pour le développement (IRD-ex-Orstom) ont uni leurs moyens pour développer un programme de recherche sur la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols qui se décline en trois sous-programmes : enquête sur l'efficacité des aménagements antérieurs de DRS, quantification des processus d'érosion et aménagement de trois micro-bassins cultivés.

En dix ans, une douzaine de chercheurs algériens et français ont réalisé une enquête sur l'état actuel des 350 000 hectares aménagés par l'administration des Forêts, ont participé à l'aménagement d'une douzaine de ravines et micro-bassins-versants et installé un réseau de dispositifs de mesure du ruissellement et de l'érosion (50 parcelles d'érosion de 100 à 200 m² dans les champs paysans) dans le nord de l'Algérie (régions de Tlemcen, Mascara et Médéa). Ce sont les résultats des parcelles de Médéa dont nous donnerons brièvement les résultats [36, 38].

Ces parcelles aménagées au milieu des champs paysans reflètent la variabilité des sols (rouges fersiallitiques, bruns calcaires, vertisols gris, lithosols) sur pentes fortes (12 à 40 %), sous divers systèmes de production : système céréalier, arbres fruitiers, vigne, et silvo-pastoral. Les pluies varient de 300 à 600 mm selon les années et les sites. Sur chacun des sites furent comparés une parcelle nue en jachère travaillée (témoin universel du modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier et Smith [17]), un système traditionnel (témoin cultivé régional) et deux parcelles améliorées soit par l'apport d'engrais adapté au niveau de production souhaité, soit par l'introduction de rotations de cultures complémentaires (céréales/légumineuses), travail adapté du sol (pas trop fin pour éviter la battance), pesticides et semences améliorées.

Quelques résultats des mesures

- Les pluies ont été déficitaires (250 à 550 mm/an) et peu agressives (érosivité $R = 20$ à 50), mais on a pu observer quelques événements de fréquence rare (80 à 150 mm/jour) dans ces versants semi-arides.
- Les coefficients de ruissellement annuels moyens sont faibles : 10 à 18 % des pluies pour les jachères nues, 3 à 12 % pour les cultures vivrières traditionnelles et à peine 1 % pour les systèmes améliorés. Lors des averses les plus importantes, le coefficient de ruissellement maximal atteint 34 à 80 % sur sol nu, 26 % sous témoin local et 3 à 9 % sous culture améliorée. Il y a donc des méthodes culturales intensives qui peuvent réduire le ruissellement à des proportions raisonnables. Mais lorsque de longues averses abondantes et intenses tombent sur des sols peu couverts ou encroûtés, le ruissellement dévale avec beaucoup d'énergie et ravine les versants.
- L'érosion en nappe et rigoles reste modérée : 2 à 20 t/ha/an sur sol rouge nu, 0,1 à 2 t/ha/an sous système régional, et moins de 0,1 t/ha/an sous système amélioré.
- Le ravinement, mesuré par le suivi de sections transversales, varie de 90 à 300 t/ha/an [39].

Discussion

- Ces résultats confirment ceux que Heusch [40] a trouvés jadis dans le pré-Rif marocain, à savoir que l'érosion en nappe est modeste et le ravinement cent fois plus fort, que la position topographique est parfois plus importante que l'inclinaison de la pente, d'où l'érosion linéaire remontrante, en particulier lorsque l'oued vient saper les berges.
- L'érodibilité des sols est réduite à cause de la présence de cailloux, d'une texture argileuse et d'argile saturée en calcium, donc stable. Les sols rouges fersiallitiques sont plus fragiles que les sols bruns et que les vertisols gris. Cela explique les paysages pentus qui ont bien résisté à l'agressivité des pluies.
- La couverture végétale des systèmes de culture a une forte action sur la réduction des risques de ruissellement et d'érosion, même lors des averses abondantes. On peut donc réduire efficacement les risques d'érosion en abordant en priorité ce facteur par l'intensification des cultures. Autrement dit, ce n'est pas la saturation du sol qui est la cause principale des transports solides, mais bien l'énergie des pluies plus ou moins bien interceptée par la litière et le couvert végétal : d'où l'intérêt de travailler les systèmes culturaux couvrant le sol plutôt que les fossés et autres drains capables de réduire la saturation du sol.

Tableau 1. Revenus nets en fonction des systèmes de production dans la région de Médéa (d'après [38]).

Systèmes de production	Revenus nets (S/ha/an)
Parcours extensif dans les bois communaux	25 S
Blé traditionnel, suivi d'une jachère pâturée	125 S
Vignoble traditionnel pour fruits de table	500 S
Rotation céréale blé/légumineuses (pois, lentilles, fèves.)	1 500 S
Vignoble ou fruitiers intensifs avec rotation intercalaire	3 000 S

- Enfin, le plus important pour les ruraux, c'est l'amélioration sensible des rendements des cultures en grains et en pailles (qui intéressent l'élevage). Le rendement du blé en grains sur des parcelles adjacentes est passé de 7 à 48 quintaux à l'hectare et la paille de 2 à 20 quintaux/ha/an en fonction de l'effort d'intensification. Plus le système de culture est intensif, plus il est productif et moins il perd d'eau, de matière organique (MO) et de terre riche en nutriments. Mais c'est le revenu net qui intéresse en définitive le paysan, une fois soustrait le coût des intrants (mais pas du travail). La comparaison des systèmes de production montre qu'il est largement gagnant (tableau 1).

On comprend dès lors que les paysans aient défriché les parcours pour produire des céréales, puis des fruitiers et enfin ont modifié d'eux-mêmes leur système de production, tout au moins avant les troubles dans la région de Médéa. Les vieux paysans nous ont d'ailleurs confirmé que les anciens pratiquaient déjà la culture intercalaire sous fruitiers (oliviers, figuiers et amandiers) : il leur manquait les engrais minéraux complémentaires et les variétés améliorées de semences valorisant les apports d'intrants. D'autres exemples de recherche pourraient confirmer l'importance des systèmes de cultures intensives et couvrantes sur le ruissellement (Rishirumuhirwa sous bananiers au Burundi [34], Boli au Cameroun [41]), mais c'est à Médéa que l'on a le mieux étudié les effets économiques de la maîtrise du ruissellement et de l'érosion à l'échelle du champ paysan.

Évolution des techniques de lutte antiérosive en Afrique

Avant la colonisation occidentale

De nombreuses techniques traditionnelles de lutte antiérosive ont été décrites par les géographes, agronomes et autres administrateurs des colonies au Congo belge [11, 42, 43], ou plus récemment [El Amami en Tunisie [44]; Critchley *et al.*, [14]; Reij *et al.*, [45]; Roose en Afrique

occidentale [46]; Roose, Sabir et De Noni en zone méditerranéenne [7]]. Signalons ici les techniques traditionnelles les plus connues :

- la culture itinérante sur brûlis [12, 13, 47] ;
- les techniques culturales permettant de maîtriser l'eau, les adventices et la fertilité des sols comme les diverses variétés de billonnage et de buttage [8] ;
- les divers modes de culture sous impluvium qui tentent de gérer le ruissellement : microbassins du Neguev [48], *tabias*, citernes et *jessour* du Maghreb [44, 49, 50], *zai* dans la zone soudano-sahélienne du Burkina, Mali, Niger, Tchad, Madagascar [46, 51] ;
- les haies vives défensives au Cameroun [52], au Rwanda [29] et en Guinée [53] ;
- les terrasses progressives au Cameroun [52, 54], au Burkina et Rwanda [29, 30] ;
- les terrasses en gradins (pays dogon au Mali [55] et Maghreb [7, 45, 56]) ;
- les paysages agroforestiers de la zone soudano-sahélienne : *Acacia albida*, *Karite*, *Nere* ([57]) et les arganiers du Sud marocain.

Une grande diversité de systèmes traditionnels ont été développés autour du désert pour capter les eaux de surface et de profondeur [44, 46, 58, 59].

L'époque coloniale

Les colonisateurs occidentaux ont imposé leurs stratégies de DRS ou CES, par des moyens de coercition tels que les populations se sont parfois révoltées (Kikuyus au Kenya). La LAE était, à cette époque, devenue un thème technique politiquement dangereux pour les leaders africains. Au Kenya furent imposées les terrasses de diversion ; au Rwanda, ce furent les fossés aveugles d'absorption totale ou les lignes d'herbes. Au Maghreb, les services de DRS ont imposé les banquettes d'absorption totale ou de diversion et la mise en défens des parcours et forêts dégradées. En Afrique et à Madagascar furent interdits les feux de brousse, si nécessaires pour les éleveurs et les pépinières de riz.

Depuis l'indépendance

Au moment de l'indépendance, deux réactions divergentes ont été observées. Dans

les pays où la LAE fait partie du service des Forêts très structuré comme en Algérie, les projets de DRS ont continué à donner du travail à la population montagnarde, sans changer les méthodes. Ailleurs, la LAE a été simplement abandonnée, en réaction aux méthodes coloniales contraignantes et aux travaux forcés. Mais l'érosion ne s'est évidemment pas arrêtée pour autant !

Depuis les années 1980, de gros problèmes de dégradation de la productivité des sols se sont manifestés en même temps qu'une forte poussée démographique. Dans les pays à main-d'œuvre abondante, on a observé une reprise des travaux de terrassement communautaire (Chine, Rwanda), mais ces efforts n'ont eu que peu d'effets sur la production vivrière.

En 1987, le séminaire de Porto Rico apporte enfin une analyse critique des grands projets de LAE et propose une nouvelle orientation : développer en priorité des conditions favorables au développement des cultures sur les sols productifs et laisser aux États le souci de gérer les sédiments, de stabiliser les ravines et glissements de terrain et de traiter les catastrophes naturelles, qui échappent à la compétence et aux moyens ordinaires des paysans.

En 1983-1999 furent créés des réseaux de chercheurs, enseignants et développeurs, d'abord le réseau Érosion à l'Orstom pour servir de lien scientifique entre les instituts français, puis le réseau GCES avec la FAO, dans la région des Grands Lacs, en 1996 le réseau *Better land husbandry* au Kenya, et enfin les réseaux GRES au Cameroun (1995), GCES au Mali (1999) et au Maroc (2001).

Les conclusions du colloque de Yaoundé (1999)

Du 9 au 18 décembre 1999, s'est tenu au Cameroun un colloque international sur l'impact des activités humaines sur les phénomènes d'érosion, en particulier en Afrique. Les 82 participants de 19 pays ont présenté 50 communications, 12 posters et 25 documents écrits faisant le point de la situation [60, 61]. Nous en avons tiré sept messages :

1. Les effets néfastes de l'érosion sont importants, 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 très dangereuse car elle est dix fois plus dégradante que le décapage [- 30 % de rendement pour 5 cm de décapage] [62]. Malheureusement, les praticiens attendent l'apparition de rigoles et ravines avant d'intervenir. L'expérience

montre qu'il vaut mieux prévoir les risques de dégradation des bonnes terres (GCES) que de concentrer ses efforts sur les terres ravinées (DRS). Or, les ravines et les glissements de terrain, fréquents sur fortes pentes, sont difficiles à maîtriser. On manque de recherches sur les meilleures techniques pour aménager et réhabiliter les ravines et glissements de terrain.

2. Les recherches récentes ont montré qu'il est possible de réduire les risques d'érosion en modifiant les systèmes de production, en soignant la terre et les plantes, mieux qu'en multipliant les structures de drainage des eaux de surface. Mieux vaut disperser les eaux sur la surface rugueuse du champ que concentrer leur énergie dans des canaux susceptibles de déborder en créant des ravines. Pour améliorer l'efficacité des techniques antiérosives, on évolue des banquettes et ados de terre imperméables, vers des « microbarrages perméables » (cordons de pierres, d'herbes ou d'arbustes) et, plus récemment, vers des systèmes de travail réduit du sol sous litière ou sous couverture permanente de légumineuses [63, 64].

3. Les stratégies de lutte antiérosive évoluent de la DRS-CES à dominante mécanique (banquettes, fossés, ados en terre, barrages) vers des démarches plus biologiques (la GCES, souvent sans le savoir) en associant la gestion des eaux (filtration et ralentissement du ruissellement par des micro-barrages filtrants, amélioration de l'infiltration par le paillage et les techniques culturales), la gestion des matières organiques (agroforesterie, gestion des résidus de culture, élevage, légumineuses et fumier) et la gestion des engrais minéraux complémentaires pour assurer le développement optimal des cultures [34, 65].

4. Les recherches ont aussi prouvé qu'il est possible de restaurer la capacité de production des sols dégradés s'ils sont suffisamment profonds. La ressource en sol est donc partiellement renouvelable... Mais cela a un prix : maîtriser le ruissellement, renouveler la macroporosité du sol (travail) et la stabiliser (MO/racines), revivifier l'horizon de surface (fumier/compost), nourrir les cultures (NPK) et remonter le pH à 5 afin que disparaisse la toxicité aluminique. En revanche, restaurer les propriétés primitives des sols tropicaux semble hors de portée économique ; les sols primitifs ne sont d'ailleurs pas toujours très fertiles [66].

5. À l'échelle d'un petit bassin-versant, la dégradation du couvert végétal et des sols, entraîne la réduction du réservoir d'eau dans le sol et de la pluie limite de ruissellement, l'augmentation des débits de pointe et les inondations, la dégradation des berges et du lit des ravins et des rivières, l'augmentation des transports soli-

des et l'ensablement des canaux, réservoirs et ports. A court terme, les effets d'un aménagement antiérosif sur les versants sont inverses : étalement des crues et réduction des transports solides, augmentation de l'infiltration et alimentation des nappes. L'amélioration du rendement des cultures dépend en outre de la satisfaction des besoins en eau et en NPK aux moments où l'exige la physiologie des plantes cultivées (montaison, floraison, épiaison sur céréales).

6. En milieu urbain, peu perméable, le ruissellement est particulièrement abondant. S'il est mal contrôlé, on observe une forte agressivité du ravinement, le sapelement des versants pentus et des berges des rivières, des glissements de terrains, des inondations fréquentes et l'ensablement des zones squattées et des problèmes de drainage, l'État se replie derrière une législation restrictive qui ne résout pas les problèmes : il est conseillé de mettre en place des comités de quartier pour sensibiliser les gens aux risques d'érosion ou d'inondation qu'ils font courir à leurs voisins, et d'organiser la gestion des eaux.

7. Les mesures de ruissellement, d'érosion, de rendements et des états de surface en parcelles d'érosion (> 100 m²) continuent heureusement à se pratiquer : sinon comment valider les modèles sans données de terrain ? Les mesures sur ravines, plus rares, sont aussi intéressantes, car elles intègrent l'évolution du ruissellement tout au long du versant. Les mesures de débits liquides et solides à l'échelle des bassins exigent des moyens lourds : elles intègrent le piégeage des sédiments en bas de pente et les remaniements des berges et du lit et ne sont pas directement comparables aux mesures sur versants ni à leur occupation. Pour maîtriser certaines contraintes de temps, on a recouru à divers simulateurs de pluies qui aident à paramétrer les bilans hydriques et la stabilité structurale plus que l'érosion. La validité de chaque méthode est limitée par des contraintes et par les effets d'échelle. Les pertes en eau, en sol et en nutriments par érosion en nappe ne sont pas forcément dramatiques : elles dépendent plus des systèmes culturels que des structures anti-érosives conventionnelles. On peut donc tenter de limiter le détachement des particules et l'érosion et maîtriser le ruissellement en améliorant les systèmes de culture. Les transports solides par les instruments de travail du sol, par mouvement de masse ou par le vent sont encore peu étudiés : pourtant, ces processus peuvent mobiliser beaucoup de terre et de nutriments. Pour évaluer la variabilité spatiale de l'érosion, on fait souvent appel à des systèmes d'information géographi-

ques (SIG) et à des indicateurs plus ou moins significatifs mais observables sur photo aérienne ou imagerie satellitaire (typologie des traces d'érosion, Césium 137, surface couverte, surface fermée, divers types de croûtes, capacité, pente, érodibilité des sols, etc.) : il faut craindre l'application systématique de ces méthodes spectaculaires sans prise en compte des processus d'érosion les plus efficaces sur le terrain.

Conclusions générales

Effets néfastes de l'érosion

Ces effets néfastes sont importants tant dans l'accélération de la dégradation des champs cultivés que dans les villes en forte croissance et, à l'aval, dans les rivières, l'envasement des barrages et des ports. Or, bien peu d'aménagements antiérosifs donnent satisfaction, car les aménagistes attendent l'apparition des ravines pour imposer des structures antiérosives coûteuses. Cependant, l'érosion en nappe, à l'origine de la dégradation des terres, commence dès le défrichement et se traite par l'adaptation des systèmes de production.

Accélération des connaissances sur les processus et facteurs de l'érosion

Les Chinois ont inventé les terrasses en gradins il y a 4 000 ans. Il a fallu 3 000 ans pour que les caravanes de la soie et des esclaves dispersent ces techniques sur le bassin méditerranéen et l'Afrique. Les techniques de LAE se sont développées empiriquement depuis fort longtemps, bien avant que ne commencent les premières recherches scientifiques (1890, premières parcelles d'érosion en Allemagne). La recherche sur la LAE est récente. En 1939, Bennett inventait aux États-Unis les terrasses de diversion et développait un réseau de parcelles expérimentales qui ont abouti au bout de 30 ans au modèle empirique de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith (1960-1978). Malgré diverses tentatives de modélisation, on n'a pas encore réussi à trouver un modèle physique applicable par les agronomes dans la majorité des pays dégradés par l'érosion. Dès les années 1960, Hudson [27] a démontré dans les champs africains que l'intensification de la culture pouvait réduire les risques d'érosion en augmentant la couverture végétale. L'application de ce principe a donné lieu au développement d'une nouvelle stratégie (*Land Husbandry* ou GCES) au séminaire de Porto Rico en 1987.

En 1970, Heusch [39] a découvert dans les marnes du Rif marocain que la situation topographique pouvait être plus importante que l'inclinaison de la pente. En 1973, Roose a étendu cette observation aux sols ferrallitiques d'Afrique occidentale [8]. Il a montré que le ruissellement était souvent plus fort sur les pentes faibles (très encroûtées) que sur les versants plus pentus et que les microbarrages perméables étaient plus efficaces que les fossés de diversion [30].

Actuellement, on réduit les structures antiérosives à des lignes de défense pour orienter les travaux, et on cherche à mettre au point des systèmes de production intensifs où le travail du sol est réduit au minimum sous couvert d'une litière de résidus de culture ou d'une couverture permanente d'herbes (ou mieux de légumineuses), maîtrisée par les herbicides [63, 64, 41].

Restauration de la capacité de production des sols dégradés

Autre bonne nouvelle : il existe en Afrique des techniques permettant de restaurer en quelques années la capacité de production des sols dégradés suffisamment profonds. La ressource en sol est donc partiellement renouvelable, mais cela a un coût : du travail, du fumier et des engrais complémentaires. La capacité de nourrir des populations est donc étroitement dépendante des conditions économiques de la société. La société occidentale préfère-t-elle développer la production vivrière de ces régions, ou vendre ses propres excédents ?

Importance de la formation

L'enseignement sur l'érosion et la lutte antiérosive était, il y a dix ans, tout à fait rudimentaire, tant dans les facultés d'Agriculture, que dans l'enseignement secondaire. Maintenant que le thème de la protection de l'environnement est en vogue, il serait souhaitable de souligner que bien des pollutions des eaux tirent leur origine du développement des divers processus d'érosion. La sensibilisation des enfants devrait se faire dès le secondaire et la formation aux nouvelles méthodes de lutte dans les écoles techniques, les instituts agronomiques et les DEA.

Évolution de la recherche

Il reste encore à mener bien des travaux pour mieux comprendre la diversité des processus en cause dans le développement des divers types d'érosion et en particulier le ravinement, l'érosion par les outils de travail du sol, les mouvements de masse en montagne, la naissance du ruissellement sur pentes fortes où les croûtes de

battance sont mineures, et l'érosion éolienne. Vu l'étendue des travaux et l'urgence de trouver des solutions pratiques, la recherche devrait se rapprocher des projets de développement, analyser l'expérience paysanne, définir les indicateurs pertinents des causes et des facteurs locaux les plus importants afin de réduire rapidement les risques de dégradation de l'environnement, tout en intensifiant la productivité.

Le défi du XXI^e siècle est de doubler la production vivrière tous les 20 ans, tout en réduisant les risques de dégradation de l'environnement. ■

Références

1. Erhart H. Biostasie et rhexistasie. Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique. *CR Acad Sci Paris* 1955 ; 241 p.
2. Vogt H, Vogt Th. *Érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*. C. Rendu Colloque Labo géographie physique, 1979, université de Strasbourg, 275 p.
3. Global Assesment of Soil Degradation (GLASOD). *World map of human induced soil degradation : An exploratory map*. Wageningen (Pays-Bas) : ISRIC, 1990.
4. Fotsing JM. Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en pays Bomiléké, Cameroun. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 26 : 241-54.
5. Boissau S, Locatelli B, Weber J. Population and environment relationship. A U-shaped curve hypothesis. *Jardin planétaire* (Chambéry) mars 1999 ; 4 p.
6. Tiffen M, Mortimore M, Gichuki F. *More people, less erosion : Environmental recovery in Kenya*. Chichester (Great Britain) : John Wiley, 1994 ; 26 p.
7. Roose E, Sabir M, De Noni G. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 523 p.
8. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pédol FAO* (Rome) 1994 ; (70) : 420 p.
9. Lilin Ch. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 139-46.
10. Lowdermilk WC. Conquest of the land through 7000 years. *Agric Information Bull USDA, SCS* 1953 ; (99) : 54 p.
11. Jurion F, Henry J. De l'agriculture itinérante à l'agriculture intensifiée. *INEAC* (Bruxelles) 1967 ; 498 p.
12. Food and Agriculture Organization. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. *FAO Soils Bull* (Rome) 1974 ; 24 p.
13. Levang P. Shifting cultivation for transmigration projects ? How primitive techniques could help to solve development problems in Central-Kalimantan Transmigration areas ? *Limu Per AGRIC Science* 1984 ; 3 : 275-83.

14. Critchley W, Reij C, Turner S. *Soil and water conservation in sub-saharan Africa. Towards sustainable production by the rural poor*. Report IFAD. Amsterdam : CDCS, Free University, 1992 ; 110 p.
15. Bennett HH. *Elements of soil conservation*. New York : Mac Graw-Hill, 1939 ; 530 p.
16. Ellison WD. Studies of raindrop erosion. *Agric Eng 1944* ; 25 : 131-81.
17. Wischmeier WH, Smith DD. *A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning*. Proc. 7th International Congress Soil Sci Soc 1960 ; 1 : 418-25.
18. Stallings JH. Continuous plant cover : The key for soil and water conservation. *J Soil & Water Cons 1953* ; 8 : 63-8.
19. Putod R. La protection des vignes contre l'érosion. *Revue Agron Afrique du Nord 1992* ; 567-76.
20. Monjauze A. *Rénovation rurale : rôle et dispositif d'infiltration*. Alger : Délégation générale, Dépt des Forêts, Service DRS, 1962 ; 16 p.
21. Gréco J. *La défense des sols contre l'érosion*. Paris : Maison Rustique, 1978 ; 183 p.
22. Lovejoy JB, Napier T. Conserving soil : Sociological insight. *J Soil & Water Cons 1976* ; 415 : 304-410.
23. Hudson NW. Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bull (Rome) 1991* ; 64 : 65 p.
24. Heusch B. Cinquante ans de banquette de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah Orstom Sér Pédol 1986* ; 22 : 153-62.
25. Moldenhauer WC, Hudson N. *Conservation farming on steep lands*. Ankeny (Iowa) : SWC Soc, 1987 ; 296 p.
26. Shaxson TF, Hudson NW, Sanders D, Roose E, Moldenhauer WC. *Land husbandry : A framework for soil and water conservation*. Ankeny (Iowa) : SWC Soc ; WASWC, 1989 ; 64 p.
27. Hudson NW. *Land husbandry*. London : Batsford, 1992 ; 192 p.
28. Roose E. *GCES dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale. Stratégies nouvelles et classiques*. « Soil, Crop, Water management systems for rainfed Agriculture in semi-arid zone » Proceedings, ICRISAT, Niamey, 1987 : 55-72.
29. Roose E, Ndayizigiye F. Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technol 1996* ; 11 : 109-19.
30. Roose E. Terrasses de diversion ou microbarraques perméables ? Analyse de deux démarches de conservation de l'eau et des sols chez les petits fermiers de la zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. *Cah Orstom Sér Pédol 1986* ; 22 : 81-92.
31. Roose E, Masson FX. *Consequences of heavy mechanization and new rotation on runoff and on loessial soil degradation in the North of France*. Comm. 92, International Conference "Preserve the land", Honolulu, Hawaii, SCSA (Ankeny, Iowa), éd, 1983 : 24-33.
32. Smalikowski B. *Gestion de l'eau en milieu cultivé sahélien de montagne (Cap-Vert)*. Thèse doctorat en écologie tropicale, université de Toulouse, n° 2826, 1997, 265 p.
33. Roose E, Dugué P, Rodriguez L. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques 1992* ; 233 : 49-63.
34. Rishirumuhirwa Th. Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation de la fertilité des sols ferrallitiques du Burundi. *Cah Orstom Sér Pédol 1993* ; 28 : 367-84.
35. Smolikowski B. La GCES, une nouvelle stratégie de LAE en Haïti. *Cah Orstom Sér Pédol 1993* ; 28 : 229-52.
36. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah Orstom Sér Pédol 1993* ; 28 : 289-308.
37. De Noni G, Viennot M, Asseline J, Trujillo G. *Terres d'altitude, terres de risque. La lutte antiérosive dans les Andes équatoriennes*. Paris : Éditions Latitudes 23 ; IRD, 2001 ; 220 p.
38. Arabi M. *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen algérien*. Thèse de doctorat de géographie, université de Grenoble, 1991, 276 p.
39. Roose E, Chebbani R, Bourougaa L. Ravinement en Algérie : typologie, contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse 2000* ; 11 : 317-26.
40. Heusch B. L'érosion du pré-Rif. *Annales Recherche Forestière du Maroc 1970* ; 12 : 1-176.
41. Boli Z, Roose E, Bep Aziem B, Sanon K, Waechter F. Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux du Nord Cameroun (Mbissiri, 1991-92). *Cah Orstom Sér Pédol 1993* ; 28 : 309-26.
42. Van den Abeele M. *L'érosion, problème africain*. Sciences naturelles, T XI. Bruxelles : INEAC, 1941 ; 35 p.
43. Harroy JP. *Afrique, terre qui meurt*. Bruxelles : Éditions Marcel Hayez, 1944 ; 557 p.
44. El Amani S. *Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie*. Tunis : Centre de recherches du génie rural, 1983 ; 69 p.
45. Reij C, Scoones I, Toulmin C. *Techniques traditionnelles de CES en Afrique*. Paris : CTA ; CDCS ; Korhala, 1997 ; 355 p.
46. Roose E. Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne : définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. In : Le Floc'h E, Floret C, Pontanier R, Cornet A., eds. *L'aridité*. Didactique. Paris : Éditions Orstom, 1990 : 475-500.
47. Robinson D, McKeon S. *Shifting cultivation and alternatives. An annotated bibliography (1972-89)*. Wallingford : CIAT/CAB International, 1991 ; 281 p.
48. Evenari M, Shanon L, Tadmor NH. Runoff farming in the desert. *Agron J 1968* ; 60 : 29-38.
49. Bonvallot J. Tabias et jessour du sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cah Orstom Sér Pédol 1986* ; 22 : 163-72.
50. Bourges J, Floret C, Girard G, Pontanier R. *Étude de la citerne Telman (1972-77)*. Tunis : Orstom-DRES, 1979 ; 147 p.
51. Roose E, Kabore V, Guenat CI. The Zaï practice : A West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands. *Arid Soil Research and Rehabilitation 1999*, 13, 4 : 343-55.
52. Seignobos Ch. Pratiques antiérosives traditionnelles : élaboration des terrasses sur les Monts Mandara et récupération des terres « hordé » dans le Nord-Cameroun. *Bull Réseau Erosion 1999* ; 18 : 300-5.
53. Diallo A. *La haie dans la préfecture de Faronah (Guinée)*. Manthéry : AFVP, 1994 ; 20 p. + 12 fiches biologiques.
54. Pontanier R. *Synthèse bibliographique sur la maîtrise et l'utilisation des eaux de ruissellement, CES en zones arides*. Tunis : Orstom, 1988, 33 p. multigr.
55. Rochette R. *Le Sahel en lutte contre la désertification*. Weikersheim (Allemagne) : CILLS/PACC/GTZ, 1989 ; 592 p.
56. Laouina A, Ait Hamza M, Chaker M, El Abassi H. *Techniques traditionnelles de CES*. Rapport CDCS, Free University, Amsterdam, 1995, 112 p.
57. Baumer M. *Agroforesterie et désertification*. Wageningen (Poys-Bas) : ICRAF-CTA, 1987 ; 260 p.
58. Gasselin M. *L'hydraulique en Tunisie*. Tunis : Archives Institut Pasteur, 1939 ; tome 3, 148 p.
59. Reij C, Mulder P, Begemann L. *Water harvesting for plant production*. World Bank paper n° 91. Washington : World Bank, 1988, 123 p.
60. Roose E, Lamachère JM. Influence de l'homme sur l'érosion : vol. 1 : À l'échelle du versant. *Bull Réseau Erosion 1999* ; 19 : 608 p.
61. Roose E, Lamachère JM. Influence de l'homme sur l'érosion. Vol 2 : Bassins-versants, élevage, milieu urbain et rural. *Bull Réseau Erosion 2000* ; 20 : 578 p.
62. Raose E, Barthès B. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems 2001* ; 61 : 159-70.
63. Lal R. No-till farming. *Soil and water conservation and management in the humid tropics*. Monograph 2. Ibadan : International Institute of Tropical Agriculture (IITA), 1983 ; 64 p.
64. Seguy L, Bauzinac S, Pacheco R, Kluthouski J. *Des modes de gestion mécanisée des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol, appliquée aux Cerrados du Centre-Ouest brésilien*. Montpellier : IRAT, 1989 ; 185 p.
65. Zougmore R, Zida Z, Kambou F. Rôle des amendements dans le succès des demi-lunes et du Zaï. *Bull Réseau Erosion 1999* ; 19 : 536-50.
66. Roose E, Kabore V, Guenat C. Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah Orstom Sér Pédol 1993* ; 28 : 159-74.
67. Tchotsua M, Bonvallot J. Érosion urbaine au Cameroun : processus, causes et lutte. *Bull Réseau Erosion 2000* ; 20 : 324-31.

L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte

Charles L. Bielders¹
Jean-Louis Rajot²
Karlheinz Michels³

¹ Département des Sciences du milieu
et de l'aménagement du territoire,
Université catholique de Louvain,
Croix du Sud 2,
bte 2,
B-1348,

Louvain-la-Neuve, Belgique
<bielders@geru.ucl.ac.be>

² IRD-LISA-Université Paris 12,
61, avenue du Général de Gaulle,
94010 Créteil cedex,

France
<rajot@lisa.univ-paris12.fr>

³ Institute for Plant Production
and Agro-Ecology
in the Tropics and Subtropics,
Universität de Hohenheim,
70593 Stuttgart,
Allemagne

Résumé

Au Sahel, l'érosion éolienne constitue une menace importante pour l'utilisation durable des ressources en terres. Elle présente une dynamique saisonnière marquée en relation avec les cycles climatiques intraannuels et l'évolution du couvert végétal. Au Niger, pays sahélien servant d'exemple pour cette revue de la littérature, l'érosion éolienne est, de plus, favorisée par la dominance de sols sableux à faible teneur en matière organique et par les pratiques culturales qui contribuent à maintenir un faible couvert du sol pendant la période la plus critique en fin de saison sèche et au début de la saison des pluies. L'érosion éolienne se traduit par des pertes en terre parfois considérables à l'échelle de la parcelle expérimentale et du champ. Cependant, du fait que l'essentiel des sédiments érodés se redéposent localement, le bilan à l'échelle du terroir villageois serait encore actuellement positif, bénéficiant d'apports extérieurs de poussières. Les agriculteurs sont conscients de leur impact sur l'environnement et prennent un ensemble de mesures qui contribuent, parfois indirectement, à réduire le risque d'érosion éolienne : paillage, maintien des pailles de mil dans les champs, préservation de la régénération naturelle de la végétation, maintien de la végétation en bordure de champ, défrichage des champs sans brûlis, etc. Cet article passe en revue les avantages et les limitations de ces différentes techniques ainsi qu'un certain nombre d'autres techniques évaluées dans le cadre de nombreux projets de recherche et de développement au Niger. À l'avenir, il est vraisemblable que la lutte contre l'érosion éolienne ne pourra se concevoir qu'au travers de la mise en œuvre d'un ensemble de mesures simples reposant sur le savoir-faire et les moyens locaux et apportant des bénéfices immédiats autres que le contrôle de l'érosion, par exemple en termes de fertilité des sols ou de sous-produits intéressants.

Mots clés : Érosion éolienne ; techniques culturales ; Sahel.

Summary

Wind erosion in the Nigerian Sahel: Impact of present cultural practices and control measures

Wind erosion constitutes a major threat for the sustainable use of land resources in the Sahel. It is characterised by strong seasonal dynamics in relation to the intra-annual climatic cycles and the evolution of the vegetation cover. In Niger, a Sahelian country taken as example for the present review, wind erosion is further favoured by the dominance of sandy soils poor in organic matter and agricultural practices that help maintain a low ground cover during the most critical period at the end of the dry season and start of the rainy season. Wind erosion can be responsible for considerable losses of soil at plot and field scale. However, because most eroded sediment redeposits locally, the mass balance at the scale of the village land is likely to be still positive as a result of external inputs of dust. Farmers are aware of their impact on the environment and are taking a series of measures that help reduce the

risk of wind erosion, albeit sometimes indirectly: mulching and leaving millet straw in fields, favouring natural regeneration of vegetation, maintaining vegetation at field boundaries, field clearing without burning, etc. The advantages and limitations of these different techniques are being reviewed, as well as some other techniques that have been evaluated over the years within the framework of numerous research and development projects in Niger. In the future, it is likely that the fight against wind erosion will have to rely on the implementation of a series of technically simple measures that draw on local skills, means and knowledge and that provide immediate benefits other than wind erosion control, for instance in terms of soil fertility or useful by-products.

Key words: Wind Erosion; Cultural practices; Sahel.

S''étendant sur plus de 6 000 km d'ouest en est, le Sahel occupe une bande de 400 à 600 km de large au sud du Sahara, entre les isohyètes de 200 et 600 mm. Cette zone semi-aride est caractérisée par une longue saison sèche et une forte variabilité spatiale et temporelle des pluies. De plus, de vastes superficies sont couvertes par des sols sableux d'origine éolienne. La remobilisation de ces dépôts par le vent met actuellement en péril l'exploitation durable des terres [1]. Cette remobilisation fait suite à une diminution de la couverture végétale du sol, liée en partie aux conditions climatiques mais avant tout à la surexploitation des ressources végétales et à l'extension des superficies cultivées qui résultent de l'accroissement démographique [2].

Au Sahel, l'aridification et la dégradation de l'environnement se sont traduites par un accroissement progressif de la charge atmosphérique en poussières au cours des dernières décennies [3]. L'érosion éolienne est à la fois une conséquence de la dégradation de l'environnement et un des processus majeurs de la désertification [1]. La conversion de savanes en terres de culture, le raccourcissement de la durée de jachère, la baisse de fertilité des sols cultivés engendrée par des bilans nutritifs négatifs [4], le surpâturage, et la surexploitation de la végétation ligneuse sont autant de facteurs qui contribuent à la dénudation des sols et favorisent l'emprise du vent. La teneur en nutriments des sols sableux du Sahel étant intrinsèquement très faible et, de plus, essentiellement concentrée en surface dans la matière organique du sol [5], les pertes en terre par érosion éolienne peuvent dès lors conduire à des pertes en nutriments très élevées en proportion du stock de nutriments disponibles et contribuer ainsi à la baisse rapide du potentiel de production végétale [6, 7].

En Afrique subsaharienne, l'apparition de dunes actives est essentiellement limitée à la zone de pluviosité inférieure à 100 mm [8]. Par conséquent, l'érosion

éolienne en zone sahélienne constitue une menace, non pas à cause de l'envahissement des sables mais à cause de son impact sur la productivité des terres et sur la santé humaine. Cela est particulièrement vrai pour la zone agropastorale (pluviométrie annuelle de 350 à 600 mm). A l'échelle écorégionale, le Sahel semble être principalement une zone de dépôts de sédiments éoliens [9], bien que des bilans de masse négatifs aient pu être mis en évidence plus localement [1]. Cette échelle ne reflète cependant pas les transferts de sédiments et nutriments mobilisés par le vent à l'échelle du champ ou du terroir, qui est celle qui affecte directement la productivité des systèmes de production agropastoraux.

La présente synthèse fera, dans un premier temps, l'état des connaissances concernant les transferts de sédiments et nutriments par érosion éolienne au Sahel, à l'échelle du terroir, du champ et de la parcelle expérimentale, sans négliger la perception qu'ont les agriculteurs de cette problématique. On abordera ensuite les différentes techniques actuellement disponibles pour lutter contre la déflation, aussi bien du point de vue de leur efficacité technique que de leur adéquation aux systèmes de production locaux. Ces thèmes seront principalement illustrés par des exemples tirés d'un pays sahélien, le Niger, où se sont concentrées un grand nombre d'études sur l'érosion éolienne au cours de ces vingt dernières années.

Érosion éolienne et pratiques culturales au Sahel

Climat et érosion éolienne au Sahel

Le climat sahélien est rythmé par l'oscillation de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT). Ainsi, en moyenne, le centre de la ZCIT se déplace de la latitude 10° S aux mois de décembre et janvier à la latitude 8° N en juillet et août. En hiver,

le Sahel est soumis à l'alizé de nord-est, l'harmattan, un vent sec et froid qui peut se charger en poussières sur le sud du Sahara. Ces poussières sont parfois transportées à travers le Sahel et l'Atlantique jusqu'au continent américain [10, 11]. C'est le phénomène des brumes sèches (figure 1). Au mois d'avril, le passage du front intertropical (FIT) marque l'entrée du Sahel dans la période de mousson qui se caractérise par un vent humide et chaud de direction moyenne sud-ouest. Ces vents peuvent occasionnellement atteindre des vitesses suffisantes pour induire localement une prise en charge de sédiments (figure 1). La saison des pluies s'installe à partir du mois de juin et culmine aux mois de juillet et août. L'essentiel des précipitations est produit par des systèmes convectifs de méso-échelle, les lignes de grains. Ces événements spectaculaires (figure 1) balayent le Sahel d'est en ouest à une vitesse moyenne de 60 à 70 km h⁻¹ [12]. C'est en front de ces systèmes que les plus fortes vitesses, donc les plus fortes érosivités du vent, sont atteintes sur le Sahel (figure 2). Cet exemple permet de souligner l'étroite juxtaposition inhérente au Sahel des plus fortes intensités de vent et de pluie, donc potentiellement des érosions éolienne et hydrique. Le front des lignes de grains, avant la chute des premières gouttes de pluies, dure généralement de 5 à 20 minutes. Mais certains événements de début de saison des pluies peuvent être secs, entraînant des périodes d'érosion éolienne plus longues. Au mois d'octobre, la ZCIT redescend vers le sud et l'harmattan s'installe de nouveau sur le Sahel. La figure 3 représente les maxima journaliers d'intensité de vent sur 5 minutes qui résument bien le cycle saisonnier. La saison humide, d'avril à octobre, se marque par de fortes variations d'intensité des vents maximums avec des pics qui dépassent très régulièrement 10 m.s⁻¹, intensités très rares en saison sèche. Les plus fortes vitesses de vents surviennent plutôt en début (mai et juin) et en fin (septembre) de saison des pluies.

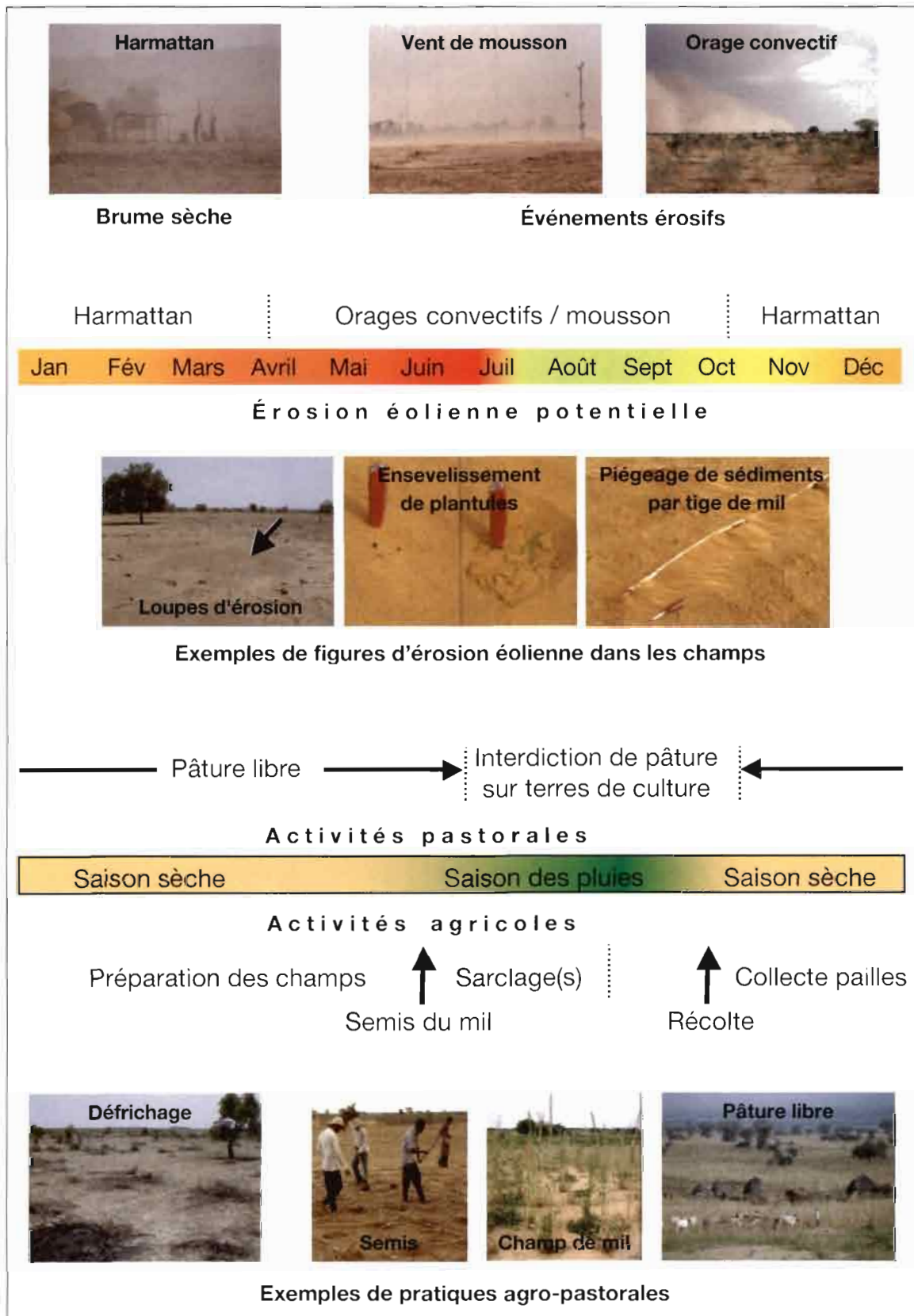


Figure 1. Représentation schématique des périodes d'érosion éolienne et des cycles saisonniers dans la zone sahélienne du Niger. Le risque d'érosion éolienne est très faible de fin juillet à début septembre (vert clair), et présente un maximum en mai-juin (rouge), en relation avec le cycle climatique intraannuel et le développement de la végétation et de la litière.

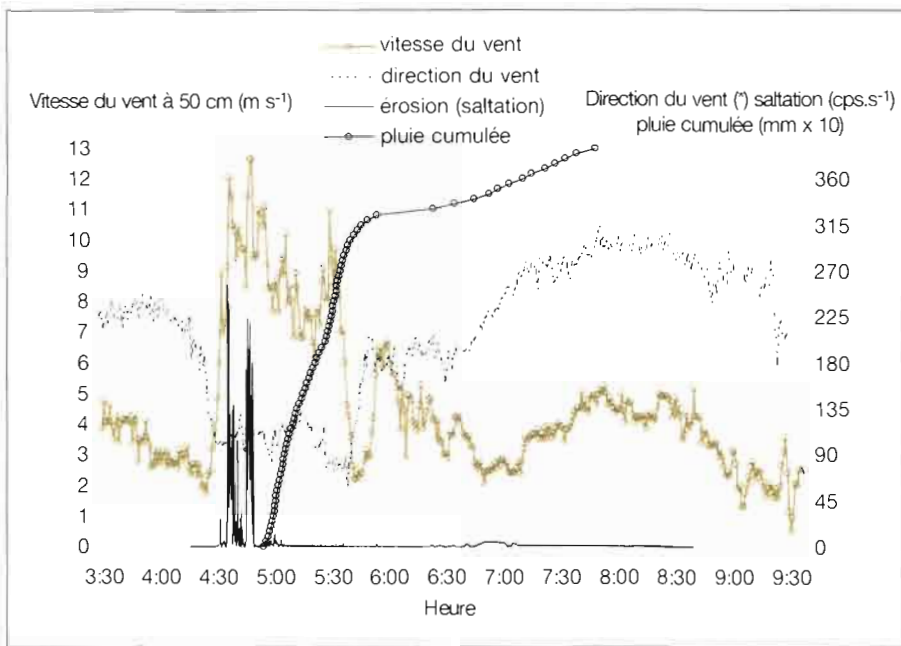


Figure 2. Enregistrement météorologique typique lié au passage d'un système convectif de méso-échelle, le 11 juillet 1995, à Banizoumbou, Niger.

Dans un régime de mousson avec un vent de sud-ouest de quelques mètres par seconde, la perturbation s'impose par un brusque changement de direction et une forte augmentation de la vitesse du vent qui déclenche l'érosion éolienne représentée ici par la saltation. Celle-ci est stoppée quasi instantanément par les premières gouttes de pluies liées au front convectif du système. Cette partie convective où la pluie atteint ses plus fortes intensités est suivie d'une longue traîne stratiforme pendant laquelle la direction du vent revient progressivement au sud-ouest sous une pluie de faible intensité.

* (Nord = 0°, Est = 90°)

Gestion actuelle des terres

L'augmentation de la population au Sahel a conduit à une évolution de l'occupation du sol. À titre d'exemple, sur une surface de 20 km x 20 km centrée sur le village de Banizoumbou au sud-ouest du Niger, il a été démontré, qu'en l'espace d'un demi-siècle, les surfaces cultivées [champs +

jachères] sont passées de 12 à 71 % de la surface du terroir, occupant aujourd'hui la quasi-totalité des sols cultivables [13]. Environ la moitié de cette surface correspond à des jachères dont la plupart durent moins de 5 ans et où se développe la végétation naturelle d'arbustes et de plantes annuelles.

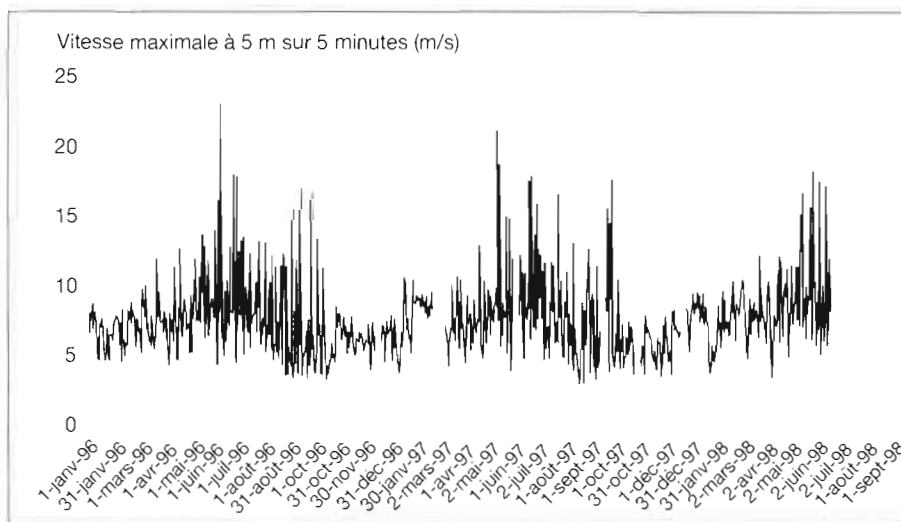


Figure 3. Évolution des vitesses de vent maximales journalières sur 5 minutes mesurées à 5 m au-dessus du sol pour la période de janvier 1996 à juillet 1998 à Banizoumbou, Niger.

Au Niger, comme dans tout le Sahel, le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est la principale culture de subsistance. Il est cultivé sur les sols sableux qui représentent près de 80 % de la surface du Niger méridional [14]. Les pratiques culturales restent fondamentalement manuelles et font encore largement appel à la mise en jachère périodique des champs pour la restauration de la fertilité. La technique de la fumure permet, grâce à un parcage extensif des troupeaux sur les champs en saison sèche, de cultiver un nombre limité de champs sans période de jachère [15]. Durant la saison sèche, après la récolte, les champs sont ouverts au bétail qui consomme une partie des résidus de culture (figure 1) et forme, par piétinement, une couche de sable libre d'environ 5 cm d'épaisseur. Dès le mois de janvier, les jachères ou les champs sont défrichés, c'est-à-dire que les plants de mil encore debout sont dessouchés et les pousses d'arbustes sont coupées et souvent brûlées (figure 1). Cela accélère la consommation par les termites des résidus de cultures ainsi couchés sur le sol. Dans les trois jours qui suivent la première pluie importante de la saison, le mil est semé en poquets (figure 1), c'est-à-dire dans des trous d'une dizaine de centimètres creusés à la houe et immédiatement rebouchés après qu'une pincée de graines y a été jetée. Le mil pousse ainsi en touffes espacées de plus d'un mètre $\approx 5\ 000$ à $7\ 000$ poquets.ha⁻¹. Les mauvaises herbes se développent rapidement entre les poquets, nécessitant un à deux sarclages superficiels réalisés à l'iler, une lame courbe qui coupe les racines à moins de 5 cm de profondeur et détruit par la-même les croûtes structurales qui se forment dès les premières pluies. Ce travail se poursuit pendant plus de deux mois, à partir du 15^e jour après semis. Au moment de la récolte, seuls les épis sont coupés, laissant les pailles de près de 2 m de haut dressées sur le champ. Dès la fin de la récolte, ces dernières seront broutées par le bétail dans les champs en libre accès (figure 1). De plus en plus souvent, les tiges sont cependant collectées et stockées pour servir de fourrage ou de matériau de construction.

Dynamique saisonnière de l'érosion éolienne

L'effet des pratiques culturales sur les propriétés aérodynamiques des champs peut être illustré par le suivi de la hauteur de rugosité aérodynamique Z_0 . Ce paramètre qui correspond à la hauteur théorique à laquelle la vitesse du vent s'annule est calculé à partir de profils de vent mesurés dans les premiers mètres au-dessus de

la surface du sol [16]. La hauteur de rugosité dépend de la rugosité géométrique du terrain et renseigne sur son érodibilité. Plus cette valeur est basse, moins le sol est rugueux et plus il est érodible. L'évolution de Z_0 sur plus de deux cycles saisonniers (1996 à 1998) est représentée à la figure 4 pour un champ cultivé à Bani-zoumbou, Niger. Au maximum de développement du mil, Z_0 dépasse 10 cm. Après la récolte, on note une décroissance progressive, liée à la collecte des tiges et au pâturage. C'est le défrichage qui provoque la plus forte diminution de Z_0 . Lorsque la totalité du champ est défrichée, on atteint des valeurs de l'ordre du millimètre. Z_0 est alors peu sensible à la consommation de la litière par les termites et le bétail. Ainsi, à partir du mois d'avril, la rugosité du champ est minimum et celui-ci est donc le plus sensible à l'érosion éolienne. C'est dans ce contexte que le semis est effectué sans entraîner de modification décelable de la rugosité. Le développement de la végétation ne provoque une remontée de Z_0 qu'à partir de début juillet, près d'un mois après le semis. Le premier sarclage agit clairement sur la rugosité, soit en la diminuant brutalement (1996), soit en arrêtant momentanément son augmentation (1997). Cela souligne l'importance du développement des adventives sur l'augmentation de la rugosité alors que l'influence de la croissance du mil semble plus faible du fait de sa répartition en poquets qui ménage de larges surfaces nues non protégées. Finalement, ce n'est qu'au cours du mois d'août que la rugosité redevient vraiment importante et susceptible de protéger efficacement la surface du sol de l'érosion éolienne.

En fonction de leur taille, les particules sont entraînées par le vent selon trois modes dominants de déplacement : la reptation pour les plus grosses ($> 500 \mu\text{m}$), la saltation (20 à $500 \mu\text{m}$) et la suspension ($< 20 \mu\text{m}$) pour les plus fines [17]. À l'échelle de la parcelle ou du champ, l'essentiel de la masse est transporté dans le flux de saltation qui traduit l'érosion locale. Ce flux a été mesuré en continu sur trois cycles saisonniers dans le champ traditionnel présenté ci-dessus. La figure 4 montre une très nette dynamique saisonnière [18]. De 70 à 86 % des flux mesurés sur un cycle annuel complet se produisent entre le 1^{er} mai et le 30 juin, ce qui est fort comparable aux résultats d'autres études [19, 20]. L'érosion éolienne ne se produit que lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil de vitesse déterminé par l'état de surface du sol : recouvrement par la litière, travail du sol, taille des agrégats libres en surface, encroûtement et teneur en eau. Sur parcelle cultivée en mil dans la zone de

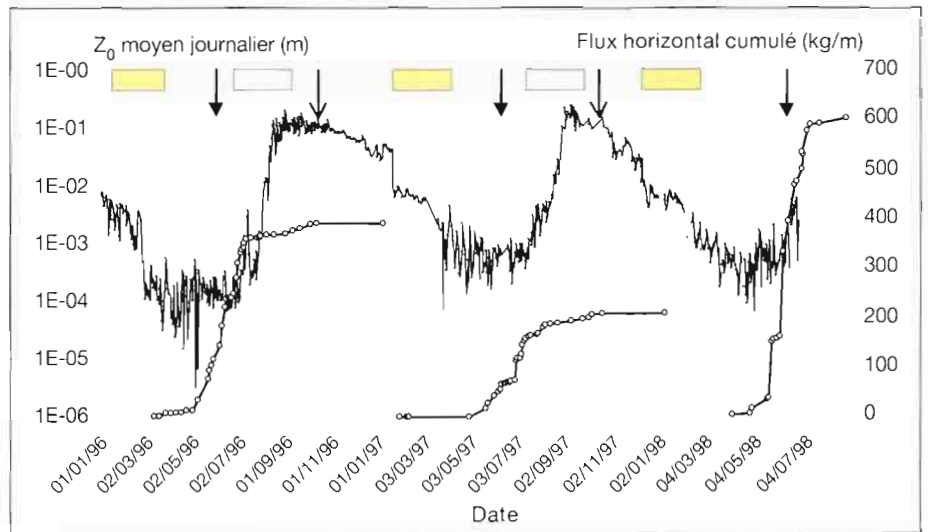


Figure 4. Évolution de la hauteur de rugosité (Z_0) (trait continu) et du flux horizontal cumulé de sédiments transportés par le vent (ronds) de janvier 1996 à juillet 1998.

Une valeur quotidienne de Z_0 a été calculée à partir d'un enregistrement continu de profils de vitesses de vent réalisé au milieu d'un champ traditionnel représentatif du terrain de Bani-zoumbou, Niger. En jaune, la période de végétation ; en gris, la période de défrichage. Flèches pleines : date de semis du mil ; flèches creuses : dates de récolte du mil. Adapté de Rajot [18].

Bani-zoumbou, ce seuil est typiquement de l'ordre de $7,5$ à $8,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sur sol sec. Excepté l'encroûtement et la teneur en eau qui doivent être considérés séparément, la plupart des autres facteurs agissent sur les valeurs de la rugosité aérodynamique [21]. Ainsi, l'occurrence de l'érosion peut s'expliquer par une augmentation de l'intensité du vent ou par une diminution de la vitesse seuil d'érosion. Les figures 3 et 4 montrent que l'apparition de l'érosion en fin de saison sèche n'est pas liée à une diminution décelable de la rugosité aérodynamique du sol, mais plutôt à l'augmentation de l'intensité du vent en début de période de mousson. La nette diminution de l'érosion dès le mois de juillet s'explique à la fois par l'augmentation de la rugosité liée à la croissance de la végétation et par la relative diminution des intensités maximales du vent au cœur de la mousson. L'augmentation progressive de l'humidité du sol au cours de la saison des pluies intervient vraisemblablement pour très peu dans la réduction de l'érosion éolienne. En effet, seuls les premiers millimètres du sol sont affectés par l'érosion éolienne. Pour des sols sableux, cette couche se dessèche très rapidement entre deux événements pluvieux de telle sorte que la surface du sol est généralement sèche avant le passage de l'événement érosif suivant.

Le facteur encroûtement du sol a été étudié sur une parcelle expérimentale d'un hectare située dans le même champ à Bani-zoumbou, Niger. La surface de cette parcelle a été dénudée en retirant les tiges de

mil, les arbustes et la litière pour permettre le déclenchement de l'érosion éolienne dès le mois de février lorsque les croûtes superficielles sont totalement détruites à cause du piétinement par le bétail. Ces croûtes de type structural dominant, caractéristiques des sols sableux [22], se reforment dès la première pluie. La mesure des flux de saltation et des flux verticaux d'émission de poussière avant et après encroûtement montre que celui-ci n'a pas d'effet décelable sur l'érosion éolienne dans le cas de ces sols très sableux [23]. L'effet de différents types de croûtes sur l'érosion éolienne n'a à ce jour pas été étudié. Des observations visuelles montrent cependant que même les croûtes d'érosion sont sujettes à abrasion sous l'effet du flux de saltation.

L'expérience décrite ci-dessus a permis de mesurer un flux horizontal de $962 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ sur la parcelle dénudée pendant les mois de février à avril, alors que seulement $16,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ont été mesurés pendant la même période sur une parcelle non perturbée dans le même champ. Cela montre bien que, pourvu que la hauteur de rugosité, contrôlée essentiellement par les résidus de culture, soit suffisamment basse, l'érosion peut se produire même en période d'harmattan. Ainsi, la climatologie de l'érosion éolienne décrite ci-dessus, représentative de la zone étudiée [$13^\circ 30'$ de latitude nord], est susceptible de varier en fonction du taux de recouvrement des sols par les résidus de culture et donc en fonction des pratiques culturales et de la latitude. Il faut noter une forte variabilité

Tableau 1. Caractéristiques des parcelles expérimentales pour lesquelles un bilan de masse de l'érosion éolienne a été calculé.

Dimensions des parcelles	État de surface	Méthode	Distance par rapport aux limites non érodables	périodes de mesure	Bilan	Références
m × m			m		Mg.ha ⁻¹	
19 x 25	nu	topographie	< 50	de février à juillet 1994	- 160	[25]
19 x 25	résidu 2,0 Mg.ha ⁻¹	topographie	< 50	de février à juillet 1994	+ 290	[25]
40 x 60	résidu 0,8 Mg.ha ⁻¹	flux	25 à 50	du 13 juin au 1 juillet 1993	- 46	[28]
15 x 20	nu	flux	> 200	saisons des pluies 1995 à 1997	- 17 à -214	[31]
15 x 20	résidu 2,0 Mg.ha ⁻¹	flux	> 200	saisons des pluies 1995 à 1997	+ 111	[31]

interannuelle de l'érosion éolienne. Plus que le nombre d'événements érosifs, c'est plutôt l'intensité de quelques événements majeurs liés au passage de lignes de grains qui explique cette variabilité [18].

Méthodes de mesure de l'érosion éolienne

Une synthèse des différentes méthodes d'étude de l'érosion éolienne sur le terrain a été publiée récemment [24]. Seules les plus couramment utilisées au Sahel sont décrites ci-dessous. Une méthode classiquement employée pour estimer les bilans consiste à suivre l'évolution temporelle de la topographie en des points fixes soigneusement repérés [25]. Connaissant la densité apparente de la surface du sol, les variations de topographie sont ensuite converties en gain ou perte en terre. Une autre méthode repose sur la mesure des teneurs résiduelles en radio-césium (¹³⁷Cs) dans des profils de sol qui permettent d'estimer pour chaque profil les gains ou les pertes en terre depuis 1963, moyennant l'identification d'un profil de référence non perturbé [26]. Ces deux méthodes ne permettent pas de distinguer l'érosion éolienne de l'érosion hydrique. Par ailleurs, il s'agit de mesures ponctuelles très délicates à spatialiser dans le milieu sahélien caractérisé par une forte variabilité spatiale. C'est pourquoi de nombreuses études reposent sur la mesure directe et plus intégrative des flux horizontaux d'érosion éolienne [6, 18, 20, 23, 27, 28]. Ces mesures reposent sur l'utilisation de pièges à sable dont les plus courants sont les BSNE (*Big Spring Number Eight* [29]) et les MWAC (*Modified Wilson And Cooke* [30]). Situé à une seule hauteur, de tels capteurs renseignent qualitativement sur l'intensité de l'érosion [20]. Il est nécessaire de disposer au minimum de deux hauteurs de mesure pour calculer un véritable flux horizontal en intégrant sur la hauteur une courbe théorique ajustée sur les valeurs mesurées [6, 18, 28]. De tels dispositifs, placés à chaque extrémité de parcelles [31] ou répartis sur des champs expérimentaux [28], traditionnels [27] ou sur des bassins-versants non cultivés [32],

permettent de calculer des pertes ou gains en terres par différence entre flux sortant et flux entrant pour les surfaces considérées. Pour déterminer ces flux, il faut connaître la direction du vent pendant l'événement érosif. Les données météorologiques avec une bonne résolution temporelle (typiquement de l'ordre de 5 minutes) sont donc indispensables pour ce genre d'étude. L'utilisation de capteurs de saltation de type SaltiphoneTM permet de déterminer exactement les périodes d'érosion, et donc, d'extraire plus précisément les caractéristiques météorologiques de chaque événement érosif [28, 31]. Dans certains cas, de tels capteurs peuvent également être étalonnés sur le terrain à partir des mesures de flux décrites ci-dessus. Cela permet alors d'obtenir un suivi détaillé du flux horizontal d'érosion au cours de l'événement [23].

Les flux verticaux de dépôt totaux (secs et humides) peuvent être mesurés en continu sur plusieurs années au moyen de capteurs passifs ouverts vers le haut, dans lesquels les poussières en suspension sédimentent. Seules la forme des capteurs et la durée de collecte des sédiments (quotidienne [18], mensuelle [33] et trimestrielle [34]) diffèrent selon les études. Les flux verticaux d'érosion peuvent être mesurés par la méthode des gradients qui nécessite de mesurer, en plus des profils de vent et de température, les concentrations d'aérosol en suspension à deux hauteurs au-dessus de la couche de saltation [23, 35]. Ces flux verticaux d'émission peuvent également être estimés à partir de mesures de flux de saltation horizontaux [18].

Bilans de masse dans les systèmes de culture traditionnels : différentes échelles d'investigation

Les bilans de masse et leurs significations sont directement liés aux échelles considérées. Réalisés sur de petites parcelles, ils renseignent plutôt sur la variabilité spatiale intra-champ ; à l'échelle du champ, c'est la dynamique du système de culture champ/jachère qui peut être appréhendée, alors qu'à l'échelle du terroir, c'est plutôt la dynamique régionale qui est prise

en compte. À chacune de ces échelles correspondent des processus d'érosion différents qui conditionnent les méthodes de mesures employées : de l'échelle des petites parcelles à celle du champ, c'est le flux horizontal de sable qui mobilise l'essentiel de la masse ; à l'échelle du terroir, ce sont plutôt les flux verticaux de poussière qui doivent être considérés.

• Échelle des parcelles expérimentales – Variabilité spatiale intra-champ

Les mesures réalisées sur parcelles expérimentales ont généralement eu pour but de tester différentes techniques de lutte anti-érosive. Néanmoins, lorsque les traitements consistent en paillages non organisés de résidus de culture du mil, ils peuvent correspondre aux états de surface que l'on trouve localement dans les champs cultivés traditionnels. Le tableau 1 montre la gamme de variation des bilans obtenus pour des parcelles dont la masse de résidu secs varie de 0 à 2 Mg.ha⁻¹. Les bilans sont systématiquement négatifs pour les parcelles nues, et positifs sur les parcelles dont le taux de paillage est de 2 Mg.ha⁻¹. Sterk et Stein montrent de plus que 38 Mg.ha⁻¹ de sol perdus en seulement deux événements érosifs s'accompagnent d'une perte en éléments nutritifs de 57,1, 79,6, 18,3 et 6,1 kg.ha⁻¹ de potassium, carbone, azote et phosphore, respectivement, ce qui équivaut approximativement à la quantité de potassium et phosphore nécessaire pour produire 2 600 kg.ha⁻¹ de matière sèche de mil, dont 600 kg.ha⁻¹ de grain [28].

Les résultats de mesures d'érosion à l'échelle de la parcelle expérimentale sont en fait difficilement comparables d'une étude à l'autre du fait des différentes techniques de mesure employées, mais aussi du fait de la taille des parcelles et de leur distance par rapport aux limites non érodables (tableau 1). Ainsi, l'érosion se produit même pour des taux de paillage de 2 Mg.ha⁻¹ lorsque l'on se situe près de la limite est non érodable des parcelles qui correspond à la zone de développement des flux d'érosion [20]. S'ils ne peuvent en aucun cas être généralisés à la totalité d'un champ cultivé, les bilans obtenus sur

ces parcelles expérimentales en fonction des taux de résidus de culture permettent d'expliquer en partie la très forte variabilité spatiale des bilans mesurés dans un champ traditionnel au cours d'un seul événement, avec des pertes en terre de plus de $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et des dépôts de plus de $15 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ observés à quelques dizaines de mètres de distance au sein du même champ [27]. Cela se traduit, entre autre, par la formation de « loupes d'érosion », micro-dépressions de dimension métrique couramment observées dans les champs cultivés (figure 1). Néanmoins, la variabilité spatiale du taux de recouvrement par les résidus de culture ne suffit sans doute pas à expliquer la forte variabilité spatiale des bilans puisque elle est également observée sur des parcelles expérimentales où les résidus ont été répartis de façon homogène [28]. Ce sont peut-être les variations de la microtopographie qui interviennent de façon déterminante dans ce cas.

Quoi qu'il en soit, la redistribution des sédiments par l'érosion éolienne au sein même des champs cultivés est une des caractéristiques du milieu sahélien. Cette redistribution, et les transferts de nutriments qui lui sont associés, serait le principal mécanisme expliquant le développement des îlots de fertilité au sein des champs cultivés traditionnels [36].

• Échelle du champ – Dynamique du système champ/jachère

Bien que constituant les unités fonctionnelles de base du paysage sahélien, le champ et la jachère ont été peu étudiés en tant qu'entités homogènes du point de vue de la dynamique éolienne. Ces unités sont généralement juxtaposées et les limites entre ces deux types d'états de surface sont des points clefs de la dynamique. Dans les champs de mil traditionnels, la distance à partir de laquelle le flux atteint sa valeur maximale, c'est-à-dire la capacité de transport du vent, n'est pas déterminée clairement. Elle serait atteinte à partir de 250 m dans un champ à sa quatrième année de culture [37], mais dépasserait 300 à 400 m dans un champ cultivé depuis deux ans [27]. Les distances obtenues suggèrent que la capacité maximale de transport du vent n'est presque jamais atteinte sur les champs traditionnels isolés qui subiraient globalement, au-delà de la forte variabilité spatiale évoquée plus haut, des pertes en terre sur la totalité de leur surface.

Dans un champ cultivé depuis plus de cinq ans, les pertes en terre atteignent au maximum $16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'événement le plus intense étudié pour une bande de 51 m de largeur à partir de la limite amont du champ [6]. Ce phénomène s'accompagne d'une perte en éléments nutritifs de 1,3, 0,6, 1,2, 0,03 et $1,4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ d'azote, de

phosphore, de potassium, de calcium et de magnésium, respectivement. A ce jour, une seule étude a publié des bilans concernant la totalité d'un champ [27]. Sur une période de trois ans, la première année de mesure qui correspond aussi à la première année de mise en culture du champ a donné un bilan positif correspondant à des dépôts de $5,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ alors que les deuxième et troisième années ont permis d'enregistrer des pertes en terre de 5,0 et $25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivement. Ce champ de plus de 8 hectares n'est pas totalement entouré de jachères, mais bordé sur sa limite sud-ouest par un autre champ cultivé, source de sédiments, expliquant le bilan positif observé la première année. Les auteurs attribuent les pertes en terre des deuxième et troisième années à une diminution du taux de recouvrement par la litière, le champ ayant été défriché sans brûlis de la litière herbacée.

Ces résultats montrent le rôle déterminant de la durée de mise en culture des champs qui contrôle en partie les taux de recouvrement par la litière (donc la rugosité de la surface) et suggèrent que plus un champ est cultivé depuis longtemps, plus il est sensible à l'érosion éolienne. A cela s'ajoute l'hétérogénéité liée au défrichage des jachères pour leur mise en culture. Dans l'ouest du Niger, cette pratique varie fortement d'un paysan à l'autre, certains se contentant de couper les arbustes tout en laissant la litière herbacée en place, d'autres procédant systématiquement au brûlis. Au cours de la première année de mise en culture, la pratique du brûlis a un impact considérable sur le bilan de masse de sédiment par suite de la disparition de la litière et de la couverture herbacée, des bilans négatifs pouvant être observés sur les parties brûlées et des bilans nuls ou positifs sur les parties non affectées par le feu [27].

Le nombre d'études concernant les jachères est encore plus faible que pour les champs. Des flux horizontaux de 20, 3 et $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ont été mesurés pendant trois ans respectivement au cœur d'une jachère ancienne (six à neuf ans), sachant que les fortes valeurs de la première année font suite à un incendie accidentel qui a détruit la litière de cette jachère [18]. Ils représentent systématiquement moins de 3 % des flux mesurés simultanément au cœur du champ voisin. Si le flux horizontal augmente de façon linéaire au niveau de la limite amont des champs, il diminue de façon exponentielle dès son entrée dans la jachère [6]. Des flux entrants compris entre 4,5 et $56,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ deviennent toujours inférieurs à $1,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ à 40 m dans la jachère. Pour chaque événement étudié, la diminution des flux en fonction de la distance suit la même fonction exponentielle,

sans être influencée par le développement de la végétation dans la jachère. Ce fait s'explique sans doute par le fort taux de recouvrement de graminées par la litière même en fin de saison sèche dans cette jachère peu pâturée de plusieurs années. Ces résultats, bien que partiels, donnent une vision cohérente du système de culture traditionnel sur sol sableux dans la région de Niamey. Les champs y sont soumis à une forte érosion éolienne, au moins dès leur deuxième année de mise en culture, mais la quasi-totalité des sédiments grossiers exportés par saltation se dépose en quelques dizaines de mètres dès leur entrée dans les jachères adjacentes encore nombreuses dans cette région. Cette redéposition se traduit par un gradient de fertilité croissant sur les 20 premiers mètres des jachères du fait d'une redéposition plus rapide des sédiments éoliens grossiers moins riches en minéraux, en cations échangeables et en matière organique [6]. Des bilans à des échelles comparables ont également été effectués au nord du Burkina Faso, pour une pluviométrie annuelle plus faible, de l'ordre de 300 mm, sur des sols non cultivés, mais pâturés. Dans ce cas, les unités considérées ne sont plus les champs et les jachères, mais les zones présentant des états de surface homogènes. Pour un petit bassin-versant d'1,4 hectare, un bilan annuel quasi équilibré a été obtenu [32]. Ce bilan équilibré cache en réalité une très forte variabilité spatiale : l'érosion éolienne atteint $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sur des zones constituées de petites buttes sableuses végétalisées reposant sur des croûtes argileuses nues et les dépôts atteignent $30 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sur des zones sableuses dont la surface est comparable aux jachères nigériennes (buissons épars et tapis d'herbacées).

• Échelle du terroir – Dynamique régionale

Deux études ont été réalisées sur des terroirs voisins, à 60 km à l'est de Niamey, en vue d'établir un bilan de masse à l'échelle du terroir. La première repose sur une estimation directe des dépôts de poussières d'origine lointaine ou locale ainsi que des quantités émises localement [18]. Puisque dans cette zone le déplacement des particules par saltation ne conduit essentiellement qu'à une redistribution locale des sédiments [6], seuls les flux de poussière en suspension doivent être pris en compte à l'échelle d'investigation du terroir. Les mesures de flux de poussières (particules < $20 \mu\text{m}$) ont été réalisées en continu sur trois cycles saisonniers (1996 à 1998). L'étude montre qu'il existe deux périodes de dépôts de poussières qui correspondent respectivement à la période d'harmattan avec apport majoritairement d'aérosols d'origine lointaine, et la pé-

riode de mousson qui correspond plutôt à des dépôts d'aérosols soulevés localement par les lignes de grains, avec des dépôts annuels s'élevant à $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ [18], comparables à d'autres études [33]. Ces dépôts de poussières se traduisent par un dépôt de nutriments de l'ordre de 12,7, 16,3, 5,3, 0,7, 31,6 et $3,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le potassium, le calcium, le magnésium, le phosphore et l'azote, respectivement [33].

Des flux d'émission de poussières ont été calculés sur base des flux horizontaux mesurés en continu dans un champ et dans une jachère. Ils s'élevaient respectivement en moyenne à 0,68 et $0,01 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ [18]. En prenant en compte la granulométrie des sédiments mesurés dans les dépôts (pour être cohérent avec les valeurs calculées pour les émissions qui correspondent à des particules de diamètre inférieur à $20 \mu\text{m}$) et le pourcentage de champs et de jachères sur le terroir concerné ($25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$), le bilan obtenu correspondrait à un dépôt moyen de l'ordre de $0,4 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à l'heure actuelle. Ce bilan positif est essentiellement dû à la présence de jachères sur près de la moitié des sols cultivés.

Par la méthode du radio-césium (^{137}Cs), et en fonction de la méthode de calcul utilisée, des pertes en terre variant de 16 à $48,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ont été établies pour une zone d'un peu moins de 1 km^2 proche de Banizoumbou [26, 38]. La technique du radio-césium ne permet pas de différencier érosion hydrique et éolienne, mais le secteur étudié étant endoréique, il ne peut pas y avoir d'exportation de sédiments due à l'érosion hydrique. Il faut souligner que ces taux d'érosion représentent une moyenne pour les 30 dernières années qui se caractérisent par une augmentation des surfaces mises en culture et donc par une augmentation des surfaces soumises à l'érosion éolienne. Par ailleurs, sachant que les flux d'érosion sont extrêmement faibles, voir nuls, en jachère [6, 18], les pertes en terre en champ cultivé seraient donc encore plus élevées que les valeurs moyennes rapportées ci-dessus [26, 38]. Ces valeurs très élevées ne semblent pas compatibles avec les mesures directes de flux obtenues récemment et qui mettent avant tout en évidence de très fortes redistributions spatiales sur de courtes distances [6]. Elles s'expliquent peut être par la difficulté de trouver un profil de référence n'ayant subi ni érosion ni dépôt pour calculer en chaque point de mesure les pertes ou gains en terre, mais aussi par la difficulté de spatialiser des mesures ponctuelles dans un milieu qui se caractérise avant tout par une variabilité spatiale

très forte à quelques mètres ou dizaines de mètres de distance.

Perception des agriculteurs face à l'érosion éolienne

S'il est clairement établi que l'érosion éolienne peut être un processus de dégradation important à l'échelle du champ à l'heure actuelle en zone sahélienne, cette conviction est-elle partagée par les populations rurales ? Pour répondre à cette question, un certain nombre d'enquêtes ont été effectuées au cours des 10 dernières années auprès d'agriculteurs du Niger [39-43].

À partir des résultats d'enquêtes menées dans 41 villages dans la zone des 400-600 mm de pluviométrie annuelle au Niger, l'érosion éolienne constitue une contrainte modérée à sévère pour l'agriculture dans près de 4 villages sur 10 [39]. Parmi les contraintes environnementales, l'érosion éolienne reste néanmoins moins importante que les sécheresses récurrentes et la faible fertilité des sols, mais nettement plus importante que l'érosion hydrique. De façon assez surprenante, l'érosion éolienne est généralement perçue comme une contrainte plus importante dans les zones à pluviométrie plus élevée [39]. Bien que l'érosion éolienne soit fort probablement plus intense dans les zones à plus faible pluviométrie du fait d'un moindre développement de la végétation, ces zones sont à tel point affectées par la sécheresse, la famine et la pauvreté que l'érosion éolienne en devient une contrainte secondaire. Par conséquent, dans la zone des 400 mm de pluviométrie annuelle, la participation des populations aux programmes de lutte contre l'érosion sera nécessairement limitée du fait que ces populations ne perçoivent pas l'érosion éolienne comme une contrainte importante [40]. Avant de se lancer dans la mise en œuvre de programmes de lutte anti-érosive, il est donc essentiel pour les décideurs et les responsables de projets de bien cerner la perception qu'ont les agriculteurs de ce phénomène.

De manière générale, l'érosion éolienne est perçue par les agriculteurs sahéliens comme un cercle vicieux qui trouve son origine dans une baisse de la fertilité des sols et de la couverture végétale, et comme un phénomène en augmentation [39, 41]. Cette dernière constatation est en accord avec l'évolution croissante du nombre de jours à forte charge de poussière dans l'atmosphère au cours des dernières décennies [3]. Des problèmes de santé, principalement la toux, les maux d'yeux et la fièvre, sont directement associés à ces poussières [39] et sont considérés comme

le souci majeur en relation avec l'érosion éolienne. La dégradation des sols et les dégâts aux cultures par ensevelissement des jeunes pousses (figure 1), par déchaussement et par abrasion des feuilles constituent les deux autres formes de dommages engendrés par l'érosion éolienne. La perte en terre par déflation est observée chaque année par les agriculteurs dans la majorité de leurs champs, mais des dégâts visibles sont limités à des plages restreintes à l'intérieur des champs. La forme la plus sérieuse de dommage pour le sol est le développement de « loupes d'érosion » caractérisées par la présence de croûtes d'érosion consécutive à la déflation de l'horizon superficiel (figure 1) [42].

Les agriculteurs sahéliens sont généralement conscients de l'impact de leurs pratiques de gestion des terres sur l'érosion [39], et en particulier de la déforestation, du mode de préparation des terres pour les cultures (par exemple, brûlis ; figure 1), et du prélèvement des résidus de culture comme aliment pour le bétail ou comme matériau de construction. En revanche, la pâture et les facteurs climatiques ne semblent pas être considérés comme des facteurs déterminants dans l'accroissement de l'érosion éolienne [40]. Cela montre que, bien que la dégradation de l'environnement au Sahel soit fréquemment mise en relation avec les grandes sécheresses de ces dernières décennies, les agriculteurs perçoivent au contraire cette dégradation comme une conséquence directe de leurs actions, conditionnées largement par la nécessité de subvenir aux besoins élémentaires. Le fait que le surpâturage par le bétail ne soit pas mis en cause a été attribué à la grande valeur que les agriculteurs accordent au bétail [40].

Méthodes de lutte contre l'érosion éolienne

Dès 1965, l'utilisation du paillage, du travail du sol et la plantation de végétation naturelle en bordure de champ fut préconisée au Niger pour réduire les effets néfastes du vent [44]. Dans ce pays, des mesures de conservation des sols ont été entreprises à partir des années 1960 dans le cadre de projets de développement. Ces mesures visaient cependant principalement la fixation de dunes vives par des méthodes biologiques et physiques [45]. Bien que plus spectaculaires, les problèmes d'ensablement dus aux dunes vives ne sont cependant que secondaires dans la zone agro-pastorale sahélienne par rapport aux pertes de sols et de nutriments par déflation et par rapport aux dégâts sur les cultures. Dans cette partie, nous nous limi-

terons donc aux techniques de lutte contre la déflation.

Deux voies principales sont disponibles pour lutter contre l'érosion éolienne :

- réduire la vitesse effective du vent au niveau du sol (brise-vents, augmentation de la rugosité du sol par travail du sol, paillage, maintien d'une litière ou couverture végétale) ;

- augmenter la cohésion du sol et donc augmenter la vitesse seuil d'érosion (création de mottes par labour, humidification du sol par irrigation, apport d'amendements organiques, etc.). Les méthodes de conservation peuvent aussi être classées selon leur nature : techniques de travail du sol, techniques fondées sur la gestion des cultures ou des résidus de culture, et brise-vents. C'est cette dernière approche qui sera suivie ici. Une évaluation qualitative des différentes techniques est donnée au tableau II.

Pour être efficace, les techniques de conservation doivent au minimum assurer une bonne protection du sol en fin de saison sèche et en début de saison des pluies (avril à mi-juillet) lorsque le risque d'érosion éolienne est maximal. Dans la mesure du possible, elles assureront également une protection pendant la période d'harmattan (décembre à mars), même si cette période est moins critique du fait des vitesses de vent moins élevées et de la meilleure couverture du sol par la litière et les résidus de culture.

Gestion des cultures et des résidus de culture

Les agriculteurs disposent d'un certain nombre de techniques dans ce domaine pour lutter contre l'érosion éolienne : paillage, mode de gestion des résidus de culture, mode de préparation des champs avant la culture, gestion du sarclage, mise en jachère. Ces techniques se caractérisent par un niveau de technicité relativement faible et peuvent donc être assez facilement mises en œuvre par les agriculteurs.

Le paillage (*mulching*) est de loin la technique de lutte contre l'érosion éolienne la plus étudiée au Sahel. L'efficacité de cette technique a été largement démontrée pour des taux d'application de paille de mil de 2 t.ha⁻¹. Un tel taux d'application n'assure qu'un taux de couverture du sol de 7 à 10 %, mais réduit les flux de sédiments éoliens de 40 à 60 %, à 10 cm au-dessus du sol [20, 46]. Une efficacité semblable a pu être obtenue pour des pailles placées en bandes de 30 cm de large et espacées de 1,5 m [31], mais, dans ce cas, la protection du sol n'est véritablement assurée que pour des vents perpendiculaires aux bandes. Placé en aval de zones soumises à érosion, le paillage permet de

piéger efficacement les sédiments transportés par saltation [31, 47]. Cette caractéristique est d'ailleurs bien connue des agriculteurs sahéliens qui l'exploitent sur de petites superficies pour récupérer des terres dégradées [41, 43, 48], et est valable pour d'autres matériaux, tel que les branchages [49].

En plus de son efficacité pour la lutte antiérosive, le paillage bénéficie d'un atout considérable, à savoir son impact favorable sur la fertilité des sols [50]. Pour des sols cultivés depuis plusieurs années, l'effet du paillage sur les rendements est très marqué. Cependant, malgré son efficacité, sa simplicité et son impact favorable sur la fertilité des sols, le *mulching* souffre d'un certain nombre de limitations, dont la principale est la disponibilité en paille. Au niveau actuel de productivité, cette contrainte est d'ailleurs insurmontable puisqu'il est difficile d'atteindre une production de paille de 2 t.ha⁻¹ sans recourir à l'utilisation de matières fertilisantes organiques ou inorganiques. De plus, les pailles sont utilisées pour l'alimentation du bétail et comme matériau de construction ou de chauffe, utilisations souvent plus rentables [51]. Pour des taux d'application plus faibles (0,5 à 1,5 t.ha⁻¹), le *mulching* est nettement moins efficace, voire inefficace [20, 52]. Pour des vents très violents, le paillage à faible dose pourrait même accentuer l'érosion en augmentant la turbulence près du sol, favorisant ainsi la déflation [53].

Il a été démontré que, à taux d'application égal, l'efficacité des pailles est meilleure lorsqu'elles sont dressées que couchées sur le sol [54], ce qui est généralement le cas à la récolte au Niger où, dans un premier temps, seul les épis sont récoltés. Cette efficacité accrue des pailles dressées demande cependant à être confirmée pour les conditions du Niger où les densités des semis sont très faibles et la production de biomasse spatialement très hétérogène à l'échelle du champ [55].

Par le développement d'une litière et d'une couverture herbacée, la jachère permet de réduire fortement la prise en charge des particules de sol par le vent [18]. De plus, elle constitue un piège efficace pour les particules en saltation provenant de champs adjacents [6] et pour les poussières [56, 57]. On estime que près de 90 % des flux de saltation entrant dans une jachère peuvent être piégés dans les 20 premiers mètres par la végétation et la litière [6]. La mise en jachère constitue donc une pratique efficace pour lutter contre l'érosion éolienne à l'échelle du terroir, même si elle n'empêche pas l'érosion dans les champs eux-mêmes. La mise en place de bandes enherbées en alternance avec des bandes cultivées pourrait

constituer une méthode efficace de lutte antiérosive, mais une telle pratique ne serait applicable que dans les zones où la pression foncière est faible. Par un effet brise-vent, de telles bandes permettent également de réduire les pertes en terre dans les interbandes cultivées [58].

Le mode de préparation d'un champ pour la culture en fin de saison sèche peut avoir une importance considérable sur l'emprise du vent. Le brûlis de la litière constitue, en particulier, une pratique favorisant très fortement l'érosion éolienne [27], ce qui est d'ailleurs reconnu par les agriculteurs eux-mêmes [39]. Cette pratique est d'ailleurs loin d'être généralisée dans l'ouest du Niger. En revanche, la coupe rase des arbustes et parfois des arbres dans les champs est plus fréquente, compte tenu de la concurrence avec les cultures pour l'eau et les éléments nutritifs. Cependant, le maintien des arbres et arbustes dans les champs et la protection des jeunes plants pour favoriser la régénération naturelle peuvent être recommandés car les arbres et arbustes constituent des îlots de fertilité [36]. De plus, ils constituent une source de bois, de fourrage, de fruits, d'ombre, et de médicaments traditionnels [59]. En nombre suffisant, ils sont susceptibles de réduire la vitesse du vent au sol, mais cette fonction a été peu étudiée.

Travail du sol

Contrairement au paillage, la prévention de l'érosion éolienne par des techniques de travail du sol n'est pas subordonnée au niveau actuel de productivité des terres. Ces techniques peuvent donc éventuellement constituer une alternative là où le paillage est difficilement applicable, mais elles nécessitent, en pratique, le recours à la traction animale lorsque les superficies à traiter sont importantes. Le labour, le billonnage et le scarifiage sont trois de ces techniques couramment utilisées dans la lutte contre l'érosion éolienne dans d'autres régions du monde. Aucune de ces techniques n'est actuellement mise en œuvre sur les sols sableux de l'ouest du Niger.

Dans le cas des sols sableux du Niger ayant une structure très peu développée, le labour s'est avéré peu efficace pour contrôler l'érosion éolienne [60]. En effet, en l'absence de mottes, la rugosité du sol créée par le labour est rapidement nivelée par les pluies. Pour cette même raison, le scarifiage – travail du sol superficiel pratiqué plusieurs fois en cours de saison et destiné à augmenter la rugosité de surface – est inefficace [60].

Par rapport au labour, le billonnage – formation de buttes rectilignes d'une vingtaine de centimètres de hauteur sur lesquelles sont semées les cultures – permet de

Tableau II. Principaux bénéfices et contraintes de techniques de lutte antiérosive au Sahel.

Techniques	Efficacité antiérosive, échelle parcelle agricole	Efficacité antiérosive, échelle terroir	Protection assurée pendant la période critique	Autres avantages ¹	Disponibilité locale des matériaux	Besoins en outil/animal de trait	Besoins en main-d'œuvre pour la mise en place	Besoins en main-d'œuvre pour l'entretien ⁹	Niveau d'expertise technique requis	Coût des intrants	Perte de superficie cultivable	Intérêt économique des utilisations alternatives ²
Mulching avec branches ou pailles	++	++	var ³	++	± ⁴	--	+	na	--	--	na	++
Maintien des pailles de mil et de la litière dans les champs	+ ⁵	+ ⁵	var ⁵	+	+	--	--	na	--	na	na	++
Fumure organique, apport manuel	+ ⁶	+ ⁶	var ⁷	++	± ⁴	+	+	na	--	-	na	na
Apport de bouses par parcage	+ ⁶	+ ⁶	var ⁷	++	± ⁴	--	-	na	--	+	na	na
Fumure minérale	+ ⁶	+ ⁶	var ⁷	++	-	--	±	na	±	++	na	na
Premier sarclage retardé	+	+	non	-	na	-	--	na	±	na	na	na
Second sarclage partiel	+	+	non	+	na	-	--	na	--	na	na	na
Zai, demi-lunes, cordons de pierre	±	±	oui	++	±	++	++	+	+	±	na	na
Billonnage en début de saison des pluies	±	±	non	-	na	++	+	na	+	na	na	na
Billonnage en début de saison sèche avec pailles enfouies	+	+	oui	++	± ⁴	++	++	na	+	--	na	++
Labour	-	-	non	+	na	++	++	na	+	na	na	na
Scarifiage	-	-	non	--	na	+	++	na	±	na	na	na
Brise-vent	+	+	oui	+	-	±	+	+	++	±	±	na
Mise en jachère	++	++	oui	++	na	--	--	na	--	na	++	± ⁸
Végétation en bordure de champ	±	±	var ⁵	+	na	--	--	-	--	na	±	-
Protection de la régénération naturelle/préservation des arbres et arbustes dans les champs	?	+	var ⁵	+	na	--	-	±	±	na	na	na
Bandes de végétation	-	+	var ⁵	±	na	--	--	-	-	na	+	± ⁸

¹ Amélioration de la fertilité, sous-produits (bois, fruits, pharmacopée,...) ; ² S'il existe plusieurs utilisations possibles pour les matériaux sur lesquels repose la technique ; ³ Variable : dépendant de la période d'application ; ⁴ Disponible, mais en quantité limitée ; ⁵ Fonction de la quantité / biomasse présente ; ⁶ Fonction des quantités disponibles et de l'impact sur la productivité des cultures ; ⁷ Surtout en cours de saison des pluies, mais effet indirect si cela se traduit par un taux plus élevé de résidus de culture pendant la saison sèche ; ⁸ Fonction de la pression foncière ; ⁹ Pour techniques ayant une durée de vie pluri-annuelle ; na : non applicable.

créer une rugosité plus importante et de réduire les surfaces de sol à travailler du fait de la faible densité de semis recommandée au Niger. Par rapport à des parcelles témoins sans billons, cette technique a permis de réduire les pertes en terre de 89 % et 28 % en moyenne, au cours de quatre tempêtes, pour des écartements de billons de 0,75 m et 1,5 m, respectivement, pour des vents perpendiculaires aux billons. La technique est cependant globalement assez peu efficace à cause de l'affaissement rapide des billons sous l'effet des pluies et des flux de sable [31, 61] et du fait que la rugosité du sol créée par les billons est unidirectionnelle et donc agit beaucoup moins sur les vents non perpendiculaires aux billons. Le choix de l'orientation des billons par rapport aux vents les plus érosifs est donc un aspect crucial de cette technique, quoiqu'il doive être subordonné à l'orientation de la pente pour ne pas favoriser l'érosion hydrique. En condition non-érosive, le billonnage aurait un impact relativement faible sur la productivité du mil, une augmentation de rendement de l'ordre de 10 % ayant été mesurée sur un essai à long terme (11 ans ; M. Klaij, communication personnelle). En condition érosive, des améliorations de rendement de l'ordre de 30 % ont été mesurées pour le mil [60], qui s'expliquent sans doute partiellement par une réduction des dégâts aux plants par enfouissement et abrasion des feuilles.

L'enfouissement de pailles dans les billons lors de leur construction permet de réduire la vitesse d'affaissement de ces derniers. Sur une période de trois ans, cette pratique a permis de réduire les pertes en terre de 87 % par rapport à des parcelles témoins, contre 57 % sur la même période pour des billons sans paille et pour un même écartement de 1,5 m entre billons [31]. L'efficacité de cette technique n'a pas décliné en cours de saison, démontrant la stabilisation des billons par les pailles.

L'introduction du billonnage comme technique de lutte antiérosive nécessite l'adoption de la traction animale et d'une billonneuse, et donc un investissement conséquent. L'âne est l'animal de trait le plus courant dans cette région, mais il n'existe actuellement pas de billonneuse susceptible d'être tirée par un âne. De plus, comme toutes les techniques de travail du sol avant semis, le billonnage implique fréquemment un retard dans le semis qui, dans les conditions pédoclimatiques du Niger, conduit à une baisse de rendement [62]. La pratique des billons enrichis de paille permet en partie de contourner ce problème, car elle rend possible le billonnage en fin de saison de culture pour la saison suivante sans perte d'efficacité notable [31]. Cela permet aussi d'exploit-

ter les animaux de trait au mieux de leur forme physique. Par ailleurs, l'enfouissement de paille dans les billons a un effet très favorable sur les propriétés chimiques et physiques du sol et sur les rendements des cultures [63, 64]. Si l'enfouissement de paille dans les billons permet donc de circonvier certaines des contraintes principales liées au billonnage, elle n'en est pas moins subordonnée à la disponibilité en paille, à des contraintes de main-d'œuvre et au besoin en équipements et en animaux de trait.

Brise-vents

L'objectif premier des brise-vents est de réduire la vitesse du vent au niveau du sol. Les brise-vents peuvent être constitués de bandes de végétation naturelle ou de plantations d'herbacées pérennes, d'arbres ou d'arbustes. Ainsi, des bandes de végétation naturelles de 5 m de large (strate herbacée clairsemée d'arbustes de *Galago senegalensis* et d'une herbacée pérenne *Andropogon gayannus*) permettent de réduire les flux de sédiments de 53 à 70 % lorsque l'écartement entre les bandes passe de 20 à 6 m [58]. Des brise-vents de 2 m de haut de *Bauhinia rufescens* et *A. gayannus* ont par ailleurs permis de réduire de façon sensible les flux de sédiments sur une distance de 7 et 5 fois la hauteur du brise-vent, respectivement [65]. Les brise-vents ayant une strate herbacée bien développée constituent un piège efficace pour les sédiments éoliens. Une différence de hauteur de 150 mm entre des parcelles de 10 m de large plantées avec *A. gayannus* et des parcelles de même largeur non protégées a ainsi pu être observée suite au dépôt de sédiments éoliens après 1 an [66].

Si la capacité des brise-vents à réduire les flux de sable est clairement établie, aucun effet positif sur les rendements des cultures cultivées entre les brise-vents n'a pu être mis en évidence, que ce soit pour des brise-vents de végétation naturelle [61], pour des bandes d'*A. gayannus* [66] ou pour sept espèces locales et exotiques d'arbustes et d'herbacées pérennes évaluées comme brise-vents avec un écartement de 30 m (*B. rufescens*, *A. gayannus*, *Acacia holosericea*, *Acacia nilotica*, *Acacia senegal*, *Azadirachta indica*, *Maerua crassifolia*). Une huitième espèce, *F. albida*, a un impact positif sur les rendements de mil à proximité du brise-vent [65]. Cependant, compte tenu du fait que cette espèce est défoliée en saison des pluies, l'impact favorable sur les rendements de *F. albida* fut attribué avant tout à l'amélioration de la fertilité du sol suite à la chute des feuilles et au changement dans les conditions micro-climatiques [67], plutôt qu'à un réel effet brise-vent.

Il est souvent admis que l'écartement minimal entre brise-vents devrait être de l'ordre de 15 fois leur hauteur afin de compenser les pertes de rendement des cultures suite à la concurrence entre les cultures et les brise-vents pour l'eau, les nutriments et la lumière [68]. Aucun des brise-vents susmentionnés n'assurerait donc une protection complète d'un champ dans ces conditions.

À l'exception des bandes de végétation naturelle, l'implantation de brise-vents requiert la disponibilité de plants pour la plantation, mais aussi une protection contre le broutage pendant les premières années qui suivent la plantation, et ensuite un entretien régulier. C'est donc une technique exigeante qui requiert un soutien financier et institutionnel [69], partiellement compensé par les sous-produits des arbres et arbustes utilisés : fruits, bois de construction, bois de chauffe et pharmacopée traditionnelle. Le choix des espèces est donc crucial pour intéresser les populations rurales dans l'installation et l'entretien de brise-vents [43].

Quatre-vingt douze pour-cent des agriculteurs mettent actuellement en œuvre une ou plusieurs techniques permettant de réduire l'érosion éolienne [41]. En dehors du cadre de projets de développement, ni le billonnage ni les brise-vents ne sont actuellement pratiqués par les agriculteurs sahéliens pour lutter contre l'érosion éolienne. Le paillage n'est, quant à lui, généralement pratiqué que sur de faibles superficies, pour la régénération de petites surfaces dégradées [48]. Pour qu'elles puissent être adoptées par les agriculteurs, les technologies doivent être simples, peu coûteuses, requérir peu d'intrants externes, et reposer largement sur l'expertise locale [40, 70] sans nécessiter une organisation communautaire trop importante. Par ailleurs, les agriculteurs préfèrent les technologies à objectifs multiples, avec pour objectif principal de maintenir ou de restaurer la fertilité des sols, la lutte contre l'érosion éolienne étant un objectif secondaire [42, 71]. Le tableau III reprend à cet effet les principales techniques pratiquées par les agriculteurs nigériens.

À l'avenir, il est vraisemblable que la lutte contre l'érosion éolienne ne pourra se concevoir qu'au travers de la mise en œuvre d'un ensemble de mesures reposant largement sur le savoir-faire et les moyens locaux et apportant des bénéfices immédiats autres que le contrôle de l'érosion, par exemple en termes de fertilité des sols ou par la production de sous-produits intéressants. À ce titre, le paillage devrait occuper une place importante dans les programmes de protection des sols, mais cette technique doit évoluer vers des formes nécessitant le moins de main-d'œuvre

Tableau III. Pratiques utilisées par les agriculteurs en zone sahélienne du Niger contribuant à la lutte contre l'érosion éolienne [72].

Pratiques	Commentaires	Références
Maintien de la végétation en bordure de champ	Sert à délimiter les parcelles (p.ex., <i>Andropogon gayanus</i> ou <i>Guiera senegalensis</i>). Source de bois et matériaux de construction. Rôle de brise-vent si suffisamment dense.	[39, 44, 66]
Gestion de la végétation naturelle dans les champs	Consiste à maintenir certaines espèces d'arbres et d'arbustes dans les champs et à favoriser la régénération naturelle (voir texte).	
Mulching (pailles, branchages ou déchets ménagers)	Petites superficies uniquement (voir texte).	Voir texte
Maintien des pailles de mil et de la litière dans les champs	Voir texte.	Voir texte
Implantation de zaï, demi-lunes, cordons de pierre	Avant tout pratiquée pour lutter contre l'érosion hydrique. Amélioration de la productivité de terres dégradées et donc meilleur couvert végétal. Piégeage de sédiments éoliens.	[41, 73]
Apport de fumure organique (fumier, compost) dans les champs.	Couverture du sol par le compost ou le fumier. Amélioration de la fertilité du sol et meilleure couverture du sol par les cultures.	[15, 39, 41]
Retarder le premier sarclage	Consiste à maintenir une couverture du sol par les adventices le plus longtemps possible en début de saison. Nécessite une forte disponibilité en main-d'œuvre. Accentue le risque de déficit hydrique et nutritionnel des cultures à cause de la compétition accrue pour l'eau et les nutriments.	[39]
Sarclage partiel lors du second sarclage	Consiste à ne pas sarcler les parties de champ où la levée a été mauvaise et où la croissance est tellement limitée par manque d'eau ou de nutriments qu'elle ne donnera pas de produits récoltables. Meilleur couvert végétal. Économie de main-d'œuvre.	[39]
Clôture avec arbustes ou branchages	Effet brise-vent. Limitée à de petites superficies (p. ex. jardins maraichers). Production de fourrage et de fruits si arbustes (p. ex. <i>Ziziphus Mauritania</i>).	[39, 40]

possible et sa mise en œuvre systématique nécessitera une concertation entre les intérêts divergents des agriculteurs et des pasteurs. La contrainte majeure du paillage étant cependant la disponibilité en paille pour satisfaire les différents usages, cette pratique ne pourra être appliquée à grande échelle et à des taux suffisants que moyennant une augmentation de la production de biomasse et donc de la fertilité des sols. Une fertilisation raisonnée, et en particulier l'apport de faibles doses de phosphore, constitue donc un moyen indirect de favoriser l'utilisation du paillage [5]. Cela permettrait également d'accroître la vitesse de croissance du mil en début de saison des pluies, et donc de réduire la période de sensibilité maximale à l'érosion éolienne. Une augmentation des rendements agricoles permettrait également le maintien de plus grandes superficies sous jachère, et donc le maintien de bilans de sédiments éoliens positifs à l'échelle du terroir.

Conclusion

Bien que l'érosion éolienne soit une menace sérieuse pour la durabilité de l'agri-

culture en région sahélienne en termes de bilan de masse et d'éléments nutritifs, elle n'est généralement perçue que comme une contrainte secondaire par les agriculteurs. Ces derniers mettent néanmoins en œuvre un certain nombre de techniques pouvant contribuer à la conservation des ressources en sols, telles qu'un paillage localisé, la préservation de la régénération naturelle de la végétation, ou le sarclage sélectif. Compte tenu de l'extension des terres cultivées, ces techniques, dont l'effet est souvent très localisé, devront être suppléées par d'autres technologies plus performantes fondées, par exemple, sur une gestion des résidus de culture prenant aussi en compte leur fonction antiérosive ou une utilisation rationnelle de l'espace avec préservation d'un couvert végétal suffisant, en veillant à ce que ces technologies assurent des bénéfices immédiats aux agriculteurs en plus de la conservation des ressources en sol. De manière générale, la lutte antiérosive au Sahel ne peut en aucun cas se faire sans remettre ce processus dans le cadre général de lutte contre la pauvreté et l'amélioration de la productivité, et en particulier l'amélioration de la fertilité des sols. Tout cela constitue un

préalable indispensable à la participation active de la population rurale dans la lutte contre la dégradation de l'environnement ■

Références

1. Mainguet M, Chemin MC. Wind degradation on the sandy soils of the Sahel of Mali and Niger and its part in desertification. *Acta Mechanica* 1991 ; 2 : 113-30.
2. Mainguet M. *Aridity. Droughts and human development*. Berlin : Springer Verlag, 1999 ; 302 p.
3. Valentin C. Sécheresse et érosion au Sahel. *Sécheresse* 1994 ; 5 : 191-8.
4. Smaling EMA, Stoorvogel JJ, Windmeijer PN. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 2. District scale. *Fert Res* 1993 ; 35 : 237-50.
5. Batiano A, Woni S, Biolders CL, Vlek PLG, Mokwunye AU. Crop residue and fertilizer management to improve soil organic carbon content, soil quality and productivity in the Desert Margins of West Africa. In : Lal R, Kimble JM, and Stewart BA, eds. *Global climate change and tropical ecosystems*. Boca Raton (USA) : CRC Press, 2000 : 117-45.
6. Biolders CL, Rajot JL, Amadou M. Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally-managed cultivated fields in the Sahel. *Geoderma* 2002 ; 109 : 19-39.
7. Sterk G, Herrmann L, Batiano A. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in Southwest Niger. *Land Degrad Devel* 1996 ; 7 : 325-35.
8. Cooke R, Warren A, Goudie A. *Desert Geomorphology*. London : UCL Press, 1993 ; 526 p.
9. Mainguet M. The concept of sandy-aeolian sediment budget applied to the sand deposits of the Sahara and Sahel taken as unit in the analysis of the surface shape types of the "Grand erg oriental and occidental". In : El-Baz F, El-Tayeb IA, Hassan MHA, eds. *Sand transport and desertification in arid lands*. Londres : World Scientific Publ. Co., 1990 : 44-65.
10. Prospero JM, Glacum RA, Nees RT. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature* 1981 ; 289 : 570-2.
11. Swap R, Garstang M, Greco S. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus* 1992 ; 44B : 133-49.
12. Lebel T, Taupin JD, D'Amato N. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *J Hydrol* 1997 ; 188-189 : 74-96.
13. Loireau M, D'Herbes JM, Delabre E. Evolution et place de la jachère à travers une analyse spatiale des interactions ressources-usages au Sahel agropastoral nigérien. In : Floret Ch, Pontanier R, eds. *La jachère en Afrique tropicale : Rôles, aménagements, alternatives*. Montrouge (France) : John Libbey Eurotext, 2000 : 32-42.
14. Gavaud M. *Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional*. Vol. 78. Travaux et documents de l'ORSTOM. Paris : Orstom, 1977 ; 102 p.
15. de Rouw A, Rajot JL, Schmelzer G. Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du

- rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger. In : A. Biarnès, éd. *La conduite du champ cultivé*. Paris : Orstom, 1998 : 95-112.
16. Stull RB. *An introduction to boundary layer meteorology*. Atmospheric Science Library. Dordrecht, (Netherlands) : Kluwer Academic Publishers, 1991 ; 666 p.
17. Chepil WS. Dynamics of wind erosion : I. Nature and movement of soil by wind. *Soil Sci* 1945 ; 60 : 305-20.
18. Rajot JL. Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. *Bull Soc Géol France* 2001 ; 172 : 523-31.
19. Buerkert B, Allison BE, von Oppen M. *Wind erosion in Niger. Implications and control measures in a millet-based farming system*. Dordrecht, (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ, 1996 ; 255 p.
20. Michels K, Sivakumar MVK, Allison BE. Wind erosion control using crop residue. I. Effects on soil flux and soil properties. *Field Crops Res* 1995 ; 40 : 101-10.
21. Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle : 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J Geophys Res* 1995 ; 100 : 16415-30.
22. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Collection didactiques. Paris : Orstom éditions, 1989 ; 229 p.
23. Rajot JL, Alfaro SC, Gomes L. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion. *Catena* 2003 ; 53 : 1-16.
24. Zobeck TM, Sterk G, Funk R, Rajot JL, Stout JE, Scott Van Pelt R. Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surf Proc Landf* 2003 ; 28 : 1163-88.
25. Buerkert A, Lamers JPA. Soil erosion and deposition effects on surface characteristics and pearl millet growth in the West African Sahel. *Plant Soil* 1999 ; 215 : 239-53.
26. Chappell A, Warren A, Taylor N, Charlton M. Soil flux (loss and gain) in southwestern Niger and its agricultural impact. *Land Degrad Devel* 1998 ; 9 : 295-310.
27. Biielders CL, Vrieling A, Rajot JL, Skidmore E. On-farm evaluation of field-scale soil losses by wind erosion under traditional management in the Sahel. In : Ascough JC II, Flanagan DC, eds. *Soil erosion research for the 21st century*. St Joseph (Michigan) : ASAE, 2001 : 494-7.
28. Sterk G, Stein A. Mapping wind-blown mass transport by modeling variability in space and time. *Soil Sci Soc Am J* 1997 ; 61 : 232-9.
29. Fryrear DW. A field dust sampler. *J Soil Water Cons* 1986 ; 41 : 117-20.
30. Sterk G, Raats PAC. Comparison of models describing the vertical distribution of wind-eroded sediment. *Soil Sci. Soc Am J* 1996 ; 60 : 1914-9.
31. Biielders CL, Michels K, Rajot JL. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. *Soil Sci Soc Am J* 2000 ; 64 : 1776-85.
32. Rajot JL, Ribolzi O, Thiebaut JP. Wind erosion in a small catchment of grazing area in Northern Burkina Faso : influence of surface features. In : Lee JA, Zobeck TM, eds. *Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Meeting. Lubbock, Texas, USA, 22-25 July 2002*. Lubbock, (Texas) : International Center for Arid and Semiarid Lands Studies, 2002 : 185-90.
33. Herrmann L. *Staubdeposition auf Böden West-Afrikas*. Stuttgart (Germany) : University of Hohenheim, 1996 ; 239 p.
35. Rajot JL, Sabre M, Gomes L. Measurement of vertical fluxes of soil-derived dust during wind erosion events in a Sahelian region (Niger). In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind Erosion in West Africa. The problem and its control*. Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 49-56.
36. Wezel A, Rajot JL, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *J Arid Envir* 2000 ; 44 : 383-98.
37. Valentin C, Rajot JL, Mitja D. Responses of soil crusting, runoff and erosion to following in the sub-humid and semi-arid regions of West-Africa. *Agric Ecosyst Environ* 2004 : (sous presse).
38. Chappell A, Warren A, Oliver MA, Charlton M. The utility of ^{137}Cs for measuring soil redistribution rates in southwest Niger. *Geoderma* 1998 ; 81 : 313-37.
39. Biielders CL, Alvey S, Cronyn N. Wind erosion : the perspective of gross-roots communities in the Sahe. *Land Degrad Devel* 2001 ; 12 : 57-70.
40. Baidu-Forsom J, Napier TL. Wind erosion control within Niger. *J Soil Water Cons* 1998 ; 53 : 120-5.
41. Sterk G, Haigis J. Farmer's knowledge of wind erosion processes and control methods in Niger. *Land Degrad Devel* 1998 ; 9 : 107-14.
42. Feil PR, Lomers JPA. Farmer's perception about wind erosion and its control. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind erosion in Niger. Implications and control measures in a millet-based farming system*. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ., 1996 : 215-34.
43. Lamers JPA, Michels K, Feil PR. Wind erosion control using windbreaks and crop residues : local knowledge and experimental results. *J Agric Tropics Subtrop* 1995 ; 96 : 87-96.
44. Raulin H. *Techniques et phases socio-économiques des sociétés rurales nigériennes*. Vol. 12. Études nigériennes. Niamey (Niger) : IFAN-CNRS, 1965.
45. Ben Mohammed A. Wind erosion in Niger : extent, current research, and ongoing soil conservation activities. In : Sivakumar MVK, Zöbisch M, Koala S, Maukonen T, eds. *Wind erosion in Africa and West Asia : Problems and control strategies. Proceedings of the Expert Group Meeting, 22-25 April 1997, Cairo, Egypt*. Aleppo (Syria) : ICARDA ; Patancheru (India) : ICRISAT, 1998 : 125-41.
46. Buerkert A. *Effects of crop residues, phosphorus, and spatial variability on yield and nutrient uptake of pearl millet (Pennisetum glaucum L.) in southwest Niger*. Stuttgart-Hohenheim (Germany) : Ulrich Grauer Verlag, 1995 ; 272 p.
47. Geiger SC, Manu A, Bationo A. Changes in a sandy Sahelian soil following crop residue and fertilizer additions. *Soil Sci Soc Am J* 1992 ; 56 : 172-7.
48. Lomers J, Feil PR. Farmer's knowledge and management of spatial soil and crop growth variability in Niger, West Africa. *Nether J Agric Sci* 1995 ; 43 : 375-89.
49. Chase R, Boudouresque E. Methods to stimulate plant regrowth on bare Sahelian forest soils in the region of Niamey, Niger. *Agric Ecosyst Environ* 1987 ; 18 : 211-21.
50. Bationo A, Buerkert A, Sedogo MP, Christianson BC, Mokwunye AU. A critical review of crop residue use as soil amendment in the West African semi-arid tropics. In : Powell JM, Fernandes-Rivera S, Williams TO, Renard C, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of Sub-Saharan Africa*. Vol 2. Addis Ababa (Ethiopia) : International Livestock Center for Africa (ILCA), 1995 : 305-22.
51. Lamers JPA, Bruentrup M. Comparative advantage of single and multipurpose uses of millet stover in Niger. *Agric Syst* 1996 ; 50 : 273-85.
52. Sterk G, Spaan WP. Wind erosion control with crop residues in the Sahel. *Soil Sci Soc Am J* 1997 ; 61 : 911-7.
53. Sterk G. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport. *Soil Sci Soc Am J* 2000 ; 64 : 852-8.
54. Lyles L, Allison BE. Wind erosion : the protective role of simulated standing stubble. *Trans ASAE* 1976 ; 19 : 61-4.
55. Brouwer J, Bouma J. *Soil and crop growth variability in the Sahel : highlights of reserach (1990-95) at ICRISAT Sahelian Center*. Information Bulletin N°49. Patancheru (India) : ICRISAT, 1997 ; 58 p.
56. Ambouta JMK, Valentin C. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 269-75.
57. Herrmann L, Jahn R, Starh K. Identification and quantification of dust additions in peri-saharan soils. In : Guerzoni S, Chester R, eds. *The impact of desert dust across the mediterranean*. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publ., 1996 : 173-82.
58. Banzhaf J, Leihner DE, Buerkert A, Serafini PG. Soil tillage and windbreak effects on millet and cowpea : I. Wind speed, evaporation and wind erosion. *Agron J* 1992 ; 84 : 1056-60.
59. Rinaudo T. Tailoring wind erosion control methods for farmers' specific needs. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind erosion in West Africa. The problem and its control*. Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 161-71.
60. Klaij MCK, Hoogmoed WB. Soil Management for crop production in the West African Sahel. II. Emergence, establishment and yield of pearl millet. *Soil Till Res* 1993 ; 25 : 301-15.
61. Leihner DE, Buerkert A, Banzhaf J, Serafini PG. Soil tillage and windbreak effects on millet and cowpea. II. Dry matter and grain yield. *Agron J* 1993 ; 85 : 400-5.
62. Hoogmoed WB, Klaij MC. Soil management for crop production in the West African Sahel. I. Soil and climate parameters. *Soil Till Res* 1990 ; 16 : 85-103.
63. Biielders CL, Michels K. On-farm Evaluation of Ridging and Residue Management Options in a Sahelian millet-cowpea intercrop. II. Crop development. *Soil Use Manage* 2002 ; 18 : 309-15.

64. Bielders CL, Michels K, Bationo A. On-farm Evaluation of Ridging and Residue Management Options in a Sahelian millet-cowpeo intercrop. I. Soil quality changes. *Soil Use Manage* 2002 ; 18 : 216-22.
65. Michels K, Lamers JPA, Buerkert A. Effects of windbreak species and mulching on wind erosion and millet yield in the Sahel. *Exp Agric* 1998 ; 34 : 449-64.
66. Renard C, Vandenbeldt RJ. Bordures d'*Andropogon gayanus* Kunth comme moyen de lutte contre l'érosion éolienne au Sahel. *Agron Trop* 1990 ; 45 : 227-31.
67. Poyné WA, Williams JH, Moussa KAM, Stern RD. Crop diversification in the Sahel through use of environmental changes near *Faidherbia albida* (Del) A Chev. *Crop Sci* 1998 ; 38 : 1585-91.
68. Brenner AJ, Jarvis PG, Van den Belt RJ. Windbreak-crop interactions in the Sahel. 2. Growth response of millet in shelter. *Agric Forest Meteor* 1995 ; 75 : 235-62.
69. Lamers JPA, Becker T, von Oppen M. Arrangements to finance tree windbreaks for wind erosion control. In : Buerkert B, Allison BE, von Oppen M, eds. *Wind Erosion in West Africa. The problem and its control*. Weikersheim (Germany) : Margraf Verlag, 1996 : 227-41.
70. Lamers JPA. *An Assessment of Wind Erosion Control Techniques in Niger. Financial and Economic Analyses of Windbreaks and Millet Crop Residues*. Stuttgart (Germany) : Ulrich Grauer Verlag, 1995 ; 208 p.
71. Lamers JPA. Wind erosion in Niger : Farmer perception, traditional techniques to prevent and combat wind erosion, and farmer adoption of modern soil conservation technologies. In : Sivakumar MVK, Zöbisch M, Koala S, Maukonen T, eds. *Wind erosion in Africa and West Asia : Problems and control strategies. Proceedings of the Expert Group Meeting, 22-25 April 1997, Cairo, Egypt*. Aleppo (Syria) : ICARDA ; Patancheru (India) : ICRISAT, 1998 : 173-86.
72. Bielders CL, Lamers JPA, Michels K. Wind erosion control technologies in the West African Sahel : the effectiveness of windbreaks, mulching and soil tillage, and the perspective of farmers. *Annals Arid Zones* 2001 ; 40 : 369-94.
73. Scoones I, Reij C, Toulmin C. Sustaining the soil : indigenous soil and water conservation in Africa. In : Scoones I, Reij C, Toulmin C, eds. *Sustaining the soil : indigenous soil and water conservation in Africa*. London (UK) : Earthscan Publications Ltd, 1996 : 1-27.

Érosion et conservation des sols en montagne sahélienne : le cas de l'Éthiopie du Nord

Jan Nyssen¹
Jean Poesen¹
Jan Moeyersons²
Jozef Deckers³
Mitiku Haile⁴

¹ Laboratoire de géomorphologie
expérimentale,
K.U. Leuven,
Redingenstraat 16,
B - 3000 Leuven,
Belgique

jan.nyssen@agr.kuleuven.ac.be

² Département d'économie agricole et
forestière,
Musée royal d'Afrique centrale,
B - 3080 Tervuren,
Belgique

³ Institute for Land and Water Management,
K.U. Leuven,
Vital Decosterstraat 102,
B - 3000 Leuven,
Belgique

⁴ Mekelle University,
Department of Land Resources Management
and Environmental Protection,
Mekelle University,
P.O.Box 231,
Mekelle,
Éthiopie

Résumé

Les taux d'érosion des sols par différents processus, ainsi que les facteurs contrôlant ces processus d'érosion en Éthiopie du Nord ont été évalués. La plupart de ces processus (le *creep*, l'érosion par le labour, l'érosion suite au ruissellement et au piétinement par le bétail) sont induits par des facteurs anthropiques tels que la déforestation, l'agriculture et le défrichage des restes de végétation. Dans un bassin-versant de 199 hectares, près de Hagere Selam (Tigré), le taux moyen d'érosion aréolaire sur les terres cultivées est estimé à $9,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Le taux de ravinement, qui est actuellement de $4,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ de perte en sol, s'est accéléré pendant ces 50 dernières années, suite à une plus forte pression sur la terre résultant en un défrichage généralisé, ainsi qu'à la construction de routes. Actuellement, les taux d'érosion des sols sont en décroissance, en conséquence de l'application de mesures de conservation dans les bassins (murets en pierres sèches, mises en défens) et dans les ravins, avec, en particulier, la construction de seuils empierrés.

Mots clés : Érosion ; Montagne ; Éthiopie.

Summary

Soil erosion and conservation in Sahelian highlands: The case of Northern Ethiopia

Rates and controlling factors of past and contemporary soil erosion processes in the Northern Ethiopian Highlands have been assessed. Most soil erosion processes (i.e. creep, tillage, cattle trampling and water erosion) are induced by human factors such as deforestation, agriculture, and removal of remnant vegetation. In a 199-hectare study of a catchment near Hagere Selam (Tigray), mean soil loss rate by sheet and rill erosion on arable land is estimated at $9.9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$. Gully erosion rate, which presently accounts for $4.7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ of soil loss, accelerated over the last 50 years as a consequence of i) increased pressure on the land leading to the removal of remnant vegetation and ii) road building. At present, there is a decrease of soil erosion rates, as a result of widespread conservation measures in the catchments (i.e. stone bunds, establishment of exclosures) and in the gullies (i.e. building of checkdams).

Key words: Erosion; Mountainous areas; Ethiopia.

Les systèmes agraires de montagne sont vulnérables pour différentes raisons, telles que le coût de l'accessibilité et de l'infrastructure, ainsi que la limitation de la possibilité de faire des économies d'échelle [1]. En outre, les hauts plateaux éthiopiens, comme la plupart des régions de montagnes tropicales, sont des zones à forte densité de population. L'augmentation de la production agricole à court terme est souvent atteinte à travers une pression accrue sur le sol, c'est-à-dire des jachères réduites, l'enlèvement de la végétation des limites parcellaires et la conversion de forêts sur fortes pentes en terres agricoles marginales [2, 3].

Depuis les années 1970, des épisodes de sécheresse ont affecté le Sahel. A cause de leur altitude, les hautes terres du Tigré (Ethiopie du Nord, figure 1) ont souffert beaucoup moins que les plaines adjacentes du Soudan et du Danakil [4-6]. Les conditions antérieures ont été rétablies après la période sèche des années 1980 (figure 2).

La dégradation des terres sur les hauts plateaux du nord de l'Éthiopie semble causée par un environnement fragile combiné à des facteurs socio-économiques tels que la pauvreté extrême, la stagnation des technologies agricoles, et les grandes densités de population et de bétail. D'après la carte *Global Assessment of Soil Degradation* [7], plus de 50 % des hauts plateaux

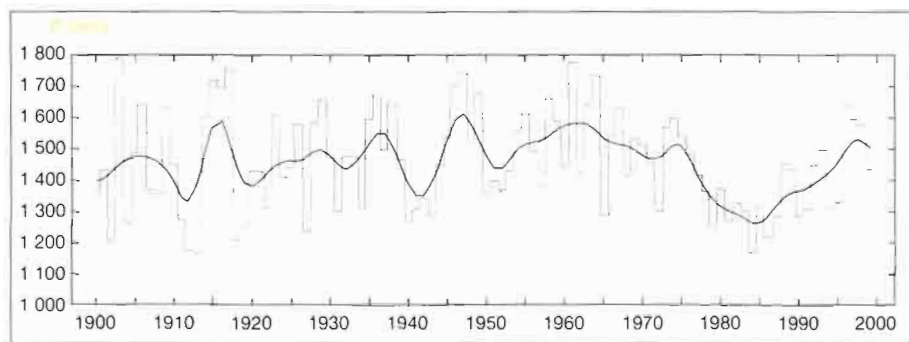


Figure 2. Série temporelle des précipitations annuelles (P) : moyenne pondérée (1-11 pluviomètres) du bassin du Nil Bleu, situé dans les hauts plateaux du Nord éthiopien. La courbe lisse a été obtenue par l'application d'un filtre gaussien de 10 ans. Notez le retour aux conditions de précipitations annuelles après la décennie sèche 1980-1990 (Conway 2001, communication personnelle, School of Development Studies, University of East Anglia, Norwich.)

du nord de l'Éthiopie souffrent de pertes de sol extrêmement élevées, dues à l'érosion aréolaire. Sur cette carte, le ravinement et les glissements de terrain sont également indiqués comme des problèmes majeurs. La perte moyenne en sol par érosion aréolaire est estimée à $12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ [8]. L'espérance de vie des petits réservoirs est courte, en raison de la sédimentation rapide. Le niveau de la nappe phréatique descend en raison de l'augmentation du volume d'eau ruisselée et de l'incision des fonds de vallée par des ravins. Malgré le fait qu'il y a eu une augmentation impar-

tante de la production alimentaire depuis une dizaine d'années [9], la diminution de la production alimentaire par habitant illustre la gravité du problème de la dégradation des terres, en plus des interventions macroéconomiques dans la société paysanne éthiopienne [10].

A présent, la décroissance de la disponibilité d'eau sur les hauts plateaux éthiopiens est l'expression de la nature essentiellement anthropique de la dégradation des sols, comme le montrent les résultats d'une étude des aspects physiques de la dégradation et de la conservation des sols, ainsi que les changements afférents dans l'affectation du sol. [11].

Pour combattre la dégradation, le gouvernement régional du Tigré (la région la plus septentrionale et la plus sèche des hauts plateaux) a lancé de nombreux programmes pour le contrôle de l'érosion et pour la réhabilitation des terres, comprenant la construction généralisée de murets en pierres sèches pour réduire l'érosion aréolaire, de seuils dans les ravins et la mise en défens de nombreuses pentes fortes. La majorité des paysans participent activement à cette politique [12].

Vu la complexité de la problématique de l'érosion et de la conservation des sols sur les hauts plateaux éthiopiens, une approche holistique a été suivie pour étudier les facteurs environnementaux des processus d'érosion dans une région d'étude représentative, le Dogu'a Tembien (figure 3).

Région d'étude

La région d'étude Dogu'a Tembien (figure 1), située à une altitude de 2 200-2 700 m, connaît des températures relativement basses (moyenne annuelle : $13,3 \text{ }^\circ\text{C}$) et un régime concentré de précipitations ($700\text{-}820 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$). La lithologie est composée de basaltes tertiaires et de calcaires et grès mésozoïques [13].

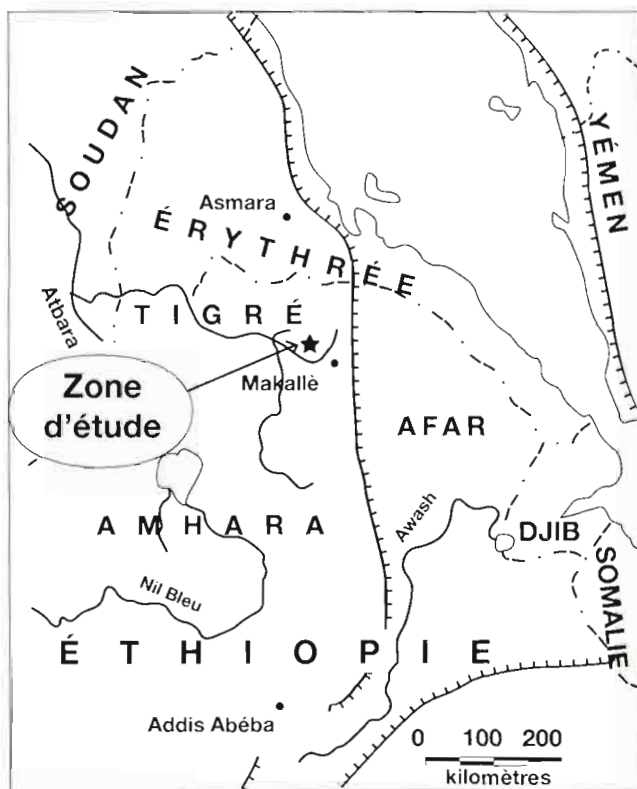


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.



Figure 3. Vue sur la région étudiée. (Photo E. Lavrysen).

Le relief structural subhorizontal correspond à des coulées de lave superposées dans la partie haute du paysage, et des roches sédimentaires subhorizontales dans la partie basse. L'affectation typique du sol consiste en des terres pâturées sur les fortes pentes et des terres arables sur les replats. Les Vertisols dans les fonds de vallée sont disséqués par des ravins.

Couplées à des pratiques agricoles séculaires, ces conditions ont conduit à la répartition actuelle des sols et de leur affectation. Comme il s'agit d'un relief structural subhorizontal (figure 3), les observations et mesures de l'érosion peuvent être extrapolées latéralement dans une vaste région. On doit pour cela prendre néanmoins en compte les nombreux dépôts de glissements de terrain quaternaires qui interrompent l'organisation générale du paysage en unités de terrain parallèles aux courbes de niveau [14].

L'analyse des barrages quaternaires de tuf calcaire dans la région d'étude [15] indique que le dernier stade de déposition correspond, et est probablement dû à la déforestation (dans une période qui débute avant 1430-1260 bc), ce qui a conduit à une augmentation du transport en suspension dans les rivières et donc à un arrêt de la croissance des algues et du tuf [16]. Des toposéquences, réalisées dans une forêt résiduelle et son environnement immédiat à Hechi, indiquent l'impact sur les sols de la déforestation et des changements subséquents dans l'affectation des terres. Nous avons mesuré une perte moyenne en sol de 30 cm (sur un replat structural) et de 90 cm (sur des pentes de $> 0,3 \text{ m.m}^{-1}$) depuis la déforestation, qui a été estimée à environ 500 ans à cet endroit [17]. Trois types de sol jeunes – regosols, cambisols et leptosols [18] – occupent environ 75 % de la superficie [19]. C'est le résultat de l'érosion des sols et du dépôt de sédiments, processus qui

ont débuté après la déforestation et qui sont toujours actifs actuellement. Compte tenu de la grande densité de pierres à la surface, l'érodibilité des sols est relativement faible [20].

Dans la région d'étude (dénivelé de 500 m), les précipitations n'augmentent que légèrement avec l'altitude. Il y a surtout un effet d'ombre (moins de précipitations) sur les pentes orientées au NO. En outre, on a démontré que sur les hauts plateaux éthiopiens, les précipitations d'intensité inférieure à 70 mm.h^{-1} ont une plus grande énergie cinétique que dans nombre d'autres régions du monde, en raison de la grande taille des gouttes de pluie dans la région [21].

Un bassin-versant de 199 hectares a été étudié en détail : il comporte 65 % de terres arables, 20 % de pâturages et 11 % de terres mises en défens [2, 11]. La superficie des pâturages va en diminuant, comme conséquence de l'extension, d'une part, des champs, depuis des dizaines d'années et, d'autre part, des mises en défens, depuis une quinzaine d'années.

Méthodologie

Pour réaliser cette étude [11], neuf campagnes de terrain (23 mois au total) ont été menées sur les hauts plateaux de l'Éthiopie du Nord. Les travaux de terrain comprenaient :

- prospections et observations détaillées sur une échelle allant de la région d'étude

(500 km^2) au profil du sol. Ces recherches concernaient la géomorphologie, les sols, l'utilisation des terres, les ravins et la conservation de l'eau et du sol ;

- quatre années de mesures de la précipitation, des processus d'érosion (ravinement, *creep*, éboulements rocheux, mouvements de cailloux dus au piétinement par le bétail) et des mouvements des pierres dans le sol ;

- des expérimentations sur l'érosion aréolaire au moyen de parcelles expérimentales, ainsi que sur l'érosion par le labour ;

- une immersion dans la société rurale de la région d'étude, ce qui a facilité l'application de différentes techniques d'enquête ;

- des mesures sur le terrain de la taille des gouttes de pluie, de la couverture du sol par la végétation et les cailloux, de la récolte et des estimations de la biodiversité.

Les résultats obtenus ont été complétés par des analyses de laboratoire, telles que l'interprétation de photos aériennes, des méthodes de datation (^{14}C et U/Th), des comptages de phytolithes et de pollens, l'analyse des caractéristiques des sols et des mesures de la résistance au cisaillement.

Processus d'érosion des sols

Dans la région d'étude, l'érosion accélérée est mise en évidence par l'importance des dépôts colluviaux piégés et stockés dans les forêts résiduelles, dans les pentes mises en défens récemment, et sur les replats [17]. Les pentes fortes, l'énergie cinétique des pluies [21] et les pratiques agricoles, spécialement les labours [22], ont conduit à la perte en sols, au développement d'un couvert caillouteux [23] et au dépôt de sédiments. Le taux moyen de l'érosion aréolaire actuelle sur les terres arables est estimé à $9,9 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ [11]. Ce taux relativement bas est probablement dû au couvert caillouteux et à l'implémentation généralisée de mesures de conservation de l'eau et du sol (murets en pierres sèches et rideaux traditionnels – figure 4) [24, 25].

D'autre part, la perte en sol par érosion aréolaire est relativement élevée sur les terres pâturées ($13,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), phénomène également dû au fait que celles-ci sont souvent situées sur des pentes relativement fortes. Dans les zones mises en défens, la densité de la végétation herbeuse entraîne une fixation rapide des sédiments érodés en amont (1 mm à 1 cm.an^{-1}). L'extension actuelle de ces zones mises en défens (11 % du bassin-versant étudié) génère d'importants tampons antiérosifs dans le paysage [17].



Figure 4. La plupart des terres arables des hauts plateaux du Tigré ont été traitées par des techniques de conservation de l'eau et du sol (cordons pierreux) (photo J. Deckers).

Nombre de ravins se sont développés ces 50 dernières années [26] par suite de la pression accrue sur la terre. L'érosion ravissante compte pour un taux moyen de perte en sols de $4,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ [11]. Les différents changements d'affectation du sol et de la couverture végétale, analysée par comparaison de photos aériennes [21], l'enlèvement de la végétation ligneuse en-

tre les champs, la diminution de la superficie couverte par la végétation dense, les conversions de terres arables en terres surpâturées, l'expansion des affleurements rocheux, tout cela donne lieu à une réponse plus importante du ruissellement aux précipitations (figure 5). De tels changements ont été progressifs, mais leur effet a été renforcé à partir de 1977 par une

décennie sèche, se traduisant par des coefficients de ruissellement plus élevés [27, 28] (figure 5, section plus raide dans le diagramme du bas). Notons cependant que déjà, avant cette période critique, l'environnement avait été fragilisé par l'intervention humaine, de sorte que l'impact de tels changements ou plutôt des fluctuations environnementales, a été magnifié.

Là où elles existent, les routes contribuent également de façon significative à l'érosion ravissante, avec un accroissement du taux moyen de perte en sols de $7,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ [30]. La construction de routes, qui ont en Éthiopie souvent des espacements très grands entre les ponts, entraîne des changements environnementaux très rapides qui induisent un élargissement du bassin-versant et une diminution du seuil topographique pour le ravinement. Cela mène à de plus grandes décharges de crues et à une concentration plus rapide du ruissellement. Des changements environnementaux aussi rapides induisent la formation de ravins qui se stabilisent au bout de quelques années [31-33], – phénomène généralement attribué à une diminution de l'aire du bassin-versant et

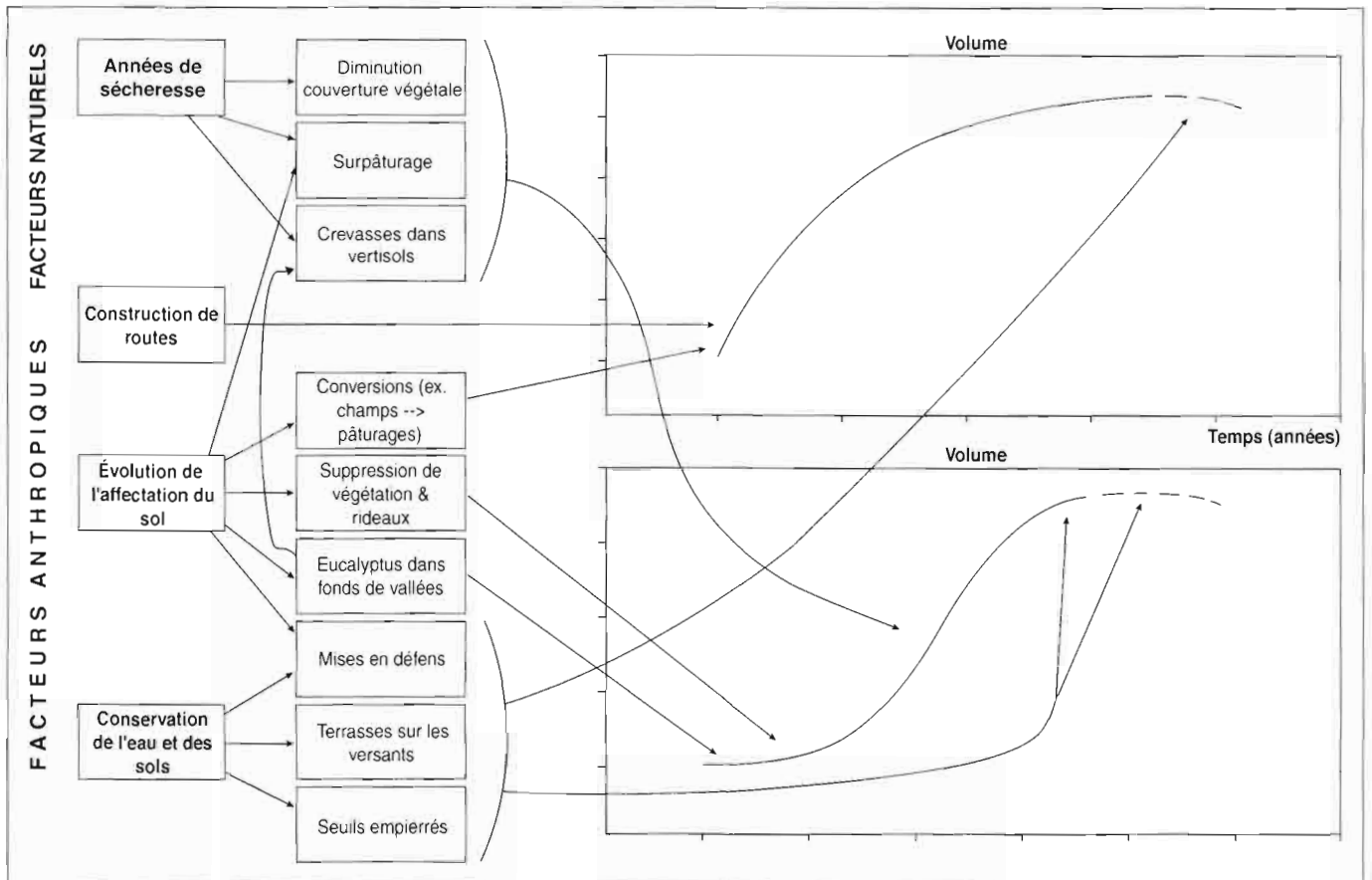


Figure 5. Évolution du volume des ravins sur les haut plateaux du Tigré et facteurs contrôlants.

Les diagrammes sont fondés à partir des mesures de terrain [4, 12, 17]. Le diagramme du haut représente l'évolution « normale » des ravins, y compris après la construction d'une route ; le diagramme du bas concerne les ravins majeurs et tient compte de l'effet de la décennie sèche des années 1980 [17].

donc une diminution des décharges, au fur et à mesure que la tête de ravin régresse [33] (figure 5, diagramme du haut).

Les Vertisols, même s'ils sont localisés dans des terrains relativement plats, sont les sols les plus sensibles à l'érosion ravinante (figure 3). Des « têtes aveugles » de plusieurs décimètres de haut, telles des marches multilobées tournées vers l'aval, originellement sans présence de ravin, s'y développent. L'effondrement des polygones dans les Vertisols, suite à l'érosion sous la surface (piping), pourrait expliquer ce développement. Ensuite, ces têtes aveugles se transforment en têtes de ravin [34]. La plantation d'*Eucalyptus* dans les vertisols de vallées aboutit à un assèchement extrême, avec le développement de fissures profondes dans le sol, situation idéale pour le développement de tunnels et de ravins [11, 26].

Conservation de l'eau et des sols

Les efforts accrus pour la conservation de l'eau et du sol à l'échelle du bassin-versant sont une explication majeure de la réduction observée du taux d'érosion ravinante. La mise en défens de pâturages dégradés écrête la réponse du ruissellement, surtout si les terres mises en défens occupent une large partie du bassin [11]. Comme on l'observe également au Wollo, dans le nord de la région Amhara [35], les habitants perçoivent de plus en plus que les mises en défens donnent également des avantages à court terme (production de foin) [3]. La continuation de cette politique de mises en défens aura d'importants effets en aval, par la diminution des crues et de l'érosion ravinante.

La technique des seuils (*check dams*) pour le contrôle des ravins (figure 6) mène à une aggradation du ravin, à condition toutefois que ces structures soient implantées à des intervalles qui tiennent compte de la pente et de l'étendue du bassin-versant [36] et qu'elles soient entretenues régulièrement [26]. Dans les ravins qui traversent les zones mises en défens, on constate également un développement rapide de la végétation, ce qui cause le dépôt de sédiments. Là où le bétail n'entre pas dans les ravins, un processus de recouvrement semi-naturel par le développement de la végétation est souvent observé [11].

La technique la plus largement appliquée (figure 4) est la construction de murets en pierres sèches dans les champs, en complément des *daget*, les rideaux traditionnels [25]. Des recherches récentes dans des champs traités par cordons de pierres (*stone bunds*) démontrent non seulement



Figure 6. Un ravin contrôlé efficacement, 10 minutes après une averse intense en juillet 2000. L'eau stagnante entre les check dams absorbe l'énergie de la chute et protège la base du barrage (photo M. Veyret-Picot).

que ceux-ci diminuent la perte en sols de 66 % en moyenne et augmentent l'infiltration, mais également que leurs effets secondaires sont moins importants que ce que l'on pouvait craindre [11, 37, 38]. Du fait que les sols sont en général soit des sols jeunes, soit des Vertisols, nous avons mesuré que le risque de formation de gradients de fertilité est faible et que les dommages causés par des cordons de pierres effondrés ou par l'accumulation excessive de sédiments sont très localisés et, d'après les agriculteurs locaux, aucunement comparables aux dégâts causés par l'érosion qui avait lieu avant leur construction [38].

Conclusion

Le bilan des sédiments d'un bassin-versant de 199 hectares montre que 67 % de la perte totale en sols est due à l'érosion aréolaire et 33 % à l'érosion ravinante. La fraction de la perte en sol qui quitte effectivement le bassin est estimée à 41 % (figure 7).

Notre recherche [11] a démontré que, si les glissements de terrain et les effondrements rocheux sont avant tout causés par

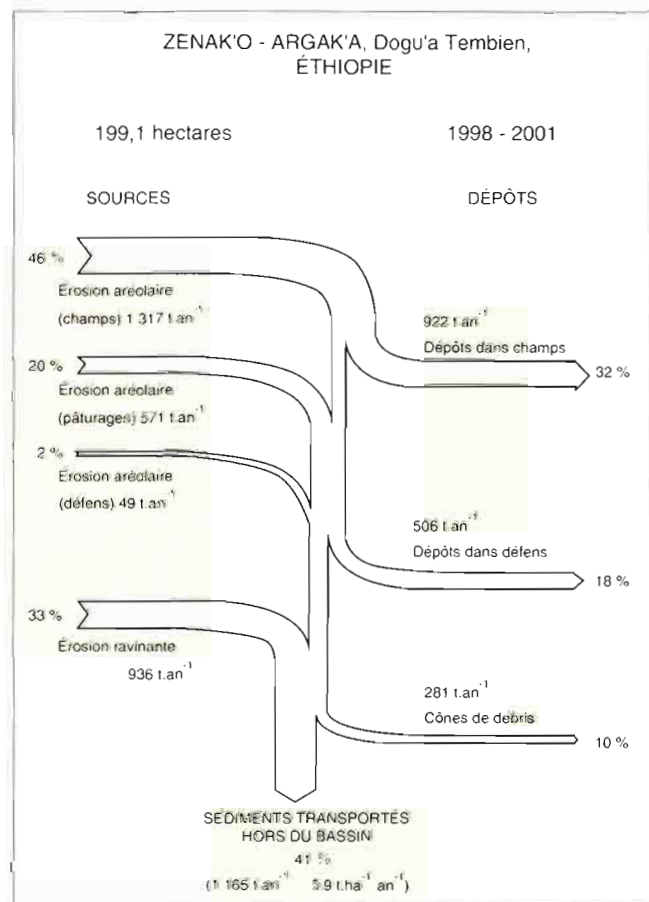


Figure 7. Budget des sédiments dans le bassin-versant étudié.

Tableau 1. Principaux processus d'érosion des sols au Dogu'a Tembien, en impact relatif des facteurs naturels (noir) et anthropiques (blanc).

Processus	Facteurs naturels ^a	Facteurs anthropiques
Glissement de terrains importants [14]	<ul style="list-style-type: none"> – Pentés abruptes – Infiltration – Événements extrêmes 	
Effondrements rocheux [11, 23]	<ul style="list-style-type: none"> – Présence des falaises 	
Réactivation de mouvements de masse – solifluction (<i>creep</i>) [14]	<ul style="list-style-type: none"> – Pentés abruptes – Colluvions argileuses 	<ul style="list-style-type: none"> – Mises en défens – Déblais (ravins, routes)
Érosion ravinante [11, 26, 30, 34]	<ul style="list-style-type: none"> – Épisodes secs – Vertisols dans le fond des vallées 	<ul style="list-style-type: none"> – Déforestation – Défrichage – Construction de routes – Plantation d'<i>Eucalyptus</i> dans le fond des vallées
Érosion en nappe et en rigoles [11]	<ul style="list-style-type: none"> – Pentés abruptes – Érosivité pluviale 	<ul style="list-style-type: none"> – Déforestation – Défrichage de la végétation résiduelle
Érosion due au piétinement par le bétail [11, 23]	<ul style="list-style-type: none"> – Pentés abruptes 	Pâturage
Érosion aratoire [22]		Pratiques culturales

^a La gravité est un facteur naturel, présent dans tous les processus.

des facteurs naturels [14], la plupart des autres processus d'érosion sont induits par des facteurs anthropiques tels que la déforestation, les labours et le défrichage de la végétation résiduelle (tableau 1). Les changements environnementaux et particulièrement les changements dans l'affectation du sol ont conduit à un développement rapide de ravins au XX^e siècle, processus qui a été renforcé par la sécheresse des années 1980. Ces dernières

années, une stabilisation des ravins a été observée en de nombreux endroits, phénomène qui pourrait être précurseur du processus de recouvrement induit principalement par la conservation de l'eau et du sol à l'échelle du bassin-versant durant ces 15 dernières années (cordons de pierres, mises en défens). L'intervention dans les ravins mêmes (construction de *check dams*, protection contre le bétail) contribue à cette évolution positive. ☀

Glossaire

Terres mises en défens : terres sous gestion de conservation stricte, contrôlée par la communauté. Ni pâtures, ni aucune autre activité agricole ne sont autorisées. Mis à part une seule fenaison par an, effectuée par la communauté, il n'y a pas d'interférence humaine avec la végétation.

Terres pâturées : zones dont la fonction principale est d'être pâturée, par le bétail pendant au moins une partie de l'année. Toutes les terres pâturées dans la région d'étude sont la propriété des communautés villageoises et, pour la plupart de ces zones, des règles existent concernant les droits de pâturage (période, type de bétail, etc.).

Bilan des sédiments : compte détaillé des sources et dépôts de sédiments, le long du trajet, du point d'origine à la source éventuelle du bassin-versant.

Érosion par le labour : les labours induisent d'importants mouvements de sol vers l'aval sur toute l'épaisseur de l'horizon labouré. Les structures de conservation de l'eau et des sols ne constituent pas seulement une barrière partielle pour l'érosion par le ruissellement mais forment également une barrière totale à l'érosion par le labour. Il y a colluviation dans la partie basse du champ et les profils sont tronqués dans la partie haute. En moyenne, l'érosion par le labour produit environ 50 % des sédiments déposés derrière les cordons de pierres nouvellement construits [7].

Remerciements

Cette étude a été financée par le programme G006598N du Fonds national pour la recherche scientifique, Flandres, Belgique ainsi que par le Conseil Interuniversitaire Flamand (VLIR-EI 2001PR237, Belgique). Nous remercions M. Berhanu Gebremedhin Abay pour l'assistance lors des travaux de terrain. De nombreux agriculteurs ainsi que les autorités des villages et du district concernés ont grandement facilité cette recherche.

Références

1. Becker A, Bugmann H. *Global change and mountain regions – the Mountain Research Initiative*. Stockholm : IGBP, 2001 ; 86 p.
2. Noudts J. *Land use in Dogua Tembien, Tigray, Ethiopia*. Thèse d'ingénieur agronome, Department of Land Management, KULeuven (Belgique), 2001, 173 p.
3. Naudts J. *Les Hautes Terres de Tembien, Tigré, Éthiopie. Dislocation et persistance d'une ancienne civilisation agraire. Conséquences sur la dégradation des terres*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'agronomie tropicale. Montpellier : Cnearc, 2002 ; 147 p.
4. Bellrondo G., Camberlin P. Les sécheresses en Éthiopie et dans l'Est de l'Afrique. *Sécheresse* 1995 ; 6 : 87-94.
5. Yilma Seleshi, Demarée G. Rainfall variability in the Ethiopian and Eritrean highlands and its links with the Southern Oscillation Index. *J Biogeogr* 1995 ; 22 : 945-52.
6. Conway D. Some aspects of climate variability in the North East Ethiopian Highlands – Wollo and Tigray. *Sinet : Ethiop J Sci* 2000 ; 23 : 139-61.
7. Oldeman L, Hakkeling R, Sombroek W. *World map of the status of human-induced soil degradation : An explanatory note*. Wageningen (Pays-Bas) ; Nairobi (Kenya) : ISRIC ; UNEP, 1991 ; 34 p.
8. Hurni H. Degradation and conservation of soil resources in the Ethiopian Highlands. *Mountain Research and Development* 1990 ; 8 : 123-30.
9. Food and Agriculture Organization (FAO). *FAO Statistical Databases 2001*. <http://apps.fao.org/>
10. Chossudovsky M. Sowing the seeds of famine in Ethiopia. *The Ecologist* September 2000.
11. Nyssen J. *Erosion processes and soil conservation in a tropical mountain catchment under threat of anthropogenic desertification – a case study from Northern Ethiopia*. Thèse de doctorat, KULeuven (Belgique), 2001, 380 p.
12. Wisborg P, Shylendra HS, Kindaya Gebrehiwot, et al. *Rehabilitation of CPRs through re-crafting of village institutions : A comparative study from Ethiopia and India*. Paper presented at the eighth biennial conference of the International Association for the Study of Common Property (IASCP), Bloomington, Indiana, May 31 – June 4, 2000, 26 p.
13. Nyssen J. *Approche de l'érosion des sols sur les Hauts Plateaux du Tigré (Éthiopie). Exemple en Dega Tembien*. Thèse de licence, Institut de Géographie, Université de Liège, 1995, 322 p.

14. Nyssen J, Moeyersons J, Poesen J, Deckers J, Mitiku Haile. The environmental significance of the remobilisation of ancient mass movements in the Albara-Tekeze headwaters. Northern Ethiopia. *Geomorphology* 2002 ; 49 : 303-22.
15. Nyssen J, Moeyersons J, Poesen J, Deckers J, Mitiku Haile, Lang A. *The environmental significance of the end of tufa dam build-up during the early to middle Holocene in Northern Ethiopia*. Paper presented at the IAG International Symposium on Climate Changes, Active Tectanics and Related Geomorphic Effects in High Mountain Belts and Plateaux, Addis Ababa, December 9-10, 2002 : 29 p.
16. Ford T, Pedley HM. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Science Reviews* 1996 ; 41 : 117-75.
17. Descheemacker K, Naudts J, Nyssen J, et al. Accumulation of Sediment and Transported Organic Carbon in Enclosures : A Case Study from the northern Ethiopian Highlands. *Land Degradation and Development* 2004 (submitted).
18. Food and Agriculture Organization (FAO). *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Reports 84. Rome : FAO, 1998 ; 91 p.
19. De Geyndt K. *Bodemkartering ten behoeve van bodemconserveringsonderzoek in Hagere Selam, Ethiopië*. Thèse d'Ingénieur Agronome, Department of Land Management, K.U.Leuven, Belgique, 2001, 142 p.
20. Nyssen J, Mitiku Haile, Poesen J, Deckers J, Moeyersons J. Les effets du ramassage des pierres sur la perte du sol et les récoltes en Dogua Tembien, Tigré, Ethiopie. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 19 : 427-40.
21. Nyssen J, Poesen J, Vandenreyken H, et al. *Spatial variability of rain and its erosivity in a tropical mountain catchment, Tigray, Northern Ethiopia*. Proc. 2nd International Conference on Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology, Brussels, Belgium, 12-14 Dec. 2001 (sans presse).
22. Nyssen J, Poesen J, Mitiku Haile, Moeyersons J, Deckers J. Tillage erosion on slopes with soil conservation structures in the Ethiopian highlands. *Soil, Tillage Research* 2000 ; 57 : 115-27.
23. Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, Lavrysen E, Mitiku Haile, Deckers J. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by lateral and vertical displacement processes. *Geomorphology* 2002 ; 43 : 1-16.
24. Herweg K, Ludi E. The performance of selected soil and water conservation measures – case studies from Ethiopia and Eritrea. *Catena* 1999 ; 36 : 99-114.
25. Nyssen J, Mitiku Haile, Moeyersons J, Poesen J, Deckers J. Les doget : une technique traditionnelle de conservation des sols et de l'eau au Tigré (Nord de l'Éthiopie) et son intégration avec la technologie introduite. In : Bart F, Morin S, Salomon J.-N, eds. *Les montagnes tropicales – identités, mutations, développement*. *Espaces tropicaux* 2001 ; 16 : 301-13.
26. Veyret-Picot M, Poesen J, Nyssen J, Moeyersans J, Ravijnontwikkeling en – erosiecontrolemaatregelen in een tropisch berggrivierbekken, Tigray, Ethiopie. *De Aardrijkskunde* 2001 ; 25 : 59-71.
27. Valentin C. Soil erosion under global change. In : Walker B, Steffen W, eds. *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series 2. Cambridge : Cambridge University Press, 1996 : 317-38.
28. Casenave A, Valentin C. A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa. *J Hydrol* 1992 ; 130 : 231-49.
29. Veyret-Picot M, Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, Mitiku Haile, Deckers J. *Gully Evolution in a Tropical Mountain Catchment, Tigray, Ethiopia*. Paper presented at the International Symposium on Land Use, Erosion, Carbon Sequestration, Montpellier, 23-28 september 2002, Book of abstracts : 55.
30. Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Impact of road building on gully erosion risk : a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 2002 ; 27 : 1267-83.
31. Graf W. The rate law in fluvial geomorphology. *Am J Sci* 1977 ; 27 : 178-91.
32. Rutherford ID, Prosser IP, Davis J. Simple approaches to predicting rates and extent of gully development' In : Wang SSY, Langendoen EJ, Shields Jr, eds. *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, 1997 : 1125-30.
33. Nachtergaele J. *A spatial and temporal analysis of the characteristics, importance and prediction of ephemeral gully erosion*. Thèse de doctorat, Department of Geography-Geology, KULeuven, Belgique, 2001, 255 p.
34. Nyssen J, Moeyersons J, Deckers J, Mitiku Haile, Poesen J. Vertic movements and the developments of stone covers and gullies, Tigray Highlands, Ethiopia. *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 2000 ; 44 : 145-64.
35. Tenna Shiterek, Sintayehu Manaye, Berihun Abebe. *Strengthening user-rights over local resources in Wollo*. Ethiopia. IIED Drylands Programme, Issue paper no. 103, 2001, 23 p.
36. Nyssen J, Veyret-Picot M, Poesen J, et al. The effectiveness of loose rock check dams for gully control – a case study in Tigray, Northern Ethiopia. *Soil Use and Management* 2004 (submitted).
37. Desto Gebremichael. *Efficiency and sustainability of Soil and Water Conservation techniques on cropland in the Tigray Highlands (Northern Ethiopia)*. Thèse de licence, Department of Geography, K.U. Leuven, 2003, 148 p.
38. Vancampenhout K. *Consequences of the application of stone bunds in the Highlands of Northern Ethiopia*. Thèse d'ingénieur agronome, Department of Land Management, K.U. Leuven, 2003, 163 p.

Colloque international

Terre et Eau

Université Badji Mokhtar – Annaba
Annaba (Algérie) 21-23 novembre 2004

Organisé par le Département de géologie de la faculté des sciences de la terre à l'université Badji Mokhtar d'Annaba, ce colloque, qui a pour objectif de mieux connaître les capacités hydriques réelles de l'Algérie, se veut une passerelle entre plusieurs disciplines qui se côtoient mais qui, à quelques exceptions près, ne se fréquentent pas. En effet, si de prime abord, la géologie semble avoir pour objet l'étude et la description des masses rocheuses, le point de vue descriptif est tout à fait insuffisant pour comprendre la nature et les dispositions des roches et leur lien avec l'eau. Cet élément est fondamental pour la vie et la demande en eau devient de plus en plus importante, en particulier dans les pays où les conditions

climatiques sont difficiles. L'Algérie reste confrontée au double problème de quantité et de qualité de l'eau. Or, dans ce pays, le géologue et l'hydrogéologue ne travaillent pas souvent ensemble. Cette rencontre devrait leur permettre de débattre de problèmes qui les concernent tout autant.

Thèmes

Les thèmes abordés seront les suivants :

- *Salinité : causes et effets*
Hydrochimie
Hydrologie et hydrogéologie
Sols
- *Environnement*
Pollution et périmètre de protection
Valorisation des eaux usées

- *Ressources minérales et thermalisme*
Pétro-géochimie
Stratigraphie-paléontologie

Langues

Les langues de travail seront l'arabe, le français et l'anglais.

Contact :

Pr. Larbi Djabri
Département de géologie
BP 12
Annaba 23000
Algérie
Fax : (0) 38 87 65 62 / (0) 38 87 14 48
<terre.eau2004@yahoo.fr>
<eautte2004@yahoo.fr>

Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zai et demi-lunes) au Burkina Faso

Robert Zougmore¹
 Korodjouma Ouattara¹
 Abdoulaye Mando²
 Badiori Ouattara¹

¹ Institut de l'environnement
 et de recherches agricoles,
 04 BP 8645,
 Ouagadougou 04,
 Burkina Faso
 <rb_zougmore@hotmail.com>
 <korodjouma_Ouattara@hotmail.com>
 <badiori.ouattara@coraf.org>

² International Centre for Soil Fertility
 and Agricultural Development (IFDC)
 Africa Division,
 Lomé,
 Togo
 <amando@ifdc.org>

Résumé

Diverses recherches menées au Burkina Faso ont porté sur la gestion de la fertilité des sols, le contrôle du ruissellement et la conservation des sols. L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'impact des techniques de conservation des eaux et des sols utilisées ou non avec des ressources minérales et organiques de fertilisants. Les dispositifs disponibles à la station de recherche de Saria (12°16' N, 2°9' W, 300 m d'altitude) et en milieu paysan à Pougyango (12°59' N et 2°9' W) ont été mis à contribution. À Saria, les techniques de contrôle du ruissellement et de l'érosion que sont les cordons pierreux et les bandes enherbées ont été couplées à la fertilisation minérale ou organique. À Pougyango, les techniques de collecte des eaux de surface, demi-lunes et zai, ont été appliquées parallèlement à la fertilisation organique et minérale et au paillage. Les résultats ont montré que la réduction du ruissellement est de 53 % pour les cordons pierreux contre 45 % pour les bandes enherbées. La source organique de fertilisation est apparue plus efficace dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion que l'engrais azoté minéral. L'utilisation conjointe du compost et des cordons pierreux a entraîné un accroissement du rendement du grain de sorgho de 106 %, celle du compost et de la bande enherbée une hausse de rendement de 160 %. De même les demi-lunes avec apport de compost ou de fumier ont donné de meilleurs rendements par rapport à la fertilisation minérale (N seul) et au témoin sans engrais. Il est apparu que la conservation de l'eau sans addition de nutriments n'induit pas une production supplémentaire significative des cultures, particulièrement en année de bonne pluviométrie. La combinaison des techniques de conservation des eaux et des sols (CES) et de la fertilisation organique améliore les caractéristiques chimiques du sol et sa productivité.

Mots clés : Agriculture ; Érosion ; Burkina Faso.

Summary

Interaction between nutrients and water and soil conservation techniques in runoff control and soil fertility management in Burkina Faso

Many studies carried out in Burkina Faso have been focused on soil fertility management, runoff and soil erosion control. Conducted on both a research station and a farm (Saria agricultural research station and Pougyango village, respectively),



the present study aimed at assessing the interaction between soil and water conservation measures and the use of organic and mineral nutrient sources. At Saria, such runoff and erosion control techniques as stone bunds and *Andropogon gayanus* grass strips were coupled to organic or nitrogen mineral fertilisers. At Pougyango, half-moons and *zai* pits techniques were used together with organic or N-mineral fertilisers and mulching. The results showed that stone bunds reduced runoff by 53% against 45% for grass strips. The organic fertiliser source (compost, manure) appeared more efficient in runoff and erosion control than the N-mineral fertiliser counterpart. Combining compost with stone bunds or grass strips induced an increase of 180% of sorghum grain yield while the same soil conservation measures used jointly with the N fertiliser induced an increase of about 70%. Similarly, the half-moon with compost or animal manure application generated a greater sorghum yield than when used with the mineral fertiliser and in the control plot. The two studies showed that water conservation without the addition of nutrients does not bring about a significant increase in crop yield, particularly in years when rainfall distribution is good. Combining soil and water conservation techniques with organic nutrient sources improved the chemical characteristics and productivity of the soil.

Key words: Agriculture; Erosion; Burkina Faso.

La dégradation des sols est un problème majeur pour les pays du Sahel [1]. Dans cette zone, les effets combinés du faible niveau de fertilité des sols, de la mauvaise gestion d'un écosystème déjà fragile et des conditions climatiques très sévères ont conduit à un faible niveau de production primaire [2]. En Afrique subsaharienne, l'agriculture est dominée par des systèmes de culture à base de céréales, qui représentent 97 % des productions pluviales [3]. Dans cette zone, la proportion d'eau de pluie qui atteint la zone racinaire, plus que la faible pluviosité annuelle, est la principale contrainte à la production des cultures [4]. En outre, les sols sont très pauvres en éléments nutritifs, particulièrement en azote et en phosphore [5], ce qui signifie que l'insuffisance d'eau et de nutriments sont les principaux facteurs limitants de la croissance des cultures [6]. De ce fait, maximiser l'utilisation des eaux pluviales n'est que faiblement bénéfique si la déficience du sol en nutriment n'est pas simultanément corrigée [7]. De même, les apports de nutriments dans des conditions hydriques de sol non optimales ne sont pas bénéfiques.

Plusieurs études ont été menées au Burkina Faso sur divers aspects de la gestion des sols comme le contrôle du ruissellement, la disponibilité en eau, la productivité et la conservation des sols. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'interaction des pratiques de conservation de l'eau (cordons pierreux, bande enherbée d'*Andropogon gayanus*, cuvettes de *zai* et de demi-lunes) combinées ou non à une source organominérale azotée sur la production du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), le

contrôle du ruissellement et la réhabilitation des sols.

Matériel et méthode

Mesures antiérosives et gestion des nutriments

• Description du site et dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est situé dans la station de recherche agricole de Saria (12°16' N, 2°9' W, 300 m altitude) au Burkina Faso. Le climat est de type nord-soudanien [8]. La pluviosité annuelle moyenne est de 800 mm et dure six mois, de mai à octobre. La répartition des pluies est irrégulière dans le temps et dans l'espace. La température maximale varie entre 25 °C et 30 °C durant la saison des pluies et peut atteindre 45 °C en avril et mai en saison sèche. L'évapotranspiration potentielle est de 2 096 mm en années sèches et de 1 713 mm en années humides [9]. Le sol est de type ferrugineux tropical lessivé (Lixisol ferrique, [10]) avec une pente moyenne de 1,5 % et un horizon induré à 50-70 cm de profondeur.

La végétation naturelle est une savane arborée [8] avec comme principales espèces *Parkia biglobosa*, *Vitellaria paradoxa* et *Tamarindus indica*. La strate herbacée est dominée par *Pennisetum pedicellatum*, *Andropogon* sp. et *Loudetia togoensis*. L'essai a débuté en 2000 et a combiné deux mesures de conservation des eaux et des sols (CES) avec trois types de sources d'apport d'azote.

Le dispositif expérimental est un bloc Fisher randomisé avec deux répétitions et neuf traitements, comme suit :

TO : témoin, pas de mesure CES ni d'apport d'azote ;
 CP : cordon pierreux sans apport d'azote ;
 CPC : cordon pierreux + compost ;
 CPF : cordon pierreux + fumier ;
 CPU : cordon pierreux + urée ;
 BE : bande enherbée sans apport d'azote ;
 BEC : bande enherbée + compost ;
 BEF : bande enherbée + fumier ;
 BEU : bande enherbée + urée.

Chaque parcelle (100 m de long, 50 m de large) est délimitée en amont et sur les flancs par une diguette en terre de 0,6 m de hauteur. Au milieu de chaque parcelle, on a délimité une placette de 100 m de long et de 1 m de large pour collecter le ruissellement et les sédiments. Ces derniers sont recueillis dans une fosse cimentée de 6 m³. Chaque fosse est équipée d'un appareil mesurant la hauteur d'eau dans la fosse en fonction du temps et celo, à partir de la pression de l'eau et de sa température (*Water level recorder TD-diver, Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands*). L'intensité de la pluie est mesurée à l'aide d'un pluviomètre automatique. Dans chaque parcelle, 36 sous-parcelles sont délimitées et placées par paire à 99, 96, 83, 78, 70, 67, 65, 62, 50, 45, 37, 34, 32, 29, 17, 12, 4 et 1 m de la base de chaque parcelle. Les cordons pierreux et les bandes enherbées ont été installés sur les courbes de niveau aux écartements de 33 m, soit trois barrières par parcelle [11]. Les cordons pierreux sont constitués de deux rangées contiguës de pierres placées dans un sillon. La rangée en amont, constituée de grosses pierres, est stabilisée à

l'aval, par une rangée de petites pierres. Chaque bande enherbée comprend trois lignes intercalées de plants d'*Andropogon gyanus* permettant d'obtenir une barrière dense de 0,3 m de large. La variété de sorgho (Sariasso 14) de 110 jours a été semée dans toutes les parcelles à la densité de 31 250 poquets par hectare. Le fumier et le compost ont été appliqués à la dose de 50 kg. ha⁻¹ de N. L'azote minéral a été appliqué à la même dose sous forme d'engrais d'urée dosé à 46 % N. Ces doses ont été calculées à partir des données de Berger [12] qui ont montré que le fumier contient en moyenne 1 % d'azote et le compost 0,7 % d'azote. Le modèle QUEFTS [13] a été utilisé pour calculer les besoins en nutriment azoté de la culture à partir des teneurs du sol en carbone et du pH (H₂O). Toutes les parcelles ont reçu une fumure de base de 20 kg. ha⁻¹ de phosphore sous forme de Triple Super Phosphate (TSP) en vue d'éliminer la déficience en phosphore sur tous les traitements.

• Collecte et analyse des données

Les volumes d'eau ruisselée ont été mesurés pour chaque pluie ayant causé du ruissellement, en évaluant le volume d'eau recueilli par fosse. Les pertes de sédiments par érosion ont été calculées par pesée de la terre de fond à laquelle on additionne la terre de suspension dans l'eau de ruissellement. A cet effet, après homogénéisation, un prélèvement de l'eau de ruissellement est réalisé, par fosse, dans un fût de 60 litres. Après décantation, les sédiments sont séparés de l'eau, séchés puis pesés. Le poids total de sédiments fins est calculé en ramenant le poids de terre recueilli dans le fût à celui du volume total d'eau ruisselée. Le ruissellement et l'érosion ont été analysés à partir des seules 10 pluies érosives survenues durant la période de culture en 2000 et des seules 9 pluies érosives survenues en 2001.

Collecte d'eau et gestion des nutriments avec le zaï et les demi-lunes

• Dispositif expérimental

L'essai a été conduit dans le village de Pougyango (12°59' N et 2°9' W) situé à 125 km au nord-ouest de Ouagadougou. Le zipellé (terre dénudée) a une pente de 1 %. Le sol est de type ferrugineux tropical cuirassé avec une profondeur utile de 25-30 cm, due à la présence d'un horizon latéritique vers 30 cm de profondeur.

Le climat est du type sud-sahélien, avec une saison pluvieuse de juillet à octobre [8]. La moyenne annuelle de l'ETP dépasse 2 000 mm.an⁻¹ pour une pluviométrie annuelle moyenne de 600 mm.

Le dispositif expérimental est un bloc randomisé avec 4 répétitions et 11 traitements qui combinent les deux pratiques de conservation des eaux et des sols (zaï, demi-lune) avec des amendements organiques et/ou minéraux.

TO : témoin (sans technique CES ni amendement) ;

DL_{pep} : demi-lune + BP + NPK + urée ;

DL_{cp} : demi-lune + compost + BP (phosphate naturel) ;

DL_{pop} : demi-lune + paillage + (BP) ;

Z_f : zaï + fumier ;

Z_{fpop} : zaï + fumier + paillage + BP ;

DL : demi-lune sans amendement ;

DL_f : demi-lune + fumier ;

DL_{pa} : demi-lune + paillage ;

Z_{fpa} : zaï + fumier + paillage.

Les dimensions des parcelles sont de 8 x 5 m. Les demi-lunes (figure 1) ont 4 m de diamètre. L'espacement entre deux demi-lunes sur la même courbe de niveau est de 2 m et de 4 m entre deux lignes consécutives, soit une densité de 417 demi-lunes par hectare. Dans chaque demi-lune, la surface cultivée est de 6,3 m². Selon la pratique traditionnelle,

une charretée de compost ou de fumier à 30 % d'humidité en moyenne est apportée par demi-lune, soit une dose de 10,2 t.ha⁻¹. La confection du zaï consiste à creuser des cuvettes de 20-40 cm de diamètre et 10-15 cm de profondeur, destinées à recueillir l'eau de ruissellement (figure 1). La densité moyenne de zaï est de 31 750 trous (0,80 x 0,40 m) par hectare. Pour les traitements zaï, une poignée (0,3 kg) de fumier est apportée par trou, soit une dose de 6,7 t. ha⁻¹. Sur les traitements Z_{fpo} et Z_{fpop}, une couche d'environ 10 cm de paille correspondant à la dose de 5 t. ha⁻¹ recouvre les espaces entre les trous de zaï. Dans le cas des traitements DL_{po}, DL_{pop}, la paille recouvre la surface cultivable des demi-lunes. L'engrais coton NPK (14N-23P-14K-6S-1B) est apporté à la dose de 100 kg. ha⁻¹ et l'urée (46 % N) à 50 kg. ha⁻¹. Le phosphore est apporté à la dose de 20 kg. ha⁻¹ de P sous forme de burkina phosphate (BP), un phosphate naturel local broyé, dosé à 25,4 % de P₂O₅. La variété de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) IRAT 204 ayant un cycle de 90 jours a été semée sur toutes les parcelles.

• Collecte des données

Dans chaque parcelle les mesures suivantes ont été réalisées :

- détermination des caractéristiques chimiques du sol sur l'horizon 0-20 cm. Les analyses ont porté sur le pH (H₂O), pH (KCl), C, N, K, Na, Ca, Mg et la CEC. Six échantillons de sol ont été prélevés en novembre 1997. Un autre échantillonnage a été effectué en décembre 1998, après la récolte du sorgho dans les parcelles ;

- détermination des rendements en grain et pailles de sorgho après trois semaines de séchage au soleil.

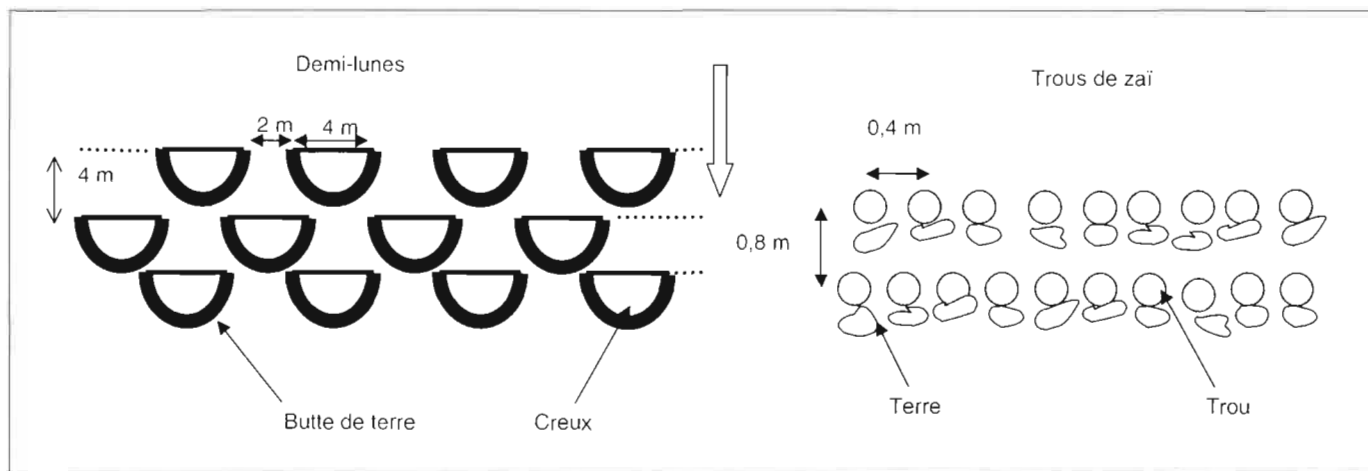


Figure 1. Diagramme de la disposition des demi-lunes et du zaï selon la pente.

Résultats

Impact des techniques de CES et de la fertilisation sur le ruissellement et l'érosion

Les cordons pierreux et les bandes enherbées, avec ou sans apport de fertilisants, réduisent le ruissellement par rapport à la parcelle témoin non aménagée (tableau I). Le taux moyen de réduction du ruissellement pour les cordons pierreux était de 53 % contre 45 % pour les bandes enherbées étroites. Cette différence entre les cordons pierreux et les bandes enherbées dans la réduction du ruissellement était faible dans les parcelles à compost (2 %) et dans les parcelles ayant reçu du fumier (5 %). Aussi bien sur les parcelles aménagées en cordons pierreux qu'avec bandes enherbées, le ruissellement a été plus faible avec apport de compost et, dans une moindre mesure, avec apport de fumier. Comparé au traitement témoin, l'apport de compost seul a réduit le ruissellement de 33 %, tandis que l'application d'azote minéral seul a réduit le ruissellement de 46 %.

Les cordons pierreux ont réduit l'érosion du sol, en moyenne de 50 % contre 35 % pour les bandes enherbées (tableau II). Les résultats ont montré que de faibles pertes en terre sont obtenues sur les traitements avec apport de fumier (CP_F, BE_F) ou de compost (CP_C).

Ainsi, durant les deux années d'étude, l'apport d'amendement organique tout comme l'apport d'engrais minéral, sont apparus efficaces dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion (tableaux I et II).

Effet des techniques de CES et de la fertilisation sur la production de sorgho

Les rendements en grains et en pailles du sorgho étaient significativement différents entre les traitements (figure 2). La production de sorgho dans les traitements avec

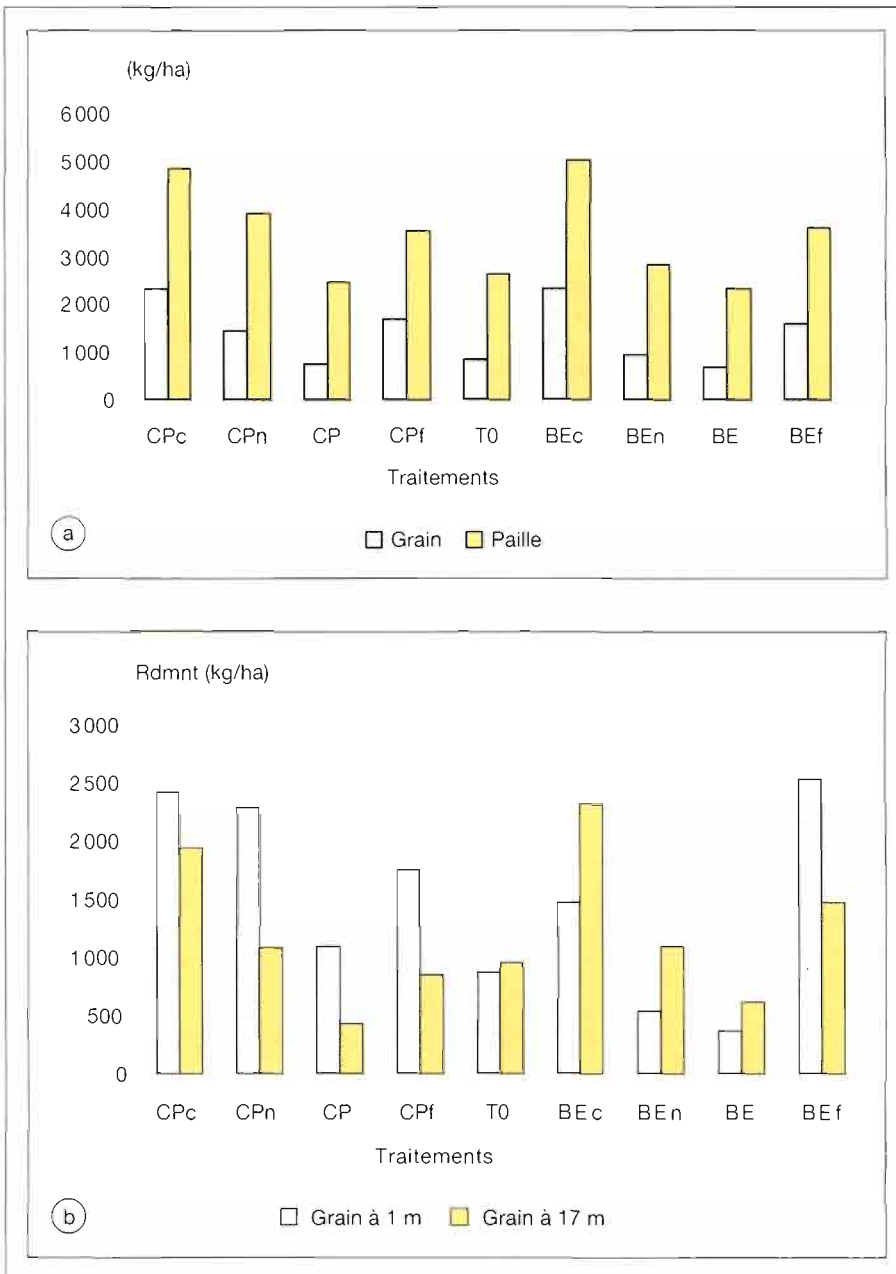


Figure 2. Effet des traitements sur la production du sorgho en 2000 ; Rendement grains et paille par traitement (a) et rendement grains en fonction de la distance par rapport à la barrière anti-érosive (b).

Tableau I. Effet des traitements sur le ruissellement et l'érosion pour 10 événements de pluie produisant le ruissellement (pluie totale 199,8 mm) pendant la saison pluvieuse 2000, Saria, Burkina Faso.

	T ₀	CP	CP _N	CP _F	CP _C	BE	BE _N	BE _F	BE _C
Cum-Ruiss (mm)	31,7	14,2	16,6	14,9	13,5	16,5	22,7	16,5	14,1
Réduction du ruissellement (%)	0	55	48	53	58	48	29	48	56
Cram (%)	15,9	7,1	8,3	7,5	6,8	8,3	11,4	8,2	7,1
Ruissellement du 24.08.2000 (mm)	8,4	3	2,8	1,7	2,5	2,7	5,9	2,2	2,2
Érosion du sol (kg. ha ⁻¹)	217	98	136	86	67	150	105	97	145
Réduction de l'érosion (%)	0	55	38	60	69	31	52	55	33

Cum-Ruiss : ruissellement cumulé ; Cram : coefficient de ruissellement annuel moyen ; T₀ : sans technique de CES ni apport de fertilisant (parcelle témoin) ; CP : cordon pierreux sans autre apport ; CP_C : cordon pierreux + compost ; CP_F : cordon pierreux + fumier ; CP_N : cordon pierreux + urée ; BE : bande enherbée, sans apport de fertilisants ; BE_C : bande enherbée + compost ; BE_F : bande enherbée + fumier ; BE_N : bande enherbée + urée.

Tableau II. Effet des traitements sur le ruissellement et l'érosion pour 9 pluies produisant le ruissellement (pluie totale 237,5 mm) pendant la saison pluvieuse 2001, Saria, Burkina Faso.

	T ₀	N	C	CP	CP _N	CP _c	BE	BE _N	BE _c
Cum-Ruiss (mm)	28,87	15,58	19,56	8,38	10,05	7,58	14,04	22,56	10,72
Réduction du ruissellement (%)	0	46	32	71	65	74	51	22	63
CRAM (%)	12,2	6,6	8,2	3,5	4,2	3,2	5,9	9,5	4,5
Ruissellement du 02.07.2001 (mm)	12,2	2,6	4,1	2,4	3,6	2,2	6,7	11,6	2,4
Érosion du sol (kg. ha ⁻¹)	236	116	113	71	52	50	99	171	108
Réduction de l'érosion (%)	—	34	35	47	52	52	39	18	36

Cum-Ruiss : ruissellement cumulé ; Cram : coefficient de ruissellement annuel moyen ; T₀ : sans technique de CES ni apport de fertilisant (parcelle témoin) ; CP : cordon pierreux sans autre apport ; CP_c : cordon pierreux + compost ; N : sans technique CES, apport d'urée ; CP_N : cordons pierreux + urée ; BE : bande enherbée, sans apport de fertilisants ; BE_c : bande enherbée + compost ; C : apport de compost, pas de technique CES ; BE_N : bande enherbée + urée.

apport de compost a été 1,3 fois supérieure à celle des parcelles avec apport de fumier, 1,6 fois supérieure à celle des parcelles ayant reçu l'urée et 3 fois supérieure à celle des parcelles témoins et des parcelles aménagées en CES sans apport de fertilisants (CP, BE). À 1 mètre en amont des cordons pierreux, les rendements en grains du sorgho ont été 45 à 60 % plus élevés que ceux obtenus à 17 m plus loin. En revanche, les rendements à 1 m de la bande enherbée ont été de 35 à 60 % plus faibles (probablement à cause de la lutte pour les nutriments et l'eau) que les rendements à 17 m de la bande. Les écarts de rendements entre les parcelles aménagées fertilisées (CP_c, BE_c, CP_N, BE_N) et les parcelles non aménagées fertilisées (C, N) ont été faibles. Cependant, l'application

seule du compost (C) ou de l'urée (N) a augmenté les rendements respectivement de 107 % et 92 % par rapport au témoin. La confection des cordons pierreux a permis d'augmenter les rendements de sorgho de 12 % tandis qu'en combinant compost et cordons pierreux, l'accroissement de rendement est de 106 %. De même, en combinant compost et bande enherbée, l'augmentation de rendement en grains a atteint 160 %.

Modification des caractéristiques chimiques du sol dans les systèmes de collecte d'eau et gestion des nutriments

Les propriétés chimiques du sol avant l'application des amendements peuvent être

considérées homogènes, l'analyse de variance n'ayant révélé aucune différence significative. En revanche, après l'application des traitements, l'analyse de variance a révélé des différences hautement significatives (tableau III). Les traitements Z_{fppp}, DL_f, Z_f, T₀ et Z_{fpa} ont des pH (H₂O) variant entre 5,0 et 5,7, tandis que les autres traitements ont le pH dans la gamme 4,5-4,8. On peut conclure que l'environnement a été très acide sur la majorité des traitements ayant reçu le fumier et extrêmement acide sur les autres. Le pH le plus acide a été observé sur le traitement ayant reçu la dose recommandée de fertilisation minérale (DL_{em}). La teneur en matière organique du sol (SOM) a été plus élevée dans les traitements avec apport de fumier que dans

Tableau III. Effet des pratiques de demi-lune et du zai sur les caractéristiques chimiques du sol.

	PH (H ₂ O)	PH (KCl)	C (g. kg ⁻¹)	SOM (%)	N (g. kg ⁻¹)	C : N	Ptot. (‰)	Ca (cmol. kg ⁻¹)	K (cmol. kg ⁻¹)	Mg (cmol. kg ⁻¹)	Na (cmol. kg ⁻¹)	CEC (cmol. kg ⁻¹)
T ₀	5,1bc	3,9b	6,4cd	1,10cd	0,51ab	12,5ab	0,64cd	1,44ab	0,12	0,22ab	0,22	0,10b
DL	4,6cd	3,8b	5,9d	1,03d	0,52ab	11,5ab	0,59d	1,54ab	0,15	0,27ab	0,40	0,13ab
DL _c	4,6cd	3,8b	5,5d	0,95d	0,54ab	10,2b	0,55d	1,51ab	0,18	0,23ab	0,29	0,13ab
DL _f	5,4ab	4,4a	8,3abc	1,44abc	0,72a	11,5ab	0,83abc	2,48a	0,48	0,73ab	0,28	0,15ab
DL _{pa}	4,7cd	3,8b	5,3d	0,91d	0,52ab	10,4b	0,53d	1,47ab	0,13	0,33ab	0,36	0,12ab
DL _{cp}	4,6cd	3,8b	6,6cd	1,13cd	0,58ab	11,2ab	0,66cd	1,77ab	0,15	0,36ab	0,51	0,13ab
DL _{pap}	4,8cd	3,8b	5,2d	0,89d	0,45b	11,4ab	0,52d	1,35b	0,17	0,17b	0,25	0,11ab
DL _{pen}	4,5d	3,7b	5,4d	0,92d	0,53ab	10,4b	0,54d	1,81ab	0,2	0,42ab	0,37	0,12ab
Z _f	5,3ab	4,3a	9,2ab	1,59ab	0,73a	12,6ab	0,92ab	2,23ab	1,09	0,73ab	0,40	0,14ab
Z _{fpa}	5,0bcd	3,9b	7,5bcd	1,29bcd	0,64ab	11,8ab	0,75bcd	1,73ab	0,74	0,53ab	0,30	0,14ab
Z _{fppp}	5,7a	4,5a	9,9a	1,70a	0,72a	13,8a	0,99a	2,54a	0,4	0,94a	0,49	0,16a
F _{prob}	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001	0,005	0,107	0,020	0,365	0,024
SED	0,152	0,126	0,762	0,131	0,065	0,829	0,076	0,330	0,331	0,220	0,266	0,014
N° Ech	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Sig 5 %	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	NS	S	NS	S
cv (%)	4,4	4,5	15,8	15,7	15,6	10,1	15,8	25,8	57,6	9,4	36,0	14,9

Les traitements avec la même lettre ne sont pas statistiquement différents à p = 0,05 ; Prob. F : probabilité de F ; signif. 5 % : signification à p < 0,05 ; NS : non significatif ; HS : hautement significatif ; SED : erreur standard des différences de moyennes ; N° ech : nombre d'échantillons ; cv (%) : coefficient de variation ; T₀ : témoin (ni trouaison ni amendement) ; DL : demi-lune sans amendement ; DL_c : demi-lune + compost ; DL_f : demi-lune + fumier ; DL_{pa} : demi-lune + paillage ; DL_{cp} : demi-lune + compost + BP ; DL_{pap} : demi-lune + paillage + BP ; DL_{pen} : demi-lune + BP + NPK + Urée ; Z_f : Zai + fumier ; Z_{fpa} : Zai + fumier + paillage ; Z_{fppp} : Zai + fumier + paillage + BP.

ceux avec apport de compost ou de paille. Les traitements zai ont des teneurs en matière organique plus élevées (1,3 à 1,7 %) que les traitements demi-lunes. La combinaison du BP et du compost semble augmenter la SOM.

La teneur en N sur l'ensemble des parcelles est en général faible, variant entre 0,7 g.kg⁻¹ et 0,5 g.kg⁻¹ avec une tendance d'amélioration par l'apport de fumier. De même, cette tendance est observée pour le P, le Ca, le Mg et la capacité d'échange cationique (CEC).

Production du sorgho avec les pratiques de zai et de demi-lune

Il existe des différences significatives de rendements de paille et de grains entre les traitements (figure 3). La production de sorgho dans le traitement témoin a échoué probablement du fait de la compacité du sol et l'absence de fertilisation. Les traitements demi-lune avec apport de compost ou de fumier ont eu des rendements grains supérieurs au rendement moyen dans la zone (800 kg.ha⁻¹). Il a été observé que l'addition de burkina phosphate donne lieu à un accroissement d'environ 63 % des rendements avec le zai et peut accroître de quatre fois les rendements avec la demi-lune. La fertilisation minérale azotée recommandée a accru le rendement grain de 500 kg.ha⁻¹, ce qui représente la moitié du rendement obtenu avec le compost seul.

Discussion

Ruissellement et érosion dans les systèmes de bandes enherbées et de cordons pierreux

Zougmoré *et al.* [14] expliquent que la plus grande efficacité des cordons pierreux dans la réduction du ruissellement, par comparaison avec les bandes enherbées, est imputable à la différence d'architecture entre les deux types de barrières. La seconde rangée de petites pierres qui soutient la première ligne de grosses pierres, ferme les petites ouvertures de l'ensemble du cordon pierreux. Bien que les bandes enherbées comprennent trois lignes régulières de plants d'*Andropogon*, la bande demeure plus perméable que les cordons pierreux. En outre, durant les premières années d'établissement, la bande enherbée n'est pas suffisamment dense. De plus, la bande enherbée doit supporter la longue et dure saison sèche, à telle enseigne que la reprise et le développement de sa biomasse ne deviennent effectifs qu'un mois après le début de la saison

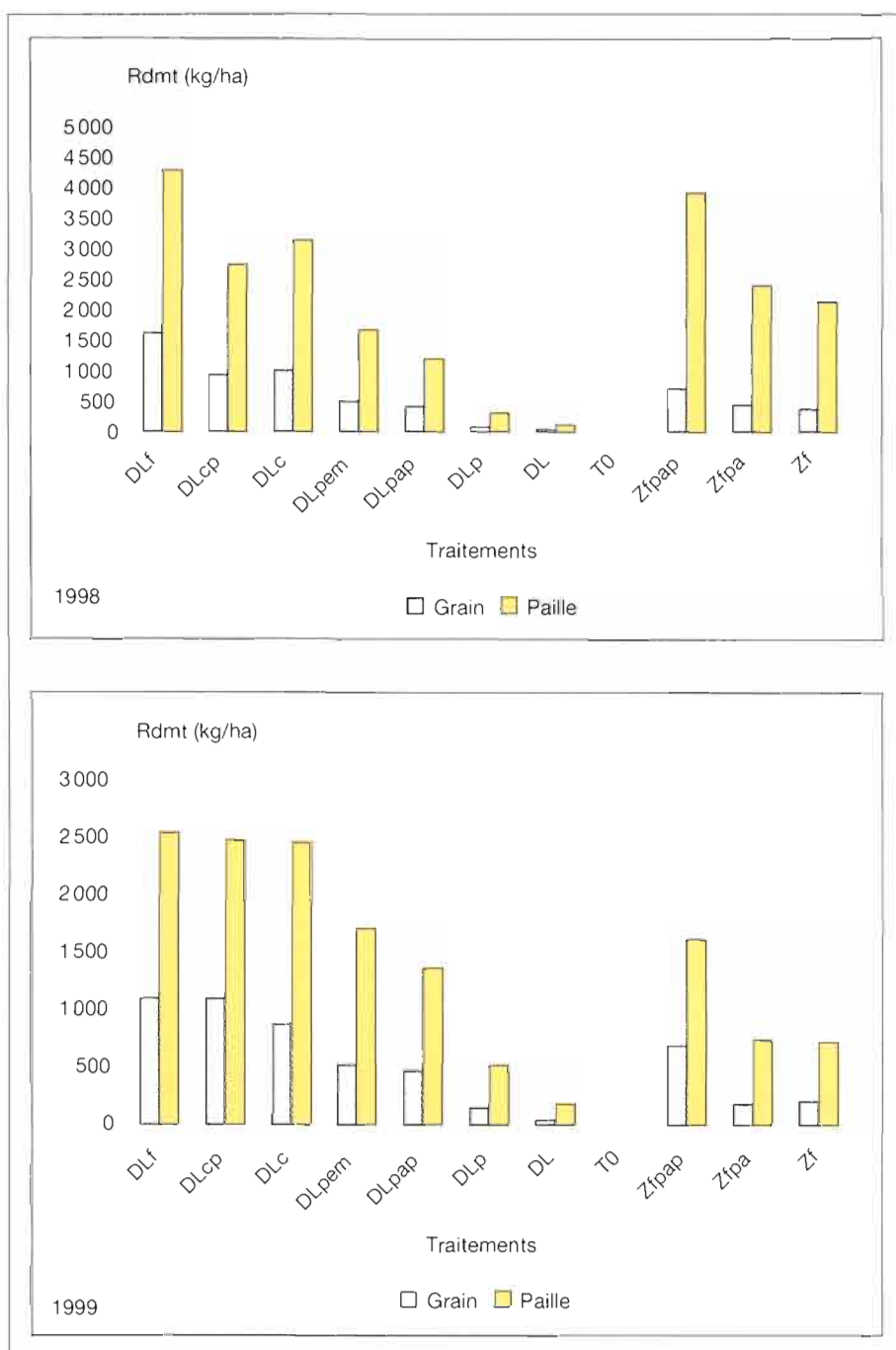


Figure 3. Effet des pratiques de la demi-lune et du zai sur la production du sorgho en 1998 et 1999.

pluvieuse. En revanche, ces deux techniques de conservation de l'eau et du sol permettent une importante réduction du ruissellement, et par conséquent augmentent l'infiltration de l'eau dans le sol. Des résultats similaires ont été observés par Lamachère et Serpentini [15] et Zougmoré *et al.* [11].

Les apports organiques améliorent la structure et la porosité du sol, ce qui favorise l'infiltration ([16, 17]). En outre, les ressources organiques augmentent la capa-

cité de rétention d'eau du sol ([18, 19]) et cela explique le retard de déclenchement que prend le ruissellement dans les parcelles avec fumure organique par rapport aux autres. Ouédraogo *et al.* [20] ont également observé dans la même région que les apports de compost induisent une meilleure structure du sol avec de nombreux pores et agrégats bien développés. Ce meilleur état structural du sol observé sur les parcelles avec fumure organique est à l'origine de l'amélioration de l'infil-

tration des eaux de pluie. On peut également supposer que la plus grande couverture du sol par la biomasse de sorgho dans les parcelles avec fumure organique a joué un rôle dans la réduction du ruissellement, particulièrement à la fin de la période végétative. En effet, le couvert végétal constitué par les plants de sorghos bien développés amortit l'énergie des gouttes de pluie [21].

L'érosion des sols est un processus à trois phases : le détachement, le transport et la sédimentation. Le transport de sédiments est intimement lié à la quantité d'eau ruisselée [21]. Eu égard à la plus grande quantité d'eau ruisselée sur les parcelles avec bandes enherbées, le transport de sédiments y a été plus important que dans les traitements avec cordons pierreux. Comme mentionné plus haut, la matière organique du sol réduit le ruissellement et donc sa capacité de charge. En outre, les amendements organiques augmentent la stabilité du sol et réduisent ainsi l'érosion du sol (tableaux I et II). Comme pour le ruissellement, la couverture du sol diminue les pertes en terre en réduisant la vitesse du ruissellement et par conséquent le déplacement de particules solides, particulièrement les plus grossières [22]. Cela est en accord avec Lal [23] et Roose [21] qui ont trouvé que la protection permanente du sol avec une couverture vivante ou morte est l'une des méthodes efficaces pour contrôler le ruissellement et l'érosion des sols.

Production du sorgho dans les systèmes de bandes végétatives et de cordons pierreux

La production du sorgho dans les traitements CP et BE (pas d'apport de nutriment azoté) n'était pas significativement différente de celle du traitement témoin. Ce résultat montre que lorsque la pluviosité annuelle est bonne avec une bonne distribution des pluies, la conservation de l'eau sans apport de nutriment n'entraîne pas une augmentation notable du rendement [14]. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de Ouédraogo *et al.* [20] qui ont observé, dans la même région et pour le même type de sol, que la plus forte production de matière sèche du sorgho était obtenue dans des parcelles avec application de compost. Utilisés comme amendements organiques, le compost et le fumier libèrent en plus des éléments nutritifs majeurs comme l'azote et le phosphore, une quantité importante d'éléments mineurs utilisables par les plantes [24]. Les mêmes auteurs ont montré que les amendements organiques augmentent la disponibilité des éléments nutritifs et l'humidité du sol. La production de sorgho a été plus faible à proximité des bandes enherbées

probablement à cause de l'effet ombrage de la bande enherbée et de la lutte pour l'eau et les nutriments. Cela n'est pas le cas du cordon pierreux.

Caractéristiques du sol dans les systèmes de zai et de demi-lune

Le sol dans les traitements avec apport de fumier (Z_{fpop} , DL_f , Z_f , Z_{fpo}) a été moins acide que dans les autres traitements. En effet, l'apport de fumier a entraîné une diminution de l'acidité du sol tandis que le paillage (DL_{pa} , DL_{pop}) et la fertilisation minérale (DL_{pem}) ont augmenté l'acidification. Plusieurs auteurs ont montré que la nature et les caractéristiques des amendements jouent un rôle critique dans l'acidité du sol [16]. Ganry et Badiane [25] ont montré qu'après l'incorporation de pailles, des problèmes liés à la libération d'acides phénoliques apparaissent. Très souvent, ces acides, provenant des substrats organiques, se dissolvent dans la solution du sol et leur forte accumulation peut entraîner une acidification du substrat [26]. Plusieurs études ont également montré que le fumier est l'amendement qui, de par sa teneur en bases, permet le maintien d'un meilleur pH du sol [16] tandis que l'incorporation des résidus (pailles) a un effet limité. La plus forte teneur en SOM (supérieure à 1,3 %) a été observée dans les quatre traitements ayant reçu l'apport de fumier. La même observation s'applique aux teneurs en N, Ca et Mg, ainsi qu'à la CEC [27]. Selon Piéri [16], l'apport de fumier est la pratique la plus efficace qui, selon les doses et la texture du sol, entretient et même améliore les réserves de SOM. Dans le type de sol sableux utilisé dans notre essai, la capacité d'échange du sol est essentiellement due à la présence de SOM [28]. Selon Delas et Molot [29], plus le sol est sableux, plus pauvre est sa teneur en humus, plus faible est sa capacité d'échange. Cela s'est vérifié dans les traitements DL_{pa} et DL_{pop} ayant reçu un apport de pailles dans notre étude.

Performance du sorgho dans les systèmes de zai et de demi-lune

Les traitements avec apport de fumier ou de compost ont obtenu les meilleures productions de pailles et de grains (rendement en grains supérieur à 1 t/ha). Le rendement de sorgho dans le traitement DL_f a été 39 fois plus élevé que le rendement obtenu dans le traitement DL sans fumier. De même, le rendement en grains du traitement DL + compost était 24 fois supérieur à celui obtenu avec le traitement DL sans aucun amendement. Cet accroissement significatif de rendement semble

lié à l'action fondamentale de la matière organique, résumée par Piéri [16] en trois rôles essentiels : i) elle stimule la formation des racines de la culture ; ii) elle est un agent majeur pour la stabilité de la structure du sol ; iii) elle a une influence directe sur la nutrition de la plante et sur les propriétés physico-chimiques du sol, due à sa minéralisation et son importance dans la dynamique de N. Malgré la dynamique de la MO et la très faible perméabilité de ce type de sols [30], l'apport d'amendements organiques bien décomposés (fumier, compost) conduit à des modifications notables du statut minéral du sol. Comme la contrainte du déficit hydrique est levée grâce au stockage d'eau dans le profil cultural, les plantes se trouvent dans des conditions pédologiques et d'humidité qui stimulent leur croissance [31]. Il en résulte une production importante de biomasse dans ces régions très sensibles aux aléas pluviométriques.

Conclusion

Les barrières semi-perméables de conservation de l'eau et des sols, combinées à l'apport de compost ou de fumier ont permis une réduction significative du ruissellement et des pertes en terre. Les cordons pierreux et les bandes enherbées ont augmenté l'humidité du sol particulièrement en amont des diguettes et ainsi, pourraient jouer un rôle majeur dans la collecte des eaux de ruissellement. Cependant, les résultats ont montré que la conservation de l'eau sans addition de nutriments ne donne pas lieu à une augmentation significative de la production de la culture, particulièrement en année où les pluies sont suffisantes et bien réparties. L'application d'amendements organiques dans les champs aménagés de cordons ou de bandes enherbées a induit un accroissement substantiel de la production en grains et en paille de sorgho. Ainsi, la conservation des sols et l'apport d'amendements devraient être combinés pour accroître la productivité du sol. Cependant, il est essentiel de procéder à une bonne gestion des bandes végétatives afin d'éliminer leurs effets d'ombrage et de concurrence (eau, nutriments) sur la croissance du sorgho situé à proximité des bandes (taille des herbes et des racines).

Les éléments nutritifs du sol jouent un rôle critique dans l'amélioration de l'efficacité de la demi-lune et du zai. Cette étude a montré que sur un zipellé dégradé, le simple fait de restaurer des conditions favorables d'humidité du sol ne suffisait pas pour améliorer la production de la culture. Les pratiques des demi-lunes et du zai peuvent être des méthodes efficaces de

restauration de la productivité des sols encroûtés lorsqu'elles sont accompagnées d'apports d'engrais organiques et minéraux nécessaires à la croissance des cultures.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet CES/AGF et l'assistance technique R.R35 financés par le Fonds international pour le développement agricole (Fida), l'Institut de l'environnement et de recherches agricoles (Inera) au Burkina Faso, l'Université de Wageningen aux Pays-Bas et la Fondation internationale pour la science (Fis, Suède) pour leurs contributions financières à la réalisation de cette étude. Ils adressent aussi leur remerciement à Éric Roose (IRD) pour les différents amendements apportés au manuscrit.

Références

1. Lal R. Agronomic impact of soil degradation. In : Lal R, Blum WH, Valentin C, Stewart BA, eds. *Methods for assessment of soil degradation*. *Adv Soil Sci* 1998 ; 459-73.
2. Mando A, Zougmore R, Zombré NP, Hien V. Réhabilitation des sols dégradés dans les zones semi-arides de l'Afrique subsaharienne. In : Floret C, Pontanier R, eds. *La jachère en Afrique tropicale ; de la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances*. Paris : John Libbey Eurotext, 2001 : 311-39.
3. Food and Agriculture Organization (FAO). *World agriculture : towards 2010. An FAO study*. Rome : Alexandratos, 1995.
4. Sivakumar MVK, Wallace JS. Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone : Need, relevance and objectives of the workshop. In : Sivakumar MVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C, eds. *Soil water balance in the Sudano-Sahelian Zone*. Proc. Int. Workshop, Niamey, Feb. 1991, Institute of Hydrology. Wallingford : IAHS Press, 1991 : 3-10.
5. Bationo A, Mokwunye AU. Role of manure and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production, with special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Fert Res* 1991 ; 29 : 117-25.
6. Stroosnijder L. Modelling the effect of grazing on infiltration, runoff and primary production in the Sahel. *Ecolog Modelling* 1996 ; 92 : 79-88.
7. Roose E. Introduction à la GCES. *Bull Fao des Sols* (Rome) 1994 ; (70) : 420 p.
8. Fontes J, Guinko S. *Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Note explicative*. Toulouse : Ministère de la coopération française, 1995 ; 53 p.
9. Somé L. *Diagnostic agropédologique du risque climatique de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs*. Thèse doctorat USTL, Montpellier, 1989, 268 p.
10. FAO-UNESCO. *Carte mondiale des sols. Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 60*. Rome : FAO, 1989 ; 125 p.
11. Zougmore R, Guillobez S, Kambou NF, Son G. Runoff and sorghum performance as affected by the spacing of stone lines in the semi-arid Sahelian zone. *Soil Till Res* 2000 ; 56 : 175-83.
12. Berger M. *L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne*. Agric Dév hors série, fiches techniques. Montpellier : Cirad éditions, 1996 ; 29 p.
13. Janssen BH, Guiking FCT, Van der Eijk D, Smaling EMA, Wolf J, Van Reuler H. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 1990 ; 46 : 299-318.
14. Zougmore R, Mando A, Ringersmo J, Stroosnijder L. Effect of combined water and nutrient management on runoff and sorghum yield in semiarid Burkina Faso. *Soil Use Management* 2003 ; 19 : 257-64.
15. Lamachère JM, Serpantié G. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Bidi, Burkina Faso. In : Kergreis A., Claude J. *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins-versants en zone aride*. Paris : John Libbey Eurotext, 1991 : 165-78.
16. Piéri C. *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération ; Cirad, 1989 ; 444 p.
17. Ouattara B, Sédogo MP, Assa A, Lompo F, Ouattara K, Fortier M. Modifications de la porosité du sol après trente-trois années de labour d'enfouissement de fumier au Burkina Faso. *Cah Agric* 1998 ; 7 : 9-14.
18. Ouattara B, Sédogo MP, Lompo F. Effets de quatre types de substrats organiques sur le système poral d'un sol ferrugineux tropical sous culture de sorgho. *Sci Techn* 1994 ; 21, 1 : 60-77.
19. Mando A. The effect of mulch on the water balance of Sahelian crusted-soils. *Soil Technol* 1997 ; 11 : 121-38.
20. Ouédraogo E, Mando A, Zombré NP. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agric Ecosyst Environ* 2001 ; 84 : 259-66.
21. Roose E. *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Collection Travaux et Documents 130. Paris : Orstom éditions, 1981 ; 567 p.
22. Zougmore R, Kambou NF, Ouattara K, Guillobez S. Sorghum-cowpea intercropping : An effective technique against runoff and soil erosion in the Sahel (Saria, Burkina Faso). *Arid Soil Res Rehabilitation* 2000 ; 14 : 329-42.
23. Lal R. *Role of mulching techniques in tropical soil and water management*. Technical Bulletin. Ibadan : IITA, 1975.
24. Velthof GL, Beuichem van ML, Raijmakers WMF, Janssen BH. Relation between availability indices and plant uptake of nitrogen and phosphorus from organic products. *Plant and soil* 1998 ; 200 : 215-26.
25. Ganry F, Badiane A. La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne. Diagnostic et perspectives. *Agric Dev* 1998 ; 18 : 73-80.
26. Mustin M. *Le compost. Gestion de la matière organique*. Paris : François Dubusc, 1987 ; 954 p.
27. Zougmore R, Kambou NF, Zida Z. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semi-arid Burkina Faso. *Soil Till Res* 2003 ; 71 : 143-9.
28. Feller C, Ganry F. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrasystème tropical. III. Effet du compostage et de l'enfouissement de divers résidus de récolte sur la répartition de la matière organique dans différents compartiments d'un sol sableux. *Agronomie Tropicale* 1982 ; 37 : 262-9.
29. Delas J, Molot C. Effet de divers amendements organiques sur les rendements du maïs et de la pomme de terre cultivés en sols sableux. *Agronomie* 1983 ; 3 : 19-26.
30. Feller C, Beare MH. Physical control of organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.
31. Piéri C. *Fertility of soils. A future for farming in the West African Savannah*. Berlin : Springer Verlag, 1992 ; 348 p.

Expériences de récupération de sols sahéliens dégradés grâce à l'incorporation de doses variables de fumier et d'un hydrorétenteur fertilisant

Jean-Marie Karimou Ambouta¹
Ibrahim Bouzou Moussa²

¹ Département Science du sol,
Faculté d'agronomie,
Université Abdou Moumouni de Niamey,
BP 10 960,
Niamey,
Niger

² Département de géographie,
Faculté des lettres et sciences humaines,
Université Abdou Moumouni de Niamey,
BP 418,
Niamey,
Niger
<i-bouzou@intnet.ne>
<depgéo@intnet.ne>

Résumé

En zone sahélienne, pour remettre en culture les zones fortement dégradées par encroûtement, de nombreuses techniques de récupération des terres dégradées, dont le simple travail du sol ou les demi-lunes de culture, ont été développées. Cependant, leurs effets restent très limités, soit en raison d'une reprise rapide de la croûte, soit du fait de l'insuffisance de fumier au niveau de l'exploitation. Un essai expérimental a été conduit à Kossa, dans l'extrême ouest du Niger, en zone sahélienne, sous 294 mm de pluie, afin de tester l'effet d'un produit de synthèse hydro-rétenteur/fertilisant (Polyter) sur, d'une part, l'amélioration de l'état de surface des sols encroûtés et, d'autre part, la production du mil dans les demi-lunes de culture. L'incorporation de Polyter au sol a réduit les taux de ruissellement et d'érosion, mais ceux-ci sont demeurés encore assez élevés du fait probablement de l'épaisseur très faible de sol concernée. Tous les paramètres de production ont été significativement influencés par le niveau de Polyter et la dose de 20 kg/ha (P3) a donné une production toujours significativement plus élevée que le témoin (P0). En l'absence de fumier, même à la dose P3, Polyter a généré des niveaux de production au plus similaires à ceux atteints suite à la simple application de fumier. En présence de fumier, Polyter a permis un accroissement des productions, mais les niveaux atteints sont demeurés relativement modestes.

Mots clés : Érosion ; Techniques culturales ; Sahel.

Summary

Restoring the fertility of degraded Sahelian soils using variable dung and hydro retaining fertilizer doses: A return on experiment

In order to restore Sahelian soils strongly degraded as a result of crusting, many land restoration techniques, among which simple plowing or catchment basins, have been developed. However, their effects remain limited owing to rapid crust resumption or because manure is not available in sufficient quantities on the farms. An experimental trial was carried out at Kossa, a village located in a Sahelian area in West Niger, under 294 mm of average rainfall, with a view to test how Polyter, a hydro retaining fertilizer-enriched polymer, could help improve crusted topsoil surfaces on the one hand, and increase millet crop yields in catchment basins, on the other hand. Addition of Polyter to crusted topsoils did reduce runoff and erosion rates, but these remained rather high probably because the topsoils concerned are far too thin. All Polyter levels used had a significant impact on the various production parameters, but Polyter P3 level (20 kg/ha) always yielded higher production levels than P0, the control level. Used without dung, even at P3 level, Polyter yielded production levels at

best similar to those obtained through simple dung application. When associated with dung, Polyter allowed the production to increase but the levels reached remained relatively modest.

Key words: Erosion; Cultural Practices; Sahel.

Ce sont les états de surfaces des sols qui conditionnent l'infiltration et le ruissellement des eaux dans les régions sahéliennes. La présence d'organisations pelliculaires superficielles et la prise en masse des horizons de profondeur suite à la dégradation des propriétés physiques des sols conduisent à une importante perte d'eau par ruissellement [1-3]. Les causes de l'encroûtement divergent selon les auteurs. Elles peuvent être d'origine anthropique [1, 2, 4], ou naturelle, suite à la battance des pluies sur des agrégats fragilisés par la faible teneur en matière organique [5, 6].

Pour lutter contre l'effet des croûtes et améliorer les propriétés hydriques de ces sols dégradés, que même la pratique de jachère ne suffit pas à régénérer en quelques années [3], de nombreuses techniques sont appliquées. Il s'agit principalement :

- de cuvettes de 10 cm de profondeur sur 30 cm de diamètre et disposées à 1 m de distance, en quinconce, creusées dans un glacis [zai au Burkina Faso, ou *tassa* au Niger] ou de cuvettes artificielles de 15 cm à 30 cm de profondeur, en forme de demi-cercle de 2 m de rayon, entourées d'un remblai de terre qui peut être recouvert de pierres (les demi-lunes) ;
- de la revégétalisation ;
- du paillage ;

- d'ouvrages érigés à la surface du sol (cordons pierreux, diguettes, murets...).

La combinaison ou non de ces techniques a permis d'obtenir de bons résultats sur de nombreux sites de récupération de terres [7-11]. Néanmoins, en plus des difficultés à disposer de suffisamment de matière organique pour garantir le succès de ces techniques, il a été observé que leur efficacité est assez vite limitée par la compacité du sol et la reconstitution de la croûte de sédimentation à l'intérieur des ouvrages [3, 12].

Dans ce contexte, l'expérimentation d'un hydrorétenteur/fertilisant disponible dans le commerce, a été entreprise en 2001 à Kossa dans le Nord Téra (Tillabéry-Niger) pour vérifier, d'une part son pouvoir de régénération de la structure du sol, et par conséquent son action sur le ruissellement et l'érosion et, d'autre part, sa capacité de stockage d'eau et les effets des quelques éléments fertilisants qu'il contient sur la production de mil. Elle avait aussi pour but de tester sur le terrain la possibilité d'utiliser le Polyter, en renfort ou comme alterna-

tive au fumier (disponible en trop petite quantité), pour une meilleure sécurisation de la production dans les ouvrages de récupération des terres dégradées en zone marginale.

Présentation de la zone d'étude

L'étude a été conduite dans le village de Kossa au nord de Téra à l'extrême ouest du Niger, dans le Liptako, à la frontière du Burkina Faso et du Mali. C'est une région de socle cristallin constitué essentiellement de granitoïdes. On distingue cinq unités morphopédologiques :

- les buttes résiduelles tabulaires ou arrondies, à sols lithiques et leurs talus raides d'éboulis ;
- les longs glacis à pente régulière faible, à sols sablo-limoneux et argilo-sableux ;
- les oueds (*koris*) à fond plat ou présentant des lits d'étiage à berges bien marquées ;
- les édifices sableux éoliens constituant les aires de culture de mil et de niébé (haricot nain).

La végétation, très dispersée, est présente sur les glacis et les édifices éoliens.

Le climat, de type sahélien, est contraignant, avec des températures élevées toute l'année, des vents réguliers et une pluviosité caractérisée par une forte variabilité spatio-temporelle. A Dolbel, village situé à environ 2 km de Kossa, la moyenne sur 30 ans (1966-1995) est de 294 mm alors qu'elle est de 397,4 mm à Téra situé environ 80 km plus au sud.

La population, composée de Songhay majoritaires, de Peuls et de Bouzou, partage ses activités entre l'agriculture et l'élevage.

Matériel et méthode

Présentation du produit

Il s'agit du Polyter, un « hydrorétenteur/fertilisant », renfermant de l'acrylate de sodium, un polymère hyper-absorbant en eau et quelques éléments fertilisants équilibrés (N, P, K) et des oligo-éléments (Bo, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn). Mélangées au sol dans la zone d'activité des racines, les particules de Polyter peuvent absorber des quantités d'eau pouvant atteindre, en laboratoire, de 160 à 500 fois leur poids sec

et constituer ainsi des réservoirs de stockage d'eau et de substances nutritives. Les particules de Polyter gonflées d'eau vont attirer les racines et constituer autour d'elles de petits nodules en association avec le système racinaire de la plante qui stimuleront sa croissance pendant plusieurs années (3 à 5 ans). L'eau et les éléments fertilisants en réserve dans les nodules de Polyter seront progressivement utilisés par la plante selon ses caractéristiques de développement habituel. La forme utilisée est le POLYTER GR qui se présente sous forme de granulés.

L'étude a consisté à mesurer :

- l'aptitude des surfaces encroûtées traitées au Polyter, et des surfaces non traitées, à générer le ruissellement et l'érosion ;
- la production de mil dans des demi-lunes traitées uniquement avec du Polyter, comparées à celles où du fumier a été apporté à la dose habituellement utilisée par les paysans.

Choix du site et conduite de l'expérimentation

Le site étudié est un glacis dégradé caractérisé par deux types de croûtes :

- la croûte d'érosion ou d'ablation (ERO), qui recouvre les surfaces de déflation éolienne ou de décapage par l'eau ; elle est constituée par une pellicule plasmique luisante et très peu perméable [1] ;
- la croûte structurale (ST), constituée de microhorizons, avec, en surface, une pellicule de sables grossiers déliés et, à la base, une pellicule d'éléments plus fins.

Ces deux états de surface ont la particularité de générer très rapidement des ruissellements à cause de leur faible capacité d'infiltration.

La végétation, très discontinue, est constituée d'épineux (*Acacia raddiana* et *Balanites aegyptiaca*) avec quelques rares touffes de *Cenchrus biflorus* sur les buttes sableuses. Le sol, de type ferrugineux tropical, peu lessivé, repose à environ 80 cm sur des graviers ferrugineux plus ou moins soudés. La texture est sablo-limoneuse, le pH neutre (6,9), le taux de matière organique très bas (0,3 %) et la fertilité chimique très faible. Il a le double inconvénient d'une productivité très faible et d'une forte susceptibilité à l'encroûtement, qui accroît le ruissellement de manière drastique et sa mise en culture doit

être précédée de travaux de récupération des terres.

Pour l'étude du ruissellement et de l'érosion, le terrain retenu est situé sur le bas d'un glacis aménagé en demi-lunes de culture. Sur chaque état de surface caractéristique (ERO et ST), deux parcelles de 1 m² délimitées par des feuilles de tôle ont été installées. Toutes les parcelles ont été scarifiées à 5 cm de profondeur, avant les pluies, de manière à détruire la croûte. Sur chacun des états de surface, une des deux parcelles, choisie au hasard, a reçu en mélange avec la terre remuée, 100 g de Polyter (soit 1 t/ha), l'autre constituant le témoin. Les parcelles traitées sont EROP et STP, avec respectivement comme témoins ERO et ST. En aval de chacune d'elles a été placé un tuyau qui canalise l'eau de ruissellement vers des fûts de 150 L de volume (figure 1). Un pluviomètre permet de mesurer la hauteur des épisodes pluvieux.

Sur les parcelles, il a été procédé :
- après chaque épisode pluvieux, à la lecture de la hauteur d'eau recueillie dans le pluviomètre et à la mesure du volume d'eau et de sédiments dans les cuves et au prélèvement d'une aliquote, pour la détermination de la charge en suspension ;

- à une prise de vue tous les 15 jours, pour le suivi de l'évolution des états de surface.

Sur le site destiné à tester la productivité agricole, les paysans ont aménagé des demi-lunes, cuvettes en forme de demi-cercle ouvert vers l'amont, disposées tous les 3 m sur les lignes de niveau espacées de 3 m ; elles sont creusées à une profondeur de 0,20 m sur 3 m de diamètre, la terre provenant de l'excavation étant mise en bourrelet à l'aval. Vingt-quatre ouvrages choisis pour leur uniformité constituent les unités expérimentales. Le plan d'expérience est un dispositif en parcelles divisées (tiroirs) entièrement aléatoire utilisant deux facteurs : fumier (F) et Polyter (P). Le facteur fumier comporte deux niveaux distribués en parcelles principales (blocs) de 12 unités expérimentales chacune : FO sans fumier et F1 avec fumier ; sur le fond de chaque ouvrage en F1, une dose de 4 kg de fumier de petits ruminants (fèces desséchées), soit 1,25 t/ha, a été déposée ; cette quantité anormalement basse par rapport à celle qui est couramment utilisée (10 à 12 kg/ha [13]) a été retenue en raison de sa conformité avec la pratique dans ce terroir. Le facteur Polyter comporte quatre

niveaux inspirés de nombreuses expériences sur les cultures (P0 = 0 g/poquet, P1 = 2 g/poquet, P2 = 3 g/poquet et P3 = 4 g/poquet, soit respectivement 0, 10, 15 et 20 kg/ha de produit) en trois répétitions, distribués de façon entièrement aléatoire à l'intérieur des parcelles principales ; Polyter est apporté dans les poquets, en même temps que les semences de mil à la première pluie utile.

À la récolte, pour chaque ouvrage, les paramètres suivants ont été déterminés puis extrapolés à un hectare : nombre de talles fertiles, poids des pailles sèches et poids des grains dans chaque ouvrage. Les différents paramètres du rendement obtenus ont été soumis à l'analyse de variance (Anova) suivie de comparaisons des moyennes à l'aide du test de la plus petite différence significative (PPDS ou LSD).

Résultats et discussion

Caractéristiques des pluies enregistrées

Vingt-cinq épisodes pluvieux ont été enregistrés dans le site en 25 jours. La hauteur

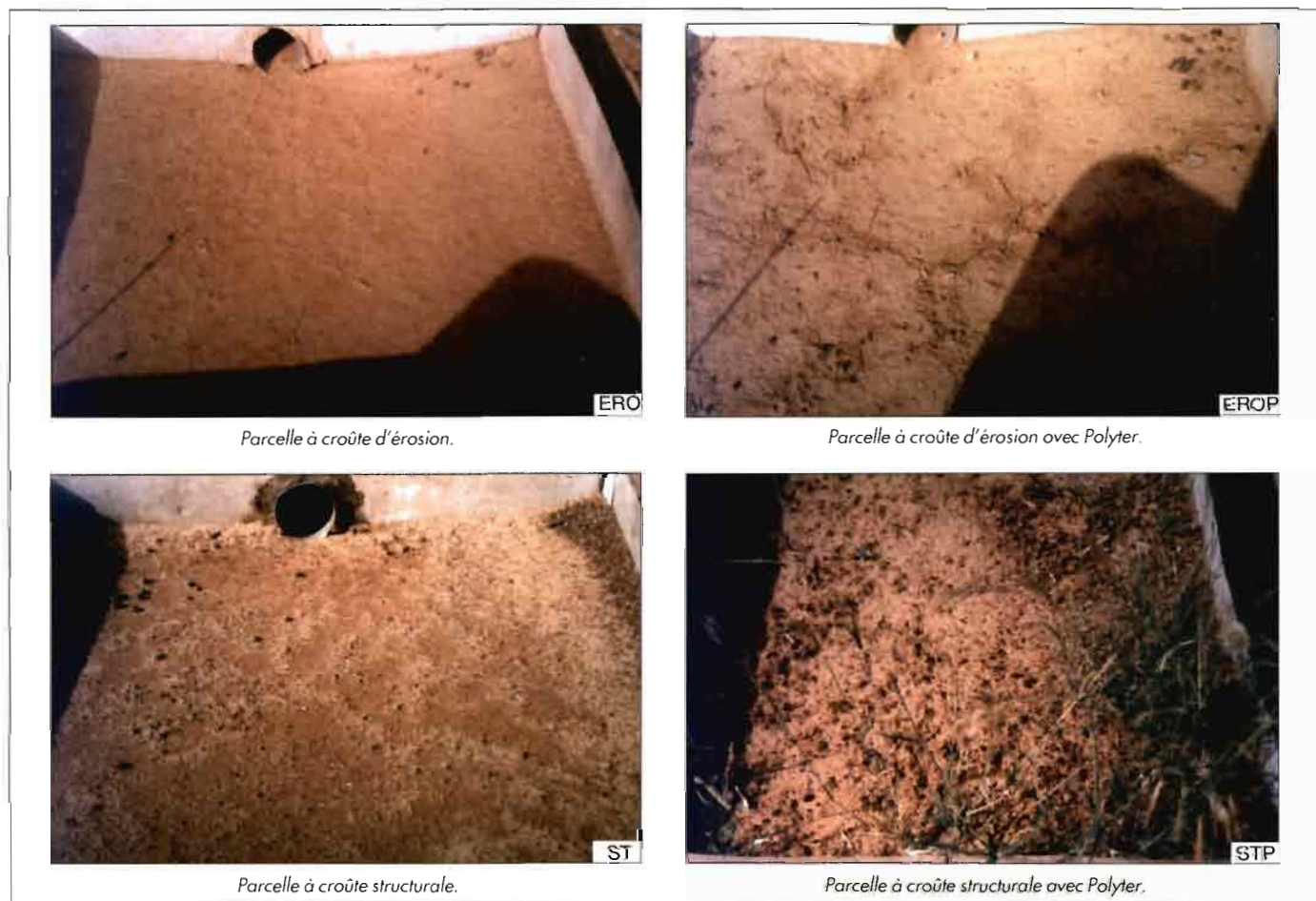


Figure 1. États de surface des sols sans (ERO et ST) et avec incorporation de Polyter (EROP et STP).

de pluie recueillie est de 350,6 mm ; elle est nettement supérieure à la moyenne sur 30 ans (1966-1995) à Dolbel, moyenne qui est de 294 mm. Sur les 25 pluies enregistrées, 17 ont ruisselé, soit une proportion de 68 %. Huit pluies supérieures ou égales à 20 mm ont été enregistrées, dont la plus élevée (52 mm) est tombée en août. Les mois de juin et septembre ont été très secs (juin : 23,5 mm en 3 jours ; septembre : 44 mm également en 3 jours), périodes correspondant aux phases d'installation et d'épiaison/floraison considérées comme parmi les plus critiques pour le mil. La première pluie a été enregistrée le 9 juin ; entre cette pluie et la deuxième (17 juin), il y a eu un intervalle de 8 jours ; la dernière pluie de juin est tombée le 19. Les trois pluies de septembre sont tombées le 2 (deux pluies) et le 19, soit 18 jours après ; à cette rareté des pluies en fin de cycle cultural ont été associés des passages de vents desséchants. En revanche, au cours des mois de juillet et août, les pluies ont été régulières (juillet : 135,4 mm en 9 jours ; août : 147,7 mm en 10 jours) avec, en moyenne, une pluie tous les trois jours.

Effets du Polyter sur les états de surface du sol

Sur les parcelles non traitées, les croûtes ERO et ST se sont reconstituées dès les premières pluies : la parcelle ERO a présenté une surface lisse, dure et compacte, striée de fines fentes de dessiccation très rapprochées, tandis que ST était recouverte d'un voile sableux clair. Ces parcelles sont restées totalement nues, et même le liseré sableux piégé par la tôle de bordure ne portait aucune végétation (figure 1, ERO et ST). Ainsi, le seul travail du sol n'a pas contribué à améliorer significativement les caractéristiques des états de surface étudiés [10].

Au contraire, sur les parcelles EROP et STP, traitées avec le Polyter, la surface était

criblée de petites crevasses de 2 mm à 4 cm de diamètre, créées par les alternances de gonflement et rétraction, et à l'intérieur desquelles les nodules de Polyter formaient des boursouffures. Sur EROP, de petites plages portant des croûtes de décantation formaient des auréoles autour de ces crevasses. Cet accroissement de la rugosité de surface avait augmenté la rétention de surface après la pluie et l'ensemble de la couche travaillée développait une très faible cohésion et présentait un aspect grumeleux. Ces améliorations de la structure de la couche de surface suite à l'incorporation de Polyter pourraient être à l'origine de la tendance constatée à la reprise de la végétation herbacée naturelle (figure 1, EROP et STP).

Effets du Polyter sur le ruissellement et l'érosion

Les résultats des mesures des taux de ruissellement et d'érosion sont présentés dans le tableau I. Les traitements ont eu une influence favorable sur tous les paramètres du ruissellement. Le nombre de pluies ayant ruisselé a baissé de plus de 30 % sur toutes les parcelles traitées et le coefficient de ruissellement annuel moyen a

diminué de 35 % pour EROP et de 55 % pour STP. La faible performance relative du Polyter sur le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) dans le cas de EROP serait probablement liée au développement dans les dépressions de EROP de croûtes de décantation à perméabilité réduite [1], contrairement à STP qui en est dépourvue.

Concernant l'érosion, toutes les parcelles traitées ont enregistré des baisses considérables dans les quantités de terre perdue, soit 66 % et 53 % respectivement pour EROP et STP par rapport à ERO et ST.

Bien que l'application de Polyter ait influencé favorablement le ruissellement et l'érosion à travers l'amélioration des états de surface, il est évident que les taux de ruissellement et d'érosion restent néanmoins encore très élevés. Pour expliquer ces résultats, on peut objecter que la petite taille des parcelles risque d'accroître le ruissellement et l'érosion [7, 14]. Mais l'influence du traitement, limitée aux seuls premiers centimètres du sol, en serait la cause principale, à la différence du paillage sur sols encroûtés où l'action induite par les termites intéresse le profil sur de grandes profondeurs [10, 15-17].

Tableau I. Effets de l'incorporation de Polyter au sol, sur le ruissellement et l'érosion à Kossa (Téra, Niger) en 2001.

Traitement	Ruissellement		Érosion (kg/m ²)
	KR (%)	KRAM (%)	
ERO	97 n = 16	79	6,8
EROP	82 n = 11	51	2,3
ST	87 n = 13	60	3,8
STP	59 n = 9	27	1,8

KR (%) = coefficient de ruissellement maximum ; KRAM (%) = coefficient de ruissellement annuel moyen ; n = nombre de pluies ayant ruisselé.

Tableau II. Résultats d'analyse de variance des paramètres de production du mil.

Source de variation	Degré de liberté	Nombre de tiges fertiles			Rendement en pailles			Rendement en grains		
		Carré moyen	Test F	Probabilité	Carré moyen	Test F	Probabilité	Carré moyen	Test F	Probabilité
Fumier	1	372 299 000	77,291	0,0000 ***	4 405 023	24,746	0,0001 ***	162 016	69,026	0,0000 ***
Polyter	3	18 510 700	3,842	0,0301 *	503 786	2,830	0,715 NS	21 621	9,211	0,0008 ***
Fumier x Polyter	3	4 664 413	0,968	0,4318 NS	221 334	1,243	0,326 NS	3 769	1,605	0,2273 NS
Résiduelle	16	4 816 809	-	-	178 003	-	-	2 347	-	-
Total	23	216 220 500	-	-	392 851	-	-	11 489	-	-

*** = très hautement significatif ; * = significatif ; NS = non significatif au seuil de probabilité de 5 %.

Effets du Polyter sur la production de mil

Les résultats de l'analyse de variance et de la comparaison des moyennes des différents paramètres de production étudiés sont présentés respectivement dans les tableaux II et III.

- Nombre de talles fertiles

Le fumier, bien plus que les doses de Polyter, exerce un effet très significatif sur la production de talles fertiles, mais l'interaction entre les facteurs fumier et Polyter, n'est point significative (tableau II). La comparaison des moyennes de talles fertiles par dose de Polyter (tableau III) montre que seule la dose P3 a engendré une production significativement plus élevée, P1 et P2 ne différant pas statistiquement de P0. Ainsi donc, tous niveaux de fumier confondus, Polyter à la dose P3 stimulerait la production de talles fertiles. Lorsque l'on compare les moyennes de talles fertiles produites par chaque dose de Polyter, il apparaît que c'est en l'absence de fumier (F0) que la dose P3 stimule significativement la production de talles fertiles ($p < 0,027$) : la production passe alors de 13 459 à 18 989 talles fertiles, soit un accroissement de 41 %. Il faut néanmoins noter que, même dans ce cas, le niveau de performance demeure nettement plus bas que celui atteint avec le fumier simple (figure 2), d'où la prééminence du facteur fumier pour la production de talles fertiles. Quand Polyter est associé au fumier, l'accroissement de production généré reste très modeste puisqu'il est d'environ 11 %.

- Rendement en pailles

Concernant ce paramètre, l'analyse de variance a montré une différence très hautement significative pour l'effet du fumier, mais non significative pour Polyter et pour l'interaction de ces deux facteurs (tableau II). Cependant, la comparaison des moyennes des rendements selon les doses de Polyter pour tous niveaux confondus de fumier montre que la dose P3 a donné un rendement significativement plus élevé que P0 et P1, P2 ne différant pas statistiquement de P3 (tableau III). La comparaison des moyennes des rendements par dose de Polyter selon les niveaux du facteur fumier, confirme cette performance de P3 sur le rendement en pailles (figure 3) mais seulement lorsque le fumier est présent (F1).

Ainsi, à dose élevée, Polyter renforcerait l'effet favorable du fumier en générant un accroissement du rendement en pailles de 954 kg, soit environ 31 %. Un tel résultat pourrait être lié à la stimulation de la minéralisation des fèces, provoquée par de meilleures conditions hydriques dues à l'action de Polyter, entraînant une

Tableau III. Résultats de la comparaison des moyennes des paramètres de production du mil selon la dose de Polyter, pour tous niveaux confondus du facteur fumier.

Dose de Polyter	Nombre de talles fertiles	Rendement en pailles (kg/ha)	Rendement en grains (kg/ha)
P0	17 841 a	2 592,16 a	305,17 a
P1	18 414,83 a	2 720,49 a	372,99 b
P2	18 675,67 a	2 918,72 ab	401,68 bc
P3	21 753,50 b	3 257,27 b	448,63 c

Les moyennes dans une colonne suivies par la même lettre ne diffèrent pas significativement entre elles au seuil de probabilité de 5 %.

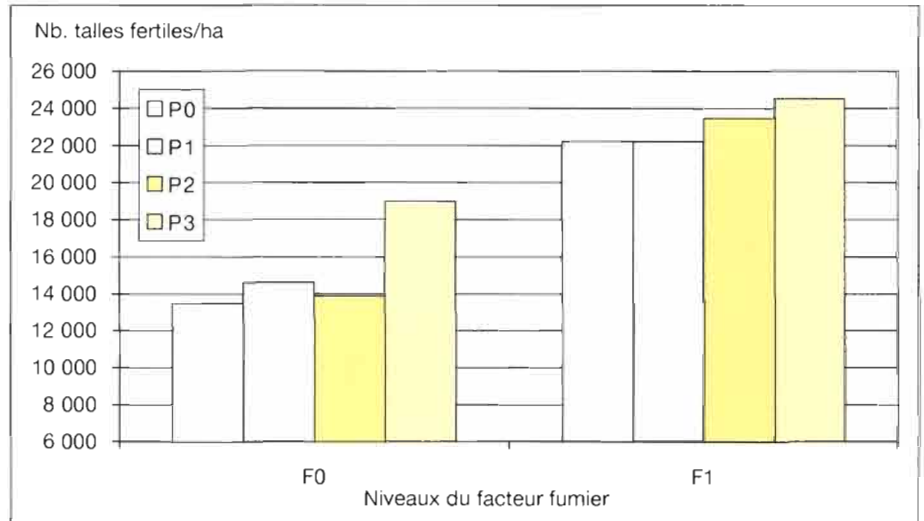


Figure 2. Effet des doses de Polyter (P0, P1, P2 et P3) sur le nombre de talles fertiles du mil, selon les niveaux de fumier (F0 et F1).

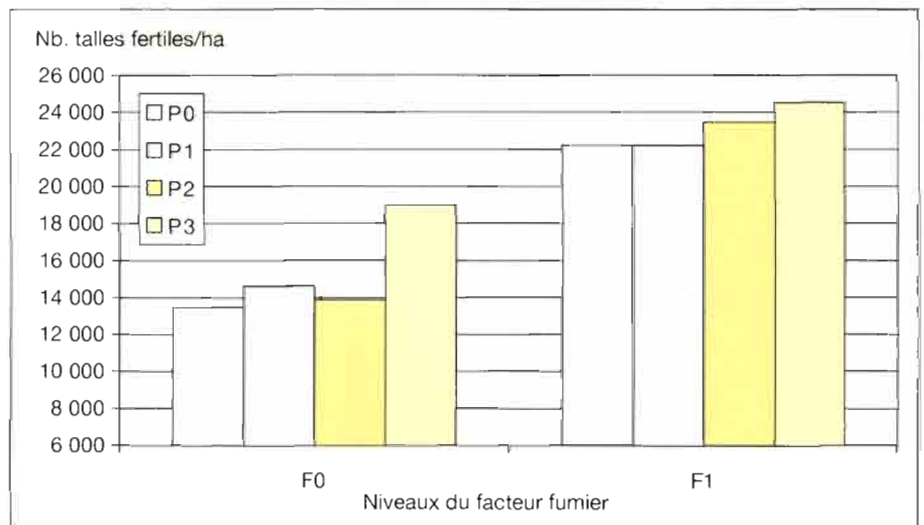


Figure 3. Effet des doses de Polyter (P0, P1, P2 et P3) sur le rendement en pailles du mil, selon les niveaux de fumier (F0 et F1).

meilleure mobilisation des éléments nutritifs pour la constitution des tissus végétaux.

- Rendement en grains

L'analyse de variance pour le rendement en grains a montré un effet hautement

significatif pour le fumier et pour Polyter pris séparément mais non significatif pour l'interaction de ces deux facteurs (tableau II). Pour tous niveaux confondus de Polyter, le fumier améliore de 54 %, le rendement en grains qu'il fait passer de

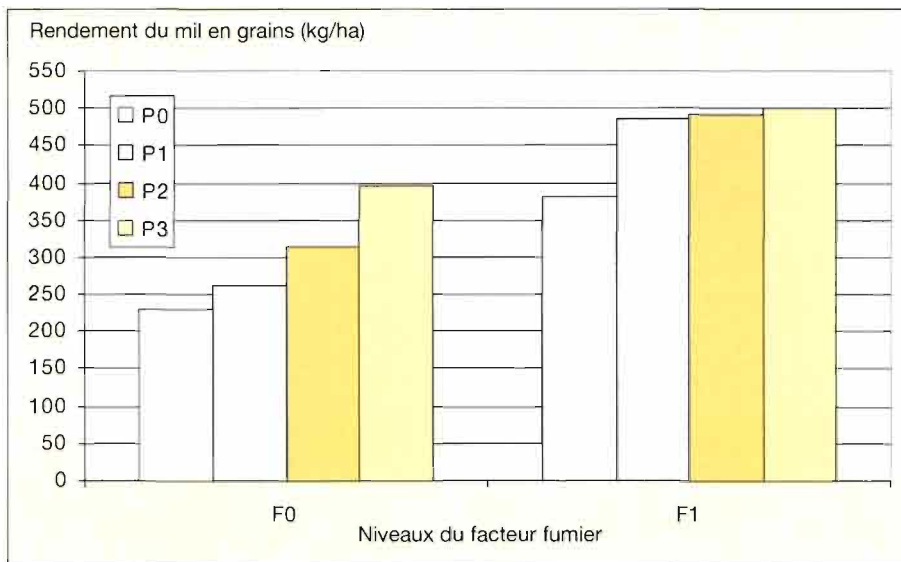


Figure 4. Effet des doses de Polyter (P0, P1, P2 et P3) sur le rendement en grains du mil, selon les niveaux de fumier (F0 et F1).

300 à 464 kg/ha. Un tel résultat, similaire à celui obtenu par Reij *et al.* [18] en conditions de faible pluviosité à Illéla au Niger (416 kg/ha), corrobore ceux plus généraux rapportés dans de nombreux travaux sur l'efficacité du fumier, même en faible quantité, sur la production des cultures dans les ouvrages de lutte antiérosive au Sahel [18-21].

Le tableau III montre que Polyter améliore significativement les rendements en grains, la dose P3 fournissant le rendement le plus élevé bien que non statistiquement différent de P2. La figure 4 confirme cette performance de P3 sur le rendement en grains, mais seulement lorsque le fumier est absent (F0). Mais, même dans ce cas, le rendement obtenu reste comparable à celui induit par une simple application de fumier.

En présence de fumier (F1), en revanche, l'apport d'une dose de Polyter (P1) engendre une augmentation significative du rendement, que n'amélioreront pas des doses supplémentaires de Polyter (figure 4). Dans ce dernier cas, Polyter à la dose de 10 kg/ha ferait passer le rendement en grains de 380 à 485 kg/ha, soit un accroissement de 27%. Si l'augmentation du nombre de tiges fertiles due à Polyter peut être évoquée pour expliquer en partie ce résultat, cet avantage serait surtout à mettre en relation avec la relative amélioration de la mobilisation de l'eau et des éléments nutritifs que favoriserait Polyter dans les expériences réalisées.

Conclusion

À Kossa, l'année 2001, particulièrement sèche en début et fin de campagne agri-

cole, a cependant enregistré en juillet et août une pluviosité régulière et normale. Les résultats obtenus sur les modifications des états de surface montrent que le seul travail du sol n'a pas contribué à les améliorer significativement. En revanche, après incorporation de Polyter au sol à raison de 1 t/ha, il a été observé qu'en plus de l'accroissement de la rugosité de surface générée, qui augmente du même coup la rétention de l'eau en surface après la pluie, l'ensemble de la couche travaillée a développé une cohésion plus faible et présenté un aspect plus grumeleux, signe d'une amélioration de la structure de la couche de surface qui a été probablement à l'origine de la reprise de la végétation herbacée naturelle observée.

Mais, en ce qui concerne le ruissellement et l'érosion, les taux de ruissellement et d'érosion enregistrés sont restés encore très élevés, l'influence du traitement s'étant probablement limitée aux seuls premiers centimètres du sol travaillés.

Les expériences sur les modifications de la production du mil sur les parcelles, ont montré que, tous niveaux de Polyter confondus, le fumier, bien qu'utilisé en faibles quantités, a exercé un effet très hautement significatif, ce qui corrobore les résultats rapportés par de nombreuses études réalisées sur ce sujet au Sahel.

Les paramètres de production dont les performances ont été significativement influencées par le niveau de Polyter sans distinction du fumier concernent le nombre de tiges fertiles et le rendement en grains ; mais, pour tous les paramètres étudiés, la dose P3, soit 20 kg de Polyter par hectare, a toujours donné une production significativement plus élevée que le témoin P0. Cependant, lorsque l'on examine les

moyennes des productions par dose de Polyter selon les niveaux du facteur fumier, il apparaît que Polyter, même à la dose de 20 kg/ha, induit des niveaux de production au plus équivalents à ceux obtenus avec les doses de fumier appliquées à Kossa. De plus, bien qu'il n'existe aucune interaction significative entre fumier et Polyter, il a toujours été noté une tendance à l'accroissement de la production avec les doses de Polyter, la valeur la plus élevée correspondant à la dose P3, sauf pour les rendements en grains où elle serait déjà atteinte avec P1, soit 10 kg/ha. En conclusion, les niveaux encore élevés du ruissellement et de l'érosion générés, la modestie du gain de production (11 à 31%) et des rendements ainsi atteints (485 kg/ha de grains) justifieront difficilement l'utilisation d'un tel produit en renfort ou comme substitut au fumier dans le cadre d'une agriculture de survie. En effet, la faible capacité d'investissement des populations ne peut favoriser l'adoption d'un tel produit dont le coût au kilogramme est d'environ 12 euros.

Références

1. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Collection Didactiques. Paris : Orstom éditions, 1989 ; 227 p.
2. Ambouta KMJ. *Étude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin du Sahel*. Thèse de doctorat, département des sols, faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, université Laval, Québec, 1994 ; 97 p.
3. Ambouta KJM, Valentin C, Laverdière MR. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 269-75.
4. Haywood M. *Évolution des terres et de la végétation dans la zone soudano-sahélienne du projet CIPEA au Mali*. Addis-Abeba : Cipea/Ilca, 1981 ; 187 p.
5. Gavaud M. Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. *Essai de systématique régionale*. *Cah Orstom Sér Pédol* 1968 ; 6 : 271-307.
6. Valentin C. Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the Sahelian zone. In : El Swaifi SA, Moldenhauer WL, Lo A, eds. *Soil erosion and conservation*. Ankeny : Soil Conservation Society of America, 1985 : 51-65.
7. Roose E. *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Travaux et Documents de l'Orstom N° 130. Paris : Orstom éditions, 1981 ; 569 p.
8. Roose E, Kaboré V, Guénat C. Fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 159-73.

9. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pédol FAO* (Rome) 1974 (70) ; 420 p.
10. Ambouta KJM, Bouzou Moussa I, Ousmane Daouda S. Réhabilitation de jachère dégradée par les techniques de paillage et de zai au Sahel. In : Floret C, Pontanier R, eds. *La jachère en Afrique Tropicale, Rôle, Aménagement, Alternatives*. Paris : John Libbey Eurotext, 2000 : 751-9.
11. Bouzou Moussa I. *Réponses géomorphologiques à la problématique de la conservation des eaux et sols au Niger*. Rapport de synthèse en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier Grenoble I, institut de géographie alpine, France, 2000 ; 186 p.
12. Lamachère JM. Aptitude au ruissellement et l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In : Sivakumar SVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C, et al., eds. *Soil water balance in the Soudano-Sahelien zone*. Proceedings of the Niamey workshop, février 1991. Wallingford : IAHS Institute of Hydrology, 1991 : 109-19.
13. Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage du Niger. *Gestion durable des ressources naturelles : leçons tirées du savoir des paysans de l'Adrar*. Niamey : PDRT, 1997 ; 142 p.
14. Bouzou Moussa I. *L'érosion dans la vallée de Keita. Contribution géomorphologique*. Thèse unique, université Joseph Fourier Grenoble I, institut de géographie alpine, France, 1988 ; 248 p.
15. Chase RG, Boudouresque E. A study of methods for revegetation of barren, crusted Sahelian forest soils in the region of Niamey, Niger. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 1987 ; 18 : 211-21.
16. Mando A. The effect of mulch on the water balance of Sahelian crusted soils. *Soil Technology* 1997 ; 11 : 121-8.
17. Léonard J, Rajot JL. Restoration of infiltration properties on crusted soils by mulching. In : Renard G, Neef A, Beker K, Von Oppen M, eds. *Soil fertility management in West Africa*. Weikersheim : Verlag Ulrich, 1998 ; 191-5.
18. Reij C, Scoones I, Toulmin C. *Sustaining the soil : Indigenous soil and water conservation in Africa*. London ; Paris ; Amsterdam ; Wageningen : Earthscan, 1996 ; 260 p.
19. Rochette RM. *Le Sahel en lutte contre la désertification ; leçons d'expériences*. Ouagadougou : CILSS-GTZ, 1989 ; 592 p.
20. Masse D, Donfack P, Floret C, Pontanier R, Seyni-Boukar L. Réhabilitation de vertisols dégradés (sols hardés) au Nord-Cameroun. In : Pontanier R, M'Hiri A, Akrimi N, Aronson J, Le Floch E, eds. *L'homme peut-il refaire ce qu'il a fait ?* Paris : John Libbey Eurotext, 1995 ; 455 p.
21. Evequoz M. Dynamique de la matière organique et durabilité des systèmes de production nord sahéliens. *Annales de l'Université Abdou Moumouni de Niamey* 2000 ; numéro hors série : 11-28.

Colloque international

Désertification, sécheresse et lutte contre la pauvreté

Journée mondiale de la désertification
Bruxelles (Belgique) 17 juin 2004

Ce colloque se tiendra à Bruxelles à l'occasion de la Journée mondiale de la désertification qui célèbre aussi le dixième anniversaire de la signature de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULD), l'une des trois grandes conventions environnementales multilatérales issues du Sommet de Rio-1992.

Objectifs

L'organisation de ce colloque à l'initiative du comité belge de concertation pour la CNULD dans le cadre de la Journée mondiale de la désertification s'inscrit dans le souci de dynamiser cette Convention face à l'impact évident que la dégradation des sols et la désertification exercent sur l'aggravation de la pauvreté, la pénurie d'eau, l'émergence de conflits, les migrations. On estime que les pertes du secteur agricole de par le monde, dues à la désertification, sont *grosso modo* équivalentes à l'APD totale annuelle (OECD *Development Co-operation Report*, 2002).

Le but de cette journée est de stimuler une discussion au niveau national sur le rôle de la CNULD dans la coopération au développement, en faisant le point sur trois questions :

– où en est la Belgique, en tant que pays bailleur de fonds, dix ans après l'adoption de la Convention ?

– qu'est-ce qui a été fait et pas fait, qu'est-ce qui a donné de bons résultats et qu'est-ce qui a échoué ou manqué ?

– quelles bonnes pratiques faut-il promouvoir pour agir efficacement dans la lutte contre la désertification ?

Organisation de la journée, thèmes et contributions

Trois experts provenant de pays du Sud (centre Agrhymet, Maroc et Tanzanie) et trois de pays du Nord seront invités à participer à ce colloque comme orateurs. Ils exposeront leur point de vue ou celui de leur institution, en mettant en lumière les succès, les manques et les défis qui marquent la lutte contre la désertification dans le monde en développement.

L'après-midi, un panel de scientifiques et d'hommes de terrain, retenus à la suite de l'appel à contributions (*Call for papers*) débattera sur les bonnes pratiques existantes ou à développer dans les domaines de la gestion de l'eau, la gestion du sol et de la production alimentaire, en veillant à aborder tant les aspects bio-physiques que les aspects socio-économiques et les aspects stratégico-politiques. On y mettra aussi l'accent sur la durabilité, tant celle des résultats des actions que celle de leur impact sur la lutte contre la désertification. Ce panel sera suivi par un débat participatif avec le public.

Des posters seront également présentés, afin de permettre à un plus grand nombre d'acteurs de terrain d'exposer leurs expériences en matière de lutte contre la désertification et contre la pauvreté.

Les exposés oraux, d'une durée maximum de 15 minutes chacun, se feront en français ou en néerlandais. Une traduction simultanée français-néerlandais est envisagée.

Résultats attendus

Ce colloque fera l'objet d'un compte rendu qui fera la synthèse des débats et conclusions qui en sont issues, et qui présentera les résumés des papiers et des posters préalablement soumis par les contributeurs.

Ce compte rendu sera complété par les résultats des travaux du groupe d'experts mis sur pieds en parallèle à cet événement.

Ce colloque devra aussi déboucher sur un certain nombre d'actions concrètes à entreprendre afin de renforcer l'intégration transversale de la lutte contre la désertification dans les différents secteurs et canaux de la Coopération au développement.

Contacts :

Direction Générale de Coopération au Développement (DGCD)
Rue Brederode 6
1000 Bruxelles
Belgique
<Patrick.Hollebosch@diplobel.fed.be>
<Arnold.Jacquessedixmude@diplobel.fed.be>

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

Drissa Diallo¹
Bernard Barthès²
Didier Orange³
Eric Roose²

¹ Laboratoire d'agropédologie,
IPR de Katibougou,
BP 6,
Koulikoro,
Mali

<drdiallo@ird-ml.org>

² Laboratoire MOST,
IRD-Cirad,
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France

<barthes@mpl.ird.fr,
<roose@mpl.ird.fr>

³ Institut de recherche pour le développement
(IRD)

UR-ECU,
57, Tran Hung Dao,
Hanoi,
Vietnam

<d.orange@cgiar.org>

Résumé

En 1998 et 1999, le ruissellement et l'érosion ont été mesurés au Sud-Mali sur sept parcelles d'érosion standard (100 m²) sous pluies naturelles. Ces parcelles étaient installées sur sol ferrugineux tropical, sol brun vertique et sol peu évolué d'érosion, avec les modes d'occupation suivants : jachère arbustive, culture avec labour (maïs puis coton, en culture attelée), culture avec travail minimum (maïs puis coton, travail à la pioche sur le rang seulement). Des échantillons de sol ont été prélevés à 0-10 cm de profondeur, afin de déterminer notamment la teneur en carbone, la stabilité des agrégats (tamisage dans l'eau) et la stabilité des mottes (sous l'impact de gouttes d'eau). Les résultats montrent que lorsque le taux d'argile (et limons fins) est faible et les pratiques culturales intensives, la teneur en carbone du sol et la stabilité des agrégats et des mottes sont faibles également, tandis que le ruissellement et l'érosion sont élevés. De manière générale, le sol brun vertique (argileux) et les sols sous jachère sont donc moins sensibles au ruissellement et à l'érosion que le sol ferrugineux et les sols labourés. Les résultats sont plus complexes en cas de travail minimum (par rapport aux autres traitements, ruissellement et érosion sont importants en année humide mais faibles en année sèche) et sur sol peu évolué (ruissellement élevé mais érosion limitée, du fait de la richesse en éléments grossiers en surface). Les résultats montrent également que le ruissellement est lié à la stabilité des agrégats (elle-même liée à la teneur en argile et en carbone), et que l'érosion est fonction de la stabilité des mottes (elle-même fonction de la richesse en radicelles). Les pratiques qui garantissent une stabilité élevée de la couche de sol superficiel permettent donc de diminuer la sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion. Par ailleurs, ces résultats confirment et étendent la validité de tests d'érodibilité simples (stabilité des agrégats et des mottes) pour évaluer le ruissellement et l'érosion à l'échelle parcellaire. Le test de stabilité des mottes peut être long quand les mottes sont stables (de 10 s à 120 min). De plus, il exige une quantité de sol plus importante (120 g) que le test de stabilité des agrégats (20 g) et un transport précautionneux des mottes jusqu'au laboratoire. En revanche, il requiert très peu de matériel de laboratoire (pipette).

Mots clés : Érosion ; Ruissellement ; Mali.



Summary

Comparison between aggregate or clod stability and runoff and interrill erosion risks measured on runoff plots in the Sudanese zone of Mali

In 1998 and 1999, runoff and soil erosion were monitored on runoff plots in Southern Mali. Seven runoff plots were set up on three different soils (Alfisol, Vertisol, and Lithosol), with three land uses, *i.e.* old natural bush fallow, cropping with conventional tillage (maize then cotton), and cropping with minimum tillage on the seed line. Soil samples were collected at 0-10 cm in order to determine soil carbon contents, aggregate stability (to wet-sieving after fast wetting) and clod stability to waterdrops. The results indicate that small clay (and fine silt) contents and intensive tillage resulted in low soil carbon contents and weak aggregate and clod stability, and high runoff and erosion. Thus runoff and erosion tended to be lower on the (clayey) vertisol and under fallow than on the alfisol and under conventional tillage. The results were more complex with minimum tillage (as compared with other land uses, runoff and erosion were greater when annual rainfall was high, but the opposite occurred in rather dry years) and on the lithosol (high runoff but limited erosion due to the high topsoil contents in gravels). Runoff correlated with topsoil aggregate stability (which in turn correlated with clay and carbon contents), and erosion with clod stability (which in turn correlated with fine root contents). Thus land uses that promote the stability of the topsoil structure (e.g. organic return to the soil including root biomass, reduced tillage) decrease soil susceptibility to runoff and erosion. Furthermore, these results confirm and extend the validity of simple erodibility tests (aggregate and clod stability) for the assessment of runoff and interrill erosion at field scale. The clod stability test seems to better explain erosion risks than the aggregate stability test, as it takes the stabilizing action of the root into account. Additionally, the clod test requires few laboratory devices. However, it can take long when clods are stable (10 s to 120 min for each clod), and it requires larger soil samples that must be transported carefully.

Key words: Erosion; Runoff; Mali.

Dans les zones soudanaises d'Afrique occidentale, les politiques modernes de développement rural visent, depuis le début des années 1970, l'intensification d'agrosystèmes reposant sur les cultures annuelles avec des rotations de type coton-céréales. Dans ces systèmes, les difficultés de maintien du potentiel productif des sols ont été notées depuis vingt ans [1]. Le labour, qui est largement vulgarisé au Mali, favorise la dégradation et l'érosion des sols [2, 3]. Les caractéristiques pédologiques le plus souvent invoquées dans la dégradation rapide des sols de ces écosystèmes sont les faibles teneurs en argile et/ou en matière organique des horizons de surface. L'argile et la matière organique jouent en effet un rôle capital dans le développement et le maintien d'une bonne structure du sol [4]. Les faibles teneurs en argile et matière organique de nombreux sols des savanes du Sud-Mali déterminent ainsi leur grande vulnérabilité [5]. Il est reconnu depuis longtemps qu'un bon état structural du sol garantit une bonne infiltration de l'eau des pluies et préserve le sol contre l'érosion.

Estimer l'effet du type de sol et du mode d'occupation sur le ruissellement et l'érosion est souvent difficile, car les mesures au

champ du ruissellement et de l'érosion sont fastidieuses. La sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion peut toutefois être évaluée en caractérisant quantitativement la stabilité de la structure du sol en laboratoire. Barthès *et al.* [6] ont montré, en zone tropicale (pluviosité annuelle de 400 à 1 600 mm), que le ruissellement et l'érosion annuels moyens augmentent et que le taux de macroagrégats (supérieurs à 0,2 mm) stables diminue avec l'ancienneté du défrichement, l'intensité du travail et la dénudation du sol. La mise en évidence d'une relation entre les indicateurs de risque d'érosion hydrique (comme le taux de macroagrégats stables) et l'érosion mesurée au champ peut contribuer à l'amélioration des démarches cartographiques sur les risques d'érosion. En effet l'acquisition de données fiables en quantité suffisante pour la cartographie est plus facilement envisageable avec des indicateurs d'érodibilité mesurés en laboratoire que sur la base de mesures de terrain, longues et coûteuses.

Notre travail, dans la zone soudanienne du Mali, a porté sur trois types de sols (sol ferrugineux tropical lessivé, sol brun vertique, sol gravillonnaire peu évalué d'érosion sur cuirasse) sous trois types de modes d'occupation (jachère arbutive,

culture de plus de cinq ans avec labour conventionnel, culture avec travail du sol réduit à la ligne de plantation). L'objectif est de caractériser l'effet du type de sol et du mode d'occupation sur le comportement des sols évalué au champ (ruissellement et érosion mesurés en parcelle d'érosion) et en laboratoire (stabilité des macroagrégats à l'immersion dans l'eau et stabilité des mottes aux gouttes d'eau).

Matériel et méthode

Site d'étude

L'étude a été réalisée dans le bassin-versant de Djitiko (12°03' à 11' N et 8°22' à 27' O), dans le haut bassin du fleuve Niger, au Mali. La pluviosité moyenne interannuelle (1939-1995) mesurée à la station climatique de référence (Kangaba, à 20 km) est de 1 076 mm. Pour les deux années étudiées, 1998 et 1999, les pluviosités annuelles sont respectivement de 995 et 1 355 mm, à l'emplacement des parcelles [2]. Les intensités pluviales partielles peuvent atteindre plus de 100 mm.h⁻¹ durant 30 minutes et l'indice d'agressivité pluviale (R_{USA}) pour l'année, varie de 400 à plus de

800 unités américaines, soit 7 000 à 14 000 MJ.mm.(ha.h)⁻¹.

Trois types de sols sont retenus pour cette étude : un sol ferrugineux tropical lessivé rouge, un sol brun vertique et un sol peu évolué d'érosion ; les deux premiers sont épais, alors que le troisième est peu épais (25 à 40 cm sur cuirasse) et gravillonnaire dès la surface. Les modes d'occupation étudiés sont les suivants :

- sur sol ferrugineux : jachère, labour et travail minimum ;
- sur sol brun vertique : jachère, labour et travail minimum ;
- sur sol peu évolué d'érosion : jachère.

Les jachères arbustives ont au moins vingt ans avant les essais, et ont été régulièrement brûlées et pâturées. Les parcelles cultivées, travaillées de manière conventionnelle (labour) pendant au moins cinq ans avant l'expérimentation, sont sous maïs en 1998 et sous coton en 1999 ; les résidus de culture sont pâturés. Les labours, profonds de 12 à 15 cm, sont réalisés en traction bovine. Le travail minimum (à partir de 1998) est réalisé à la pioche jusqu'à 12-15 cm de profondeur, uniquement sur le rang de culture (tous les 80 cm) ; il est accompagné d'un désherbage chimique. Les sept parcelles d'étude couvrent chacune 100 m² (20 m x 5 m) et ont des pentes comprises entre 1,5 et 2 %. Sur chaque parcelle, trois prélèvements de sol réalisés à 0-10 cm de profondeur sont réunis pour former un échantillon composite par parcelle, qui est ensuite séché à l'air.

Détermination de la granulométrie, de la teneur en carbone et azote, du pH, et de la capacité d'échange cationique (CEC)

Granulométrie, teneurs en carbone et azote et pH sont déterminés sur sol séché à l'air, puis tamisé à 2 mm. La granulométrie est déterminée après destruction de la matière organique (eau oxygénée) et dispersion totale (hexamétophosphate de sodium), par tamisage à sec pour les fractions grossières, puis sédimentation (pipette Robinson) pour les fractions fines. Les teneurs en carbone et azote sont déterminées sur sol broyé à 0,2 mm, par combustion sèche dans un analyseur élémentaire (CHN). Le pH est déterminé avec un rapport sol/solution de 2,5. La CEC est déterminée au pH du sol, avec extraction au chlorure de cobaltihexamine [7] et dosage par spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP).

Test de stabilité des agrégats

Ce test, qui dérive de la méthode proposée par Kemper et Rosenau [8], est réalisé sur des échantillons tamisés à 2 mm (pas

seulement sur les agrégats). La stabilité des agrégats est évaluée en plongeant des échantillons secs de 4 g dans des béchers d'eau déminéralisée, puis en les tamisant à 0,2 mm au moyen de 60 agitations verticales dans cette même eau. La fraction retenue sur le tamis comprend des macro-agrégats stables (supérieurs à 0,2 mm), des sables grossiers, ainsi que des matières organiques grossières dont le poids est négligé. La teneur en sables grossiers (SG) est déterminée par dispersion de la fraction supérieure à 0,2 mm dans la soude diluée. La teneur en macroagréats stables (MA) est calculée par différence entre la fraction supérieure à 0,2 mm et SG. Le test est réalisé avec quatre répétitions par échantillon, et les résultats sont exprimés en g.kg⁻¹ de sol séché à 105 °C. La méthode est décrite en détail par Barthès et Roose [9].

Test de stabilité des mottes

Le test de stabilité des mottes, pratiqué depuis longtemps, est un bon indicateur de la stabilité de la structure [10]. Ce test est réalisé sur des mottes d'environ 4 g obtenues en taillant au couteau des mottes naturelles, provenant d'échantillons non tamisés, ramenés précautionneusement au laboratoire (transport en boîte rigide avec emballage dans du coton). Il n'a pas été réalisé sur le sol gravillonnaire, qui ne contient pas de mottes de taille suffisante. Le test consiste à soumettre chaque motte à un flux de gouttes d'eau de 3 mm de diamètre, qui tombent d'une burette placée à 1 m au-dessus de la motte. Celle-ci est posée sur une petite nacelle au-dessus d'un entonnoir, qui débouche sur un tamis de 0,2 mm placé au-dessus d'un bécher. Les matériaux issus de la désagrégation de la motte tombent ainsi dans l'entonnoir puis sur le tamis, qui retient les particules grossières (macroagréats, sables grossiers, radicules) tandis que les particules plus fines sont recueillies dans le bécher. Le volume d'eau nécessaire pour désagréger complètement la motte est lu directement sur la burette. Les radicules sont prélevées sur le tamis, séchées et pesées. En général, 30 mottes sont étudiées par parcelle, mais dans le cas des mottes les plus stables, dont la désagrégation est très longue, 15 mottes seulement ont été étudiées.

Mesure du ruissellement et de l'érosion

Les parcelles expérimentales (100 m²) sont délimitées sur trois côtés par des tôles enfoncées dans le sol et, à l'aval, par un canal qui draine les eaux de ruissellement et les sédiments vers trois cuves en béton reliées par un partiteur permettant d'éva-

luer le ruissellement (jusqu'à 150 mm de pluie). Les volumes d'eau ruisselés et les quantités de terre érodées sont mesurés après chaque événement pluvieux. Ces mesures permettent de déterminer le coefficient de ruissellement (rapport entre la hauteur de la lame ruisselée et celle de la pluie) et l'érosion (matières en suspension et terres de fond) pour chaque événement pluvieux, puis de calculer les valeurs annuelles de ces paramètres. Durant les deux années considérées, 1998 et 1999, 66 événements pluvieux ont occasionné du ruissellement.

Traitement statistique des données

Les relations entre paramètres (ruissellement, érosion, teneurs en carbone, en argile et limons fins, en macroagréats stables, volume d'eau pour désagréger une motte, poids de radicules dans une motte) sont évaluées au moyen de corrélations linéaires simples (coefficient r) ou multiples (coefficient R).

Résultats

Caractéristiques générales des sols étudiés (couche 0-10 cm)

Les principales caractéristiques des échantillons étudiés sont présentées dans le *tableau 1*. Le sol peu évolué est riche en éléments grossiers, constitués d'éléments de cuirasse démantelée (supérieurs à 2 mm), alors que les deux autres sols n'en contiennent pas en surface. La texture de l'horizon de surface est argileuse dans le sol brun vertique, argilo-sableuse dans le sol ferrugineux et le sol peu évolué. Sur sol ferrugineux, la parcelle sous jachère a une teneur en éléments fins sensiblement plus élevée que les parcelles cultivées ; cette différence semble résulter du mode d'occupation des sols plus que de variations d'ordre géologique, car les teneurs en limons grossiers sont similaires sur les trois parcelles.

La teneur en carbone est plus élevée sur le sol brun vertique que sur les autres sols. Cette teneur est très étroitement corrélée à la teneur en argile et limons fins ($r = 0,952$, $p < 0,001$) (*figure 1*). Elle décroît avec l'intensité croissante du travail du sol sur sol ferrugineux ; sur sol brun vertique, la teneur en carbone est maximale sous travail minimum, et similaire sous jachère et labour. La teneur en azote est plus élevée sur le sol brun vertique que sur le sol ferrugineux, et intermédiaire sur le sol peu évolué.

Le pH eau est de l'ordre de 6,5 sur sols ferrugineux et peu évolué, et de 7 sur sol brun vertique. La CEC élevée sur sol brun vertique témoigne de la présence d'argiles

Tableau I. Caractéristiques de l'horizon superficiel (0-10 cm) des parcelles expérimentales.

Type de sol	Mode d'occupation	EG ^a (%)	A + LF ^b (%)	LG ^c (%)	Sables (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau	CEC ^d cmol(+).kg ⁻¹
Sol ferrugineux	Jachère	0	40	37	24	1,10	0,07	14,9	6,6	6,7
	Labour	0	26	42	31	0,69	0,05	14,5	6,2	4,2
	Travail minimum	0	26	44	30	0,87	0,06	13,9	6,6	4,5
Sol brun vertique	Jachère	0	62	27	11	3,84	0,25	15,6	6,7	26,4
	Labour	0	56	26	18	3,81	0,23	16,5	7,0	35,0
	Travail minimum	0	64	26	10	5,38	0,36	14,8	7,1	31,3
Sol peu évolué	Jachère	89	34	21	45	1,53	0,10	14,7	6,7	10,0

^aEG : éléments grossiers (> 2 mm) ; ^bA + LF : argile et limons fins (< 0,02 mm) ; ^cLG : limons grossiers (0,02-0,05 mm) ; ^dCEC : capacité d'échange cationique.

de type 2:1 (smectite), responsables des propriétés vertiques. En revanche, la CEC du sol ferrugineux est très faible, en relation avec la présence majoritaire d'argiles de type 1:1 (kaolinite). Le sol peu évolué d'érosion a une CEC intermédiaire, compte tenu de la nature probablement composite des matériaux qui le constituent.

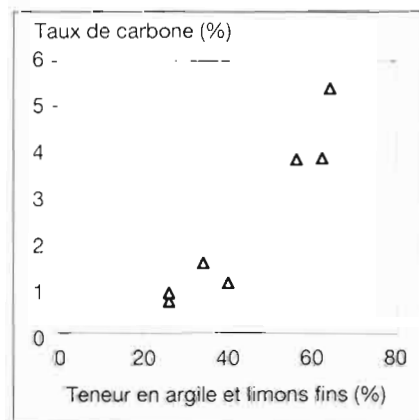


Figure 1. Relation entre teneur en argile et limons fins et teneur en carbone dans la couche de sols 0-10 cm.

Stabilité des agrégats

Le tableau II présente les résultats concernant la teneur en macroagrégats stables (MA) de l'horizon de surface (0-10 cm) des parcelles étudiées. Sur sols ferrugineux et brun vertique, MA est plus faible sous labour que sous jachère et travail minimum, la différence entre ces deux derniers étant variable. Les différences entre modes d'occupation sont fortes sur sol ferrugineux, le travail du sol s'accompagnant en particulier d'une forte diminution de la stabilité structurale ; en revanche, les différences entre traitements sont moins marquées sur sol brun vertique (où MA est plus élevé sous travail minimum que sous jachère).

La comparaison entre sols montre que MA est toujours plus faible sur sol ferrugineux que sur sol vertique, et encore plus faible sur sol peu évolué (jachère). Le sol brun vertique a donc une stabilité élevée, qui diminue peu (ou lentement) sous l'effet du labour, à la différence du sol ferrugineux, où la stabilité est plus faible et diminue fortement sous culture ; la stabilité est très faible dans le sol peu évolué.

MA est fortement corrélé avec la teneur en argile et limons fins ($r = 0,950$, $p < 0,01$), mais moins nettement avec la teneur en

carbone ($r = 0,869$, $p < 0,05$) (figure 2). La corrélation multiple entre MA, d'une part, teneur en carbone et teneur en argile et limons fins, d'autre part, n'est pas meilleure ($R = 0,958$) que celle avec argile et limons fins seuls.

Stabilité des mottes

La quantité d'eau nécessaire pour désagréger une motte d'environ 4 g permet d'évaluer la stabilité des mottes (tableau III). Le temps de désagrégation est faible pour les mottes sableuses (10 à 30 secondes) mais il peut atteindre 2 heures pour les mottes argileuses du vertisol.

La comparaison entre modes d'occupation indique que la stabilité des mottes est beaucoup plus élevée sous jachère que sous culture (volume d'eau nécessaire à la désagrégation au moins sept fois plus élevé sous jachère). Les mottes du sol brun vertique sont plus stables sous travail minimum que sous labour (volume d'eau deux fois plus élevé sous travail minimum), mais la différence entre les deux sols ferrugineux cultivés est très faible. L'effet de deux années de travail minimum après cinq années au moins de labour est donc sensible sur sol vertique, mais non sur sol ferrugineux.

Tableau II. Ruissellement, érosion et stabilité des macroagrégats (> 0,2 mm) et des mottes (environ 4 g) dans la couche de sol 0-10 cm.

Type de sol	Mode d'occupation	Ruissellement annuel (%)			Érosion annuelle (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)			Macroagrégats stables (g.kg ⁻¹ de sol)	Volume d'eau pour désagréger une motte (ml.motte ⁻¹)	Poids de radicules dans les mottes (g.kg ⁻¹ motte)
		1998	1999	Moy.	1998	1999	Moy.			
Sol ferrugineux	Jachère	26,1	17,7	21,9	4,0	5,6	4,8	518	48,4	3,3
	Labour	40,1	50,2	45,2	15,8	21,0	18,4	160	7,1	3,2
	Travail minimum	26,3	23,2	24,8	2,7	12,0	7,4	289	7,6	2,0
Sol brun vertique	Jachère	16,4	26,8	21,6	2,4	1,0	1,7	709	258,8	7,0
	Labour	21,4	33,3	27,4	10,0	18,2	14,1	584	8,7	2,0
	Travail minimum	12,9	39,8	26,4	2,3	9,7	6,0	748	19,4	5,0
Sol peu évolué	Jachère	28,2	54,1	41,2	2,6	5,3	4,0	225	ND	ND

ND : non déterminé.

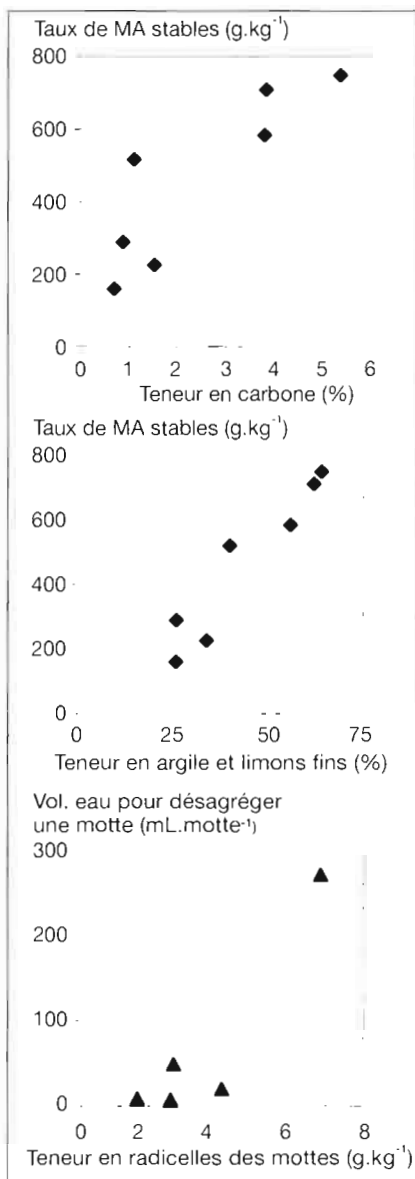


Figure 2. Relations entre taux de macroagrégats (MA) stables (> 0,2 mm) et teneurs en carbone + limons fins ou en carbone, et entre teneur en radicelles et stabilité des mottes (volume d'eau pour désagréger une motte de 4 g) à 0-10 cm de profondeur.

La comparaison entre sols montre que la stabilité des mottes est plus élevée sur sol brun vertique que sur sol ferrugineux. La différence est importante sous jachère et sous travail minimum (volume d'eau désagrégeant environ cinq et trois fois plus important sur sol vertique, respectivement), mais reste faible sous labour. Le volume d'eau nécessaire pour désagréger une motte est corrélé au poids de radicelles dans la motte ($r = 0,842$, $p < 0,05$) (figure 2) ; la corrélation n'est

pas améliorée en considérant la teneur en macroagrégats stables en plus du poids de radicelles ($R = 0,843$, $p > 0,05$ car il y a une variable explicative en plus et un degré de liberté en moins que précédemment).

Ruissellement et érosion

Les coefficients de ruissellement annuels et les pertes en terre annuelles en 1998 et 1999 sur les sept parcelles étudiées sont reportés dans le *tableau II*.

La comparaison entre modes d'occupation montre que pour un sol donné (ferrugineux ou brun vertique), ruissellement et érosion sont plus importants sous labour que sous jachère. Sous travail minimum, les résultats sont intermédiaires en moyenne, et varient notamment avec la pluviosité : en année pluvieuse (1999), ruissellement et érosion sont plus importants sous travail minimum que sous jachère, tandis qu'en année sèche (1998), ils sont du même ordre, donc faibles. De plus, l'effet du mode d'occupation sur l'érosion est relativement marqué : son effet sur le ruissellement reste marqué sur sol ferrugineux [ruissellement plus important sous labour], mais est moins net sur sol brun vertique.

La comparaison entre sols ferrugineux et brun vertique montre que, sous labour, ruissellement et érosion sont plus importants sur sol ferrugineux, mais la différence entre sols est peu nette sous travail minimum. Sous jachère, le sol peu évolué est caractérisé par un très fort ruissellement, deux fois plus important en moyenne que sur sols ferrugineux et brun vertique ; en revanche, l'érosion reste modérée sur sol peu évolué, du même ordre que sur sol ferrugineux, mais deux fois plus forte en moyenne que sur sol brun vertique.

Les ruissellements annuels moyens sont donc élevés sur sol peu évolué (jachère) et sur sol ferrugineux labouré (40-45 %), et plus faibles ailleurs (20 à 30 %). L'érosion est importante sous labour et, lors des années pluvieuses, sous travail minimum (10 à 20 t.ha⁻¹.an⁻¹) ; elle est plus faible sous jachère et, lors des années peu pluvieuses, sous travail minimum (1 à 6 t.ha⁻¹.an⁻¹).

Pour identifier de possibles déterminants du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles étudiées, des corrélations ont été recherchées entre ces paramètres et certaines caractéristiques de la couche de sol 0-10 cm : teneurs en carbone (C), en argile et limons fins (A + LF), en macroagrégats stables (MA), volume d'eau pour désagréger une motte (MOT), poids de radicelle d'une motte (RAD). Tous ces paramètres sont déterminés sur sept parcelles, sauf MOT et RAD, déterminés sur six parcelles seulement (pas de motte dans les sols gravillonnaires).

Le coefficient de ruissellement annuel moyen est corrélé négativement à MA ($r = -0,757$; $p < 0,05$; pour une variable explicative et cinq degrés de liberté, ddl) (figure 3) ; la prise en compte additionnelle de C améliore un peu la relation ($R = 0,902$ pour deux variables explicatives et quatre ddl ; $p < 0,05$). C'est surtout en 1998 (année sèche) que le ruissellement est corrélé à MA ($r = -0,910$; $p < 0,01$), la prise en compte additionnelle de C s'accompagnant d'une corrélation moins significative pour cette année-là ($R = 0,922$; $p < 0,05$ pour deux variables explicatives et quatre ddl). En 1998, le ruissellement est également corrélé négativement, mais moins étroitement, avec A + LF ($r = -0,879$; $p < 0,01$), avec C ($r = -0,864$; $p < 0,05$), et il est aussi corrélé avec les paires de variables MA - MOT ($R = 0,942$; $p < 0,05$), et MA - RAD ($R = 0,941$). En 1999 (année humide), le ruissellement est corrélé avec la paire de variables MA - C ($R = 0,898$; $p < 0,05$). Le ruissellement est donc lié négativement à la stabilité structurale de la couche de sol superficiel, surtout en année sèche ; en année humide, l'agrégation seule ne suffit pas à expliquer (statistiquement) le ruissellement, et le taux de carbone de surface doit également être pris en considération.

L'érosion annuelle moyenne est corrélée positivement avec l'instabilité des mottes ($r = 0,832$; $p < 0,05$) (figure 3), qui est l'inverse du volume d'eau nécessaire pour désagréger une motte (1/MOT), et représente la contribution d'un ml de goutte à la désagrégation d'une motte (en motte.mL⁻¹). L'érosion en 1998 est corrélée avec 1/MOT uniquement en excluant la parcelle en travail minimum sur sol ferrugineux ($r = 0,926$; $p < 0,05$). L'érosion en 1999 est corrélée avec 1/MOT ($r = 0,909$; $p < 0,05$). L'érosion moyenne est également corrélée significativement avec la paire de variables Ruissellement moyen (RUI_m) - RAD ($R = 0,954$; $p < 0,05$ pour deux variables explicatives et trois ddl), alors que les corrélations simples avec RUI_m ($r = 0,545$) et RAD ($r = -0,606$) sont médiocres. En résumé, l'instabilité des mottes apparaît comme un déterminant important de l'érosion ; bien qu'elle ne soit pas corrélée significativement au ruissellement seul, l'érosion est également corrélée avec des paires de variables associant le ruissellement à certaines caractéristiques de la couche de sol 0-10 cm : richesse en radicelles [1999 et moyenne 1998-99], teneur en C ou en A + LF (1998). En revanche, aucune corrélation significative n'a été observée entre l'érosion annuelle et le taux de macroagrégats stables.

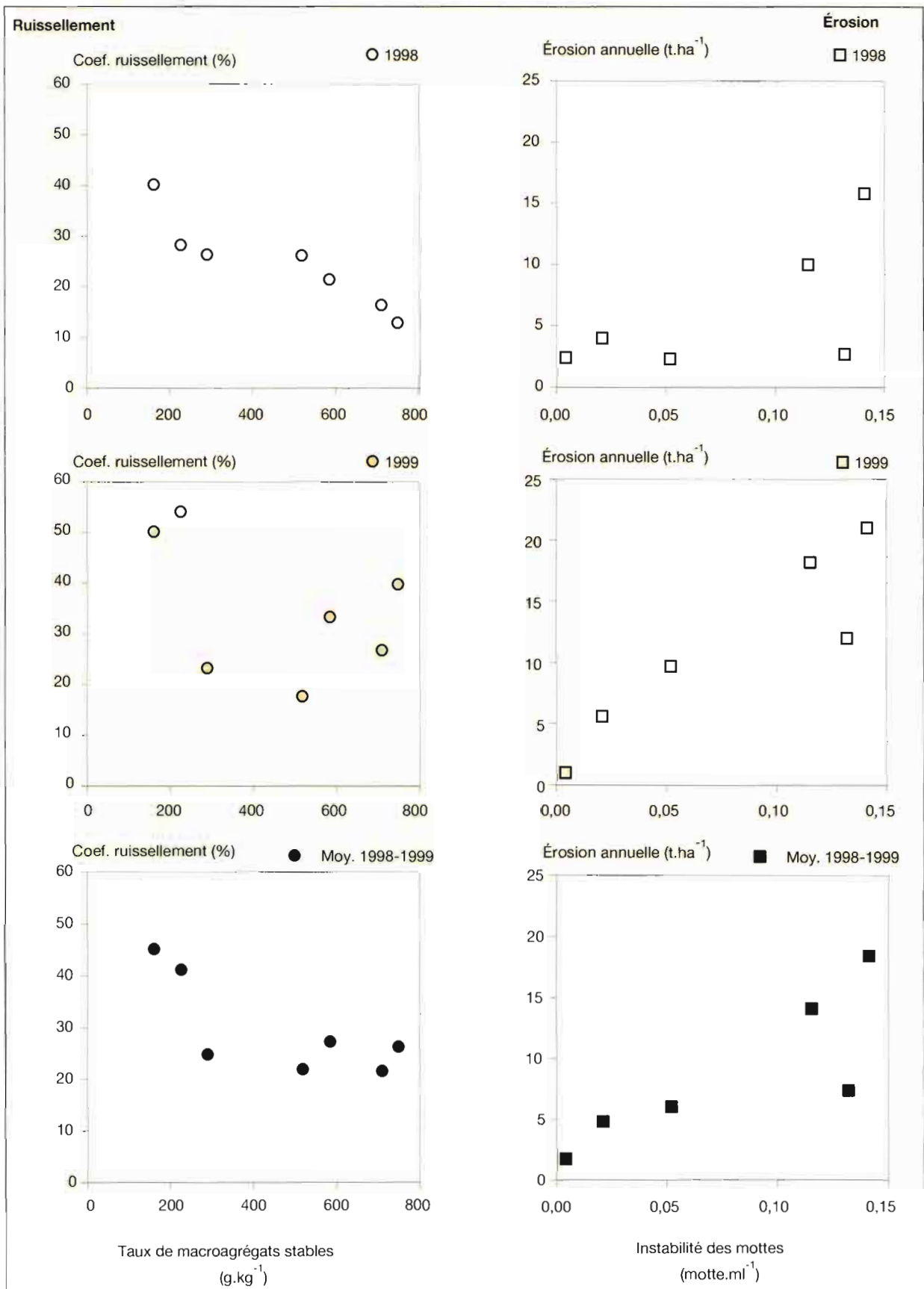


Figure 3. Relations entre stabilité des macroagrégats (> 0,2 mm) à 0-10 cm et ruissellement annuel, et entre instabilité des mottes à 0-10 cm et érosion annuelle (l'instabilité des mottes est caractérisée par la proportion d'une motte de 4 g désagrégée par un mL d'eau).

Discussion

Texture et teneur en carbone

La décroissance du taux de carbone du sol avec l'intensité culturale, notamment l'intensité du travail du sol, observée ici sur sol ferrugineux, est bien établie [11]. Elle est notamment expliquée par la minéralisation consécutive à l'aération du sol par les opérations culturales, mais également par les restitutions organiques (notamment racinaires) souvent plus faibles et l'érosion plus forte sous culture que sous jachère arbutive. En revanche, sur sol brun vertique, la teneur en carbone nettement plus élevée sous travail minimum que sous jachère est surprenante, de même que les teneurs similaires sous jachère et labour ; ces résultats pourraient être liés à l'hétérogénéité du sol sous végétation naturelle, suite aux dépôts successifs de sédiments provenant de la colline située en amont.

La relation étroite entre teneur en carbone et teneur en argile et limons fins a été rapportée par d'autres auteurs, surtout pour les sols à argile 1:1 [11] ; mais contrairement à ces publications, nos résultats ne montrent pas de différence entre sols à argiles 1:1 et 2:1, qui tendent à s'aligner sur la même droite. La corrélation entre teneur en carbone et texture résulte des liaisons étroites qui s'établissent entre colloïdes minéraux et organiques, et assurent une protection du carbone contre la minéralisation.

Stabilité des agrégats et des mottes

L'influence des teneurs en argile et en matière organique sur la stabilité structurale a été rapportée par différents auteurs [12, 13] ; toutefois, contrairement à nos résultats, l'influence de la matière organique sur l'agrégation est souvent jugée plus importante que celle de la texture. Cet effet des colloïdes organiques et minéraux résulte des liaisons qu'ils constituent entre particules, et qui contribuent à la stabilité de l'agrégation [14]. La richesse en argile 2:1 et en carbone du sol brun vertique explique donc sa forte stabilité structurale, et la faible variation de cette stabilité sous l'effet de la mise en culture. En revanche, la stabilité structurale du sol ferrugineux, plus faible sous jachère, est nettement affectée par le travail du sol, et devient très faible sous labour. Cette diminution de la stabilité structurale avec l'intensité croissante des pratiques culturales est rapportée par plusieurs auteurs [6, 15, 16] ; elle s'explique par la destruction des agrégats et la minéralisation accrue de la matière organique causées par le travail du sol, ainsi que par les restitutions organiques souvent faibles sous culture (nos parcelles d'étude sous jachère ou après récolte étant

pâturées et brûlées, les restitutions organiques, hormis les cendres et les fèces des troupeaux, y sont principalement souterraines).

De la même manière, la stabilité des mottes, plus élevée sur sol brun vertique ou sous jachère que sur sol ferrugineux ou sous culture, peut être mise en relation avec les modes d'occupation ou avec les teneurs en argile et en matière organique. Toutefois, c'est surtout le poids de radicules qui apparaît comme un déterminant important de la stabilité des mottes. Si l'influence des constituants du sol sur la stabilité est importante à l'échelle des agrégats, l'importance des racines dans la stabilité de la structure aux échelles plus grossières est signalée par plusieurs auteurs [14, 17]. Nos résultats le confirment nettement.

Ruissellement et érosion

L'augmentation du ruissellement et de l'érosion avec l'intensité croissante des pratiques culturales est rapportée par différents auteurs, à partir de travaux sous pluies simulées [16, 18] ou sur parcelles d'érosion [19, 20]. Cela est mis en relation avec l'effet du mode d'occupation sur la teneur en matière organique et la stabilité structurale du sol, compte tenu de l'influence de ces paramètres sur la résistance du sol au ruissellement et à l'érosion. Nos résultats mettent également en évidence la relation qui lie le ruissellement avec la stabilité de l'agrégation et le taux de carbone de la couche de sol 0-10 cm, relation également signalée par d'autres auteurs [6, 21]. Nos résultats montrent que le ruissellement est étroitement lié à l'agrégation en année sèche, mais qu'en année humide, il faut également prendre le taux de carbone en considération. Tout cela peut être rapproché de résultats obtenus sous pluies simulées montrant que, lorsque la durée de la pluie augmente, le ruissellement devient moins dépendant de l'agrégation et est plus lié à la teneur en carbone [21] ; on peut supposer que les pluviosités élevées dégradent fortement la structure du sol superficiel, dont l'influence sur le ruissellement et l'érosion devient moins importante, tandis que l'influence des constituants (matière organique) s'exprime encore, ainsi que nous le constatons en 1999.

Nos données ne mettent pas en évidence de relation entre stabilité de l'agrégation et érosion, relation pourtant signalée par d'autres auteurs [6]. En revanche, pour la gamme de situations étudiées, la stabilité des mottes apparaît comme un déterminant important de l'érosion. Ce type de résultat reste relativement peu documenté dans la littérature, mais paraît pertinent. Nos données indiquent également que la

richesse des mottes en radicules, considérée en plus du ruissellement, est susceptible d'améliorer l'explication de l'érosion. Il est probable que la richesse en radicules reflète l'importance du couvert végétal, dont l'influence sur l'érosion est bien connue [22].

Les résultats de cette expérimentation montrent clairement l'intérêt complémentaire des deux tests simples de laboratoire pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion. Ils permettent aussi d'envisager la spatialisation des résultats acquis sur parcelles d'érosion à l'ensemble d'un bassin-versant représentatif de cette zone, en intégrant dans un système d'information géographique (SIG) des données relatives au type de sol, au mode d'occupation, au taux de matière organique, à la stabilité des agrégats et des mottes. De plus, les deux tests de stabilité sont réalisés sur de faibles quantités d'échantillons (4 x 4 g pour les agrégats, 15 à 30 x 4 g pour les mottes), et peuvent facilement s'intégrer dans les méthodes de routine d'un laboratoire d'analyses de sol, car ils nécessitent peu de matériel sophistiqué. Ils exigent un certain temps de travail au laboratoire, qui reste toutefois négligeable par rapport au temps nécessaire pour acquérir des données fiables sur parcelles d'érosion (trois à cinq années, en général).

Conclusion

Les travaux présentés s'intéressent à l'effet du type de sol (ferrugineux, brun vertique, peu évolué) et du mode d'occupation (jachère, labour, travail minimum) sur les propriétés de l'horizon superficiel (0-10 cm), le ruissellement et l'érosion en nappe, au Sud-Mali.

Nos résultats confirment d'abord que la teneur en matière organique et la stabilité des agrégats et des mottes tendent à diminuer avec la teneur en argile (et limons fins) et l'intensification du travail du sol. De même, appauvrissement en argile et intensification des pratiques s'accompagnent généralement d'une augmentation du ruissellement et de l'érosion.

Nos données mettent également en évidence des corrélations négatives entre stabilité des agrégats et ruissellement, d'une part, et entre stabilité des mottes et érosion, d'autre part. Ces résultats sont importants à deux titres. D'abord, ils confirment que les pratiques qui préservent ou améliorent la stabilité structurale de l'horizon de surface (restitutions organiques, notamment par les racines, travail du sol réduit) permettent de limiter le ruissellement et l'érosion ; cela contribue à étendre à de nouveaux milieux la validité des recommandations concernant les prati-

ques de conservation des eaux et des sols. Ensuite, ces résultats démontrent l'intérêt d'indicateurs d'érodibilité aisément mesurables en laboratoire (stabilité des agrégats et des mottes) pour évaluer le ruissellement et l'érosion, dont la mesure sur le terrain est souvent longue et coûteuse. Le test de stabilité des mottes, dont l'usage reste peu répandu, semble aussi intéressant que le test de stabilité des macroagrégats pour prévoir les risques d'érosion hydrique en milieu soudanien : l'étude des mottes est plus longue et requiert un poids d'échantillons plus important, mais exige peu de matériel de laboratoire. ■

Remerciements

Jacques Gigou est vivement remercié pour sa relecture attentive d'une version antérieure de cet article et pour ses propositions d'amendement.

Références

- Pieri C. *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération ; Cirad-Irat, 1989, 444 p.
- Diallo D. *Érosion des sols en zone soudanienne du Mali. Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger)*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 2000, 202 p.
- Ogunwale JO, Raji BA, Adeaoti AA, Adeoye KB, Ogunlela VB. Effect of tillage on surface soil conditions and yield of late sown cotton in northern Nigeria. *African Soils* 1999 ; 29 : 25-32.
- Morel R. *Les sols cultivés*. Paris : Lavoisier, 1989 ; 373 p.
- Diallo D, Keita D. Étude de l'état structural de l'horizon superficiel du sol de bas glacis de la zone de savane du Sud Mali. *Revue Malienne de Science et Technologie* 2001 ; 5 : 4-16.
- Barthès B, Azontonde A, Boli Z, Prat C, Roose E. Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *Eur J Soil Sci* 2000 ; 51 : 485-95.
- Rouiller J, Souchier B, Bruckert S, Feller C, Toutain F, Vêdy JC. Méthodes d'analyses des sols. In : Bonneau M, Souchier B, eds. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*. Paris : Masson, 1994 : 619-52.
- Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In : Klute A, éd. *Methods of soil analysis, Part 1, Agronomy Monograph*. Madison (Wisconsin) : Am Soc Agron - Soil Sci Soc Am 1986 ; 9 : 425-42.
- Barthès B, Roose E. La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles. *Coh Agric* 2001 ; 10 : 185-93.
- Mc Calla TM. Waterdrop method for determining stability of soil structure. *Soil Sci* 1945 ; 58 : 117-23.
- Feller C, Beare MH. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.
- Le Bissonnais Y. Soil characteristics and aggregate stability. In : Agassi M, éd. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York : Dekker, 1996 : 41-60.
- Amézketa E. Soil aggregate stability : A review. *J Sustainable Agric* 1999 ; 14 : 83-151.
- Baldock JA. Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In : Huang PM, Bollag JM, Senesi N, eds. *Interactions between soil particles and microorganisms : Impact on the terrestrial ecosystem*. Chichester (GB) : Wiley & Sons, 2002 : 85-131.
- Quantin P, Combeau A. Relation entre érosion et stabilité structurale du sol. *CR Acad Sci Paris* 1962 ; 254 : 1855-7.
- West LT, Miller WP, Langdale GW, Bruce RR, Lafflen JM, Thomas AW. Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia piedmont. *Soil Sci Soc Am J* 1991 ; 55 : 460-6.
- Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J Soil Sci* 1982 ; 33 : 141-63.
- Bradford JM, Huang CH. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Till Res* 1994 ; 31 : 353-61.
- Roose E. Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Coh Orstom Sér Pédol* 1983 ; 20 : 327-39.
- Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *FAO Soils Bull* 1994 ; 70 : 420 p.
- Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion ; validation at several levels. *Catena* 2002 ; 47 : 133-49.
- Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to erosion planning*. USDA Agriculture Handbook, 537. Washinton (DC) : USDA, 1978, 58 p.

Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc)

Abdellah Laouina¹
 Céleste Coelho²
 Coen Ritsema³
 Miloud Chaker¹
 Rachida Nafaa¹
 Imad Fenjira¹
 Mustapha Antari¹
 Antonio Ferreira²
 Simone Van Dijk³

¹ Chaire UNESCO-GN,
 « Gestion de l'environnement
 et développement durable »,
 Faculté des lettres et sciences humaines
 BP 1040,
 Rabat
 Maroc

² Departamento de Ambiente e
 Ordenamento,
 Université d'Aveiro,
 P-3810-193
 Aveiro
 Portugal

³ Institut Alterra,
 Centre des sciences du sol,
 P.O. Box 47
 6700 AA Wageningen
 Pays-Bas

Résumé

Dans le contexte des environnements semi-arides fragiles, la vulnérabilité au changement, qu'il soit d'origine climatique ou lié aux transformations dans l'utilisation des terres, est très grande et la menace de crise hydraulique et de dégradation, une réalité. L'observation de terrain, la simulation de pluie et la mesure de paramètres divers ont permis, dans le bassin-versant de Matlaq, dans la région de Rabat, de situer les sites fragiles et les causes de fragilité et de modéliser le comportement hydrologique de ce bassin-versant, en fonction de la variabilité du climat et de l'utilisation des sols. L'analyse des statistiques pluviométriques indique une tendance à l'exagération de la variabilité, notamment en automne. A cette saison, la vulnérabilité est accentuée du fait du caractère dénudé des pentes, de la mauvaise gestion des restes de cultures et de techniques agricoles inadéquates. Des recommandations en termes de recouvrement végétal et de gestion technique des parcelles de cultures découlent de ces analyses, dans le but de mieux tirer profit des précipitations et d'éviter les dégradations qu'elles peuvent occasionner.

Mots clés : Agriculture ; Hydrologie ; Érosion ; Maroc.

Summary

Soil water dynamics and land management under global change in a semiarid Mediterranean area (Rabat, Morocco)

Semiarid land on the southern fringe of the Mediterranean is threatened by water shortage and soil degradation due to global climate change and transformations in land use. These threats were identified in a small upland catchment (70 hectares) under dry cereals and grazing in Morocco (Rabat region) as a function of observed trends in historical climate data and transformations of land management practices. The hydrological response of the catchment was studied using rainfall simulation tests, soil moisture measurements and surface runoff modeling. Areas sensible to degradation were identified using field observations of vegetation cover, soil surface condition, soil type, land use type and land management, and phenomena of surface runoff and erosion as a function of the configuration of the fields. The analysis of historical climate data demonstrates a large variability in rainfall and an increase of rainfall intensities at the start of Autumn. At this time of the year, the fields are most vulnerable to soil moisture depletion and degradation (crusting, erosion) due to a missing vegetation cover, deficient organic matter management and inadequate tillage techniques. The study comes to recommendations with regard to vegetation cover, mulching and tillage in order to better exploit the autumn rains for crops and to reduce land degradation.

Key words: Agriculture; Hydrology; Erosion; Morocco.

Problématique

Dans le contexte de rareté de l'eau des pays méditerranéens semi-arides, notamment dans les milieux d'où sont absentes des techniques efficaces de gestion des terres et des eaux, la vulnérabilité aux changements climatiques et la fragilité face aux transformations agro-pastorales est accentuée [1-3]. La vulnérabilité au changement est réelle et comporte à la fois une dimension hydrique (pénurie de la nappe phréatique), une dimension agraire (chute des rendements) et environnementale (fragilisation des sols et recrudescence de l'érosion). Le risque existe d'une pénurie plus prononcée, d'une concurrence exacerbée irrigation/alimentation en eau potable, mais aussi risque de l'accentuation des catastrophes naturelles (crues, érosion des sols). L'urbanisation rapide augmente les risques, du fait de l'emprise foncière, des besoins en eau et de la transformation de l'agriculture suburbaine (extension de l'irrigation, choix pour des productions fortement consommatrices en eau) ou de l'implantation de nouvelles activités comme l'industrie ou le tourisme [4].

Dans ces milieux, par ailleurs, les modes de gestion des terres sont parfois inadéquats, avec des pratiques qui accentuent la vulnérabilité des terrains. Les transformations agraires en cours peuvent exagérer les dynamiques hydriques, notamment le ruissellement et l'érosion, en particulier, là où manquent des techniques de stockage et d'utilisation des excès d'eau de pluie [5-7]. La rupture coloniale et la modernisation des techniques agricoles sont aussi en cause, avec la mécanisation, parfois inadaptée, et l'augmentation de la pression sur les terres et les ressources végétales. Ces dynamiques renforcent la situation de pénurie de l'eau *in situ* (réduction de l'infiltration) comme en aval (envasement des retenues) [8, 9].

La perspective de changement global menace donc d'une crise hydraulique et de dégradation des terres (localement, risque de désertification). La plus grande fréquence d'événements pluvieux extrêmes entraînera sans doute une dégradation renforcée. L'assèchement comme le réchauffement prévus dans les pays semi-arides de l'Afrique du Nord [10] risquent d'entraîner un déficit en eau plus élevé au niveau du sol (plus grande fragilité) et une moindre infiltration (moins d'alimentation de la nappe phréatique). La crise hydraulique entraînera une situation de concurrence que seul pourra résoudre l'effort en vue d'améliorer la production par une irrigation plus efficace, dans le but de répondre aux autres besoins, notamment

celui d'améliorer la qualité de la vie en généralisant l'alimentation en eau potable.

C'est pourquoi il faut renforcer les capacités d'adaptation à cette crise prévisible. Les perspectives doivent donc être formulées non seulement en termes d'adaptation, de changements à envisager en ce qui concerne les pratiques de gestion des terres et des eaux, mais aussi en termes de développement des capacités à gérer ces ressources par l'organisation sociale et la réforme institutionnelle.

Sur le terrain, le risque de dégradation comme celui de vulnérabilité aux changements climatiques sont peu perçus. Cette perception est pourtant fondamentale pour une planification participative. Les capacités de la société locale à se saisir de la gestion de l'eau et à s'organiser en conséquence sont limitées du fait des attitudes individualistes. Or, il faut générer de nouveaux dispositifs de gestion de l'eau et d'économie de l'eau. La mise en place de techniques agraires protectrices du sol est limitée.

L'objectif de cet article est de démontrer la vulnérabilité des terres agricoles marocaines au changement climatique par l'analyse du changement des précipitations, des transformations des activités agro-pastorales et enfin des propriétés hydro-morphologiques, à l'échelle d'un micro-bassin. Le micro-bassin choisi couvre 60 hectares et se trouve en milieu semi-aride, en bordure d'une retenue de bar-

rage, avec un relief collinaire, dans une zone agricole à l'intervalle entre la forêt de la Mamora au nord et la forêt des Sehouf, au sud, à 20 km de Rabat-Salé (figure 1). La région est caractérisée par une économie agraire en bour, assez récente (moins d'un siècle), mais en pleine transformation, et par une dynamique environnementale importante, avec des risques de ruissellement, d'érosion et d'appauvrissement des sols sur les versants, de crue et d'incision sur le talweg.

Méthode

L'analyse du changement des précipitations est fondée sur des données de pluviométrie de la station météorologique de Rabat-Salé sur la période 1980-2002 (MARS Crop Yield Forecasting System, JRC). L'analyse repose sur une tendance au changement en termes de concentration des pluies et de fréquence d'intensité selon les saisons.

Les transformations des activités pastorales ont été étudiées par des observations et enquêtes afin de connaître les pratiques d'utilisation des sols et de gestion des eaux, et par des entretiens pour identifier la perception des populations, leur disponibilité à s'organiser, à participer et à changer de pratiques, en vue d'un développement durable.

La pluie et les débits du micro-bassin ont été enregistrés continuellement depuis

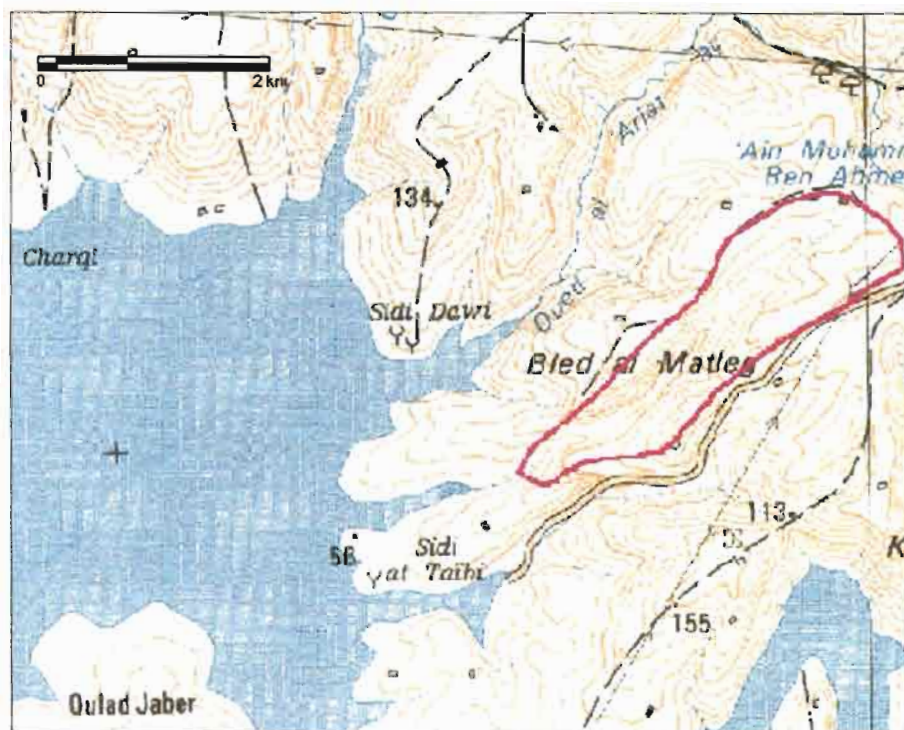


Figure 1. Localisation du micro-bassin expérimental de Matlaq (sur les bords de la retenue du barrage du Bouregreg).

juillet 2001 par, respectivement, un pluviographe digital *data logger*, un pluviographe mécanique et une station hydrologique, avec un déversoir en V (*V-notch*). Le *V-notch* a été construit d'après des normes citées par By *et al.* [11] et est équipé d'un limnigraphe enregistreur.

Le couvert végétal et les états de surface sont considérés comme des paramètres importants pour la compréhension du comportement des versants face au ruissellement [12, 13]. Leur variation spatiale et leur développement au travers de l'année culturale ont été suivis par un échantillonnage sur 10 parcelles représentant la variation topographique, les types de sols et les occupations de sols existant dans le micro-bassin. Chacune de ces dix parcelles a été à son tour échantillonnée aléatoirement en dix micro-parcelles de 1 m², à l'intérieur desquelles on procède à des mesures régulières des paramètres de surface comme la végétation [14], la croûte de battance et la pierrosité. Ces dix grandes parcelles ont fait aussi l'objet de mesures de texture des sols, de stabilité des agrégats, de rugosité de surface, de cohésion et d'humidité. La variation spatiale et le développement de l'humidité des sols ont été suivis par des mesures TDR sur trois transects à 20 m de distance et sur des intervalles de 0-6 et de 10-16 cm de profondeur.

Certaines propriétés hydrologiques des terrains ont été recherchées comme l'évolution de l'imbibition des sols, la capacité d'infiltration, les coefficients de ruissellement et l'érosion à l'aide de simulations de pluie. Deux campagnes de simulation de pluies ont été effectuées à deux stades différents d'humidité, en utilisant un simulateur de pluie type « Cerda » [15] d'une intensité de l'ordre de 50 mm/h sur une micro parcelle de 0,25 m². Les eaux de ruissellement avec la matière en suspension sont recueillies toutes les 5 minutes ; l'humidité est enregistrée toutes les minutes sur l'intervalle de 0 à 6 cm avec TDR.

Le comportement hydrologique du micro-bassin a été modélisé avec LISEM, un modèle dynamique et distribué [16, 17] afin de reconstruire la répartition spatiale du ruissellement et de l'érosion, et l'évolution du ruissellement pendant un événement pluvieux. Les variables de sortie intégrales d'intérêt sont le volume ruisselé total du bassin, le débit de pointe à l'exutoire, le temps d'arrivée à l'exutoire du débit de pointe et le coefficient de ruissellement.

L'étalonnage du modèle pour des événements donnés permet de comprendre le comportement hydrique et hydrologique du bassin-versant face aux différentes situations d'humidité et d'occupation du sol. L'étalonnage a été effectué de façon stochastique : 100 combinaisons des pa-

ramètres du modèle ont été choisies de manière aléatoire, parmi les gammes de paramètres observées. Les résultats de modélisation ont été évalués pour ces 100 paquets de paramètres dans une analyse d'incertitude réalisée à l'aide du logiciel GLUEWIN [18].

Le changement climatique

Sur 23 ans (1980-2002), les jours pluvieux (> 0,1 mm) sont au nombre de 1 784 et le nombre de jours ayant reçu plus de 5 mm de pluie s'élève à 794, soit une moyenne de 26 jours par an. En été, ces journées de pluie importante sont très rares (14 jours en 30 ans). L'automne en compte 186, soit 6 par an en moyenne, l'hiver 394, soit 13 jours sur les mois de décembre à février et chaque printemps, moins de 7 jours.

Les intensités journalières moyennes sont globalement faibles, du fait de la nette prédominance des journées à pluies faibles (moins de 1 à 2 mm). Mais si on ne

tient compte que des journées à pluies significatives (> 5 mm), les intensités tournent en moyenne autour de 13 à 15 mm/j, du fait de la concentration des pluies certaines journées particulières.

L'analyse fréquentielle des pluies mensuelles de la station de Rabat montre que le début de la saison des pluies (saison d'automne) comporte la plus grande variabilité, notamment les mois de novembre et décembre (figure 2). C'est justement une période cruciale pour le fonctionnement hydrologique des versants et des talwegs, puisque les champs sont encore dénudés. Les pluies d'automne (du 16 septembre au 30 novembre) sont en effet caractérisées par leur très forte variabilité : dans 50 % des cas, les journées sont absolument sèches, mais les cas de pluie intense sont multiples et causent des dommages hydrologiques importants. Ce sont les pluies d'automne qui comportent les intensités les plus fortes. Et, c'est dans cette saison que l'on décèle une tendance au changement (figure 3). Si on sélectionne les journées de pluie de plus de 5 mm, la moyenne d'inten-

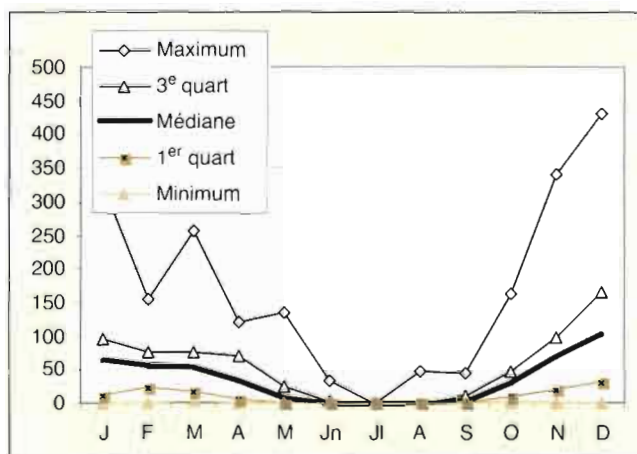


Figure 2. Fréquences de pluviométrie mensuelle à Rabat (1974-2002).

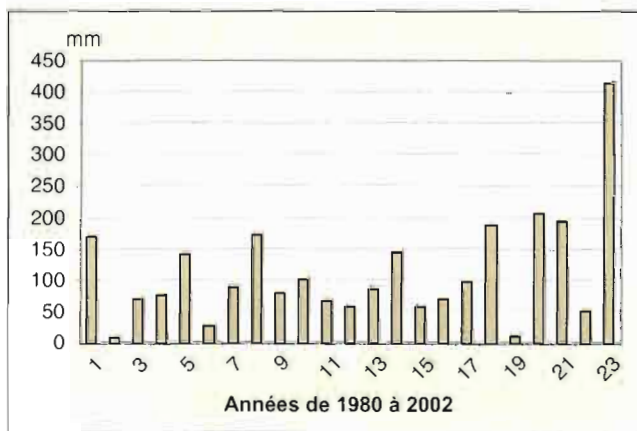


Figure 3. Hauteur de la pluie d'automne du 16 septembre au 30 novembre de 1980 à 2002.

sité journalière, sur les trois dernières décennies indique un regain très net de concentration, les dix dernières années, avec une intensité moyenne qui s'élève à 20,4 mm/jour de pluie, alors que ce chiffre tournait autour de 14 depuis 1973. Les autres saisons ne montrent pas de tendance réelle au changement.

Les journées pluvieuses réellement intenses en automne (> 30 mm) sont au nombre de 28, en 30 ans. Sept d'entre elles ont été enregistrées en 2002, 3 en 1999 et 2 en 2005. L'année 2001 a eu des pluies plus tardives (en décembre), mais tout aussi concentrées. L'automne 2002, à lui seul, a enregistré une pluviosité mensuelle record de plus de 400 mm.

Cette concentration automnale a sans doute un effet hydrologique et environnemental, car elle coïncide avec une période de nudité des terrains.

Les transformations des activités agropastorales et leurs effets hydrologiques

Dans les régions semi-arides, l'impact du changement climatique et de l'irrégularité des pluies, en termes de gestion d'eau, à l'échelle du champ, peut être plus ou moins atténué en fonction des façons culturales et des itinéraires techniques.

Dans le bassin de Matlaq, la gestion de l'eau pluviale varie non seulement d'un paysan à l'autre, mais aussi d'une parcelle à l'autre, en relation avec les types de cultures, les techniques de labour et les formes de gestion de matière organique. C'est pourquoi les réponses hydrologiques semblent être plus ou moins agressives, non seulement en relation avec les conditions naturelles, différentes d'un secteur à l'autre – à savoir les formes topographiques, les caractéristiques des sols, l'exposition des versants – mais aussi suivant les techniques et les façons culturales.

Nous disposons d'un référentiel technique important à partir du moment où les méthodes et techniques ancestrales ont été conservées et pratiquées, en parallèle ou en alternance, avec des techniques modernes.

Le travail a été d'identifier ces types de techniques, d'essayer d'expliquer leur persistance et de voir dans quelle mesure les paysans tentent de les adapter aux nouveaux contextes.

Dans cet axe, seront développés les aspects suivants :

- aperçu historique sur les transformations des activités agropastorales ;
- identification des types de techniques agricoles et leurs impacts sur les réponses hydrologiques ;

– adaptation ou inadaptation des activités et stratégies paysannes au changement climatique.

Aperçu historique sur l'évolution des méthodes de gestion des terres dans la tribu Shoul

Il est important de mentionner deux phases importantes qui ont transformé les stratégies, les formes et les techniques de gestion des terres dans ce secteur.

• Phase coloniale (1912-1956)

L'avènement de la colonisation a nettement marqué le paysage agraire par la mise en place de nouveaux systèmes d'exploitation des terres. Au début du siècle dernier, les faibles densités humaines et les formes extensives d'exploitation du pays Shoul, ont donné aux colons français l'impression que ces terres restaient sous-exploitées et que ces paysans étaient peu ancrés et peu attachés à leur terre. Ainsi, autour de 10 % des terres de la tribu ont été accaparés par les colons. Cette phase a été marquée par un fort glissement des populations rurales vers les terres marginales, situées sur les rebords des plateaux. Depuis lors, la région a connu une transformation de la forêt et du matorral, sur les pentes fortes des vallées, en terre de la céréaliculture pluviale.

Rapidement, une grande partie de la population rurale s'est familiarisée avec de nouvelles méthodes de gestion des ressources et de valorisation des terres. Le renforcement du savoir-faire local, particulièrement en termes de mécanisation des travaux agricoles, a été une réalité, d'autant plus, que la plupart des colons ont pratiqué au départ, comme les populations locales, l'élevage et la céréaliculture pluviale, mais de plus en plus mécanisée.

• Appropriation citadine

La seconde phase a débuté avec l'avènement de l'indépendance qui a été marquée par l'implantation de fermes modernes par une bourgeoisie citadine. Cette nouvelle intervention s'est axée en particulier sur le développement des cultures irriguées à partir des eaux de la nappe phréatique. Ainsi, le phénomène de remplacement des populations rurales par des propriétaires citadins a continué, aboutissant à un exode rural important. En effet, la population de la commune des Sehoul, comptait 22 000 habitants en 1994, et seulement 19 000 habitants en 2002.

Ces deux événements ont abouti à des transformations importantes dans le paysage agraire en termes de formes d'occupation et de mécanisation des travaux agricoles.

Cependant, malgré ces importantes transformations, les méthodes et techniques tra-

ditionnelles de gestion des terres n'ont pas été éradiquées, particulièrement dans les cultures pluviales et les systèmes d'élevage, sur les rebords du plateau et les flancs des vallées. La persistance des techniques traditionnelles dans les activités agropastorales, ne peut être expliquée que par la forte imprégnation des populations par les modes et savoir-faire hérités.

Identification des formes de gestion des terres agricoles et leurs impacts hydrologiques

• Évolution de la gestion de la fertilité des terres

Autrefois, l'apport du fumier organique se faisait par le déplacement du paysan avec sa tente et son troupeau, à tour de rôle, d'une parcelle à l'autre, dans une organisation « communautaire », appelée *khalt*, ou d'une façon individuelle. Mais depuis le rétrécissement de l'espace vital par la sédentarisation et l'abandon de la tente en faveur de l'habitat en dur, seules quelques parcelles voisines des maisons continuent à recevoir le fumier organique. Cette hétérogénéité dans le traitement des parcelles, contribue à expliquer les comportements hydrologiques différents d'une parcelle à l'autre, comme d'un secteur à l'autre.

D'après le suivi de la gestion de la matière organique dans le bassin, il ressort que les résidus agricoles sont mal gérés. L'apport du fumier organique n'est réalisé que sur les parcelles se trouvant directement autour des maisons et sur certaines parcelles destinées à des cultures particulières. Comme le système d'élevage devient semi-intensif, fondé sur la complémentation, le fumier produit est mélangé avec des déchets organiques frais, nécessitant alors toute une technique de compostage que les paysans ne maîtrisent pas encore, ce qui peut réduire l'activité bactérienne et la qualité du fumier produit.

L'apport des engrais chimiques est de plus en plus important, quoique, ni la quantité ni la qualité du fertilisant utilisé, ne sont suffisamment maîtrisées.

En réalité, les paysans sont plus ou moins conscients de l'utilité du fumier en termes d'amélioration de la production et d'aération du sol et de capacité de rétention d'eau. Et comme le fumier est très recherché par les fermiers des secteurs irrigués environnants, plusieurs paysans procèdent à sa vente, et nous assistons ainsi à un transfert et une concentration du fumier dans certains secteurs.

• Évolution du parcellaire et ses effets hydrologiques

Les 48 parcelles se partageant les 60 hectares du bassin-versant sont de taille et de morphologie très variables d'une portion

du bassin à l'autre. Le milieu évolue vers un paysage de plus en plus morcelé par l'héritage et l'attachement à la terre, même en cas d'exode de tous les membres d'un foyer. On note aussi l'évolution rapide vers un paysage de plus en plus fermé, à la fois par les plantations de cactus sur les rebords des parcelles et par des clôtures en fil de fer. C'est en fait la fin de la vaine pâture collective. Par conséquent, certaines parcelles, non ou peu pâturées, peuvent garder un tapis de résidus de cultures, constituant un véritable mulch qui les protège contre l'agressivité des pluies automnales.

La morphologie des parcelles est aussi variable d'une portion de versant à l'autre. Cependant, la tendance globale est au partage entre héritiers, selon le sens de la pente : on obtient alors des parcelles longues et étroites. Nous avons essayé de chercher des corrélations entre le type de parcellaire et la répartition spatiale des formes d'érosion, car nous avons constaté que les bourrelets transversaux limitant les parcelles, jouent un rôle efficace dans le ralentissement du ruissellement et de l'érosion des sols. Dans les secteurs où les parcelles sont morcelées à mi-versant, par des bourrelets ou des haies vives, le ruissellement est ralenti, à l'inverse des parcelles continues le long du versant. Ces nuances peuvent donc expliquer la naissance du ruissellement et l'exagération des formes d'érosion dans certains secteurs et leur absence dans d'autres.

Les secteurs où la tendance actuelle est vers un micro-parcellaire, de plus en plus « bocager », sont donc ceux enregistrant une évolution dans le sens de la réduction du ruissellement.

• Itinéraires techniques, pratiques culturales et réponses hydrologiques

L'évolution des outils et des façons culturales, peut expliquer l'hétérogénéité de la répartition spatiale des formes d'érosion. Tous les versants connaissent de temps à autre des ruissellements aréolaires importants, à l'exception de certaines portions stabilisées par des haies en cactus, ou par des nappes de galets qui jonchent la surface de certains secteurs (aval immédiat de plans de terrasses alluviales).

Les éléments de plateau ont été anciennement défrichés et mis en culture, dès le début du XX^e siècle, alors que les versants marneux, aux sols relativement épais, ne l'ont été que tardivement. Quelques résidus de nappes de palmier nain subsistent encore, pour des raisons multiples, dans certains terroirs environnants.

L'occupation de l'espace se ressemble sur les rebords du plateau, du fait que les habitations occupent, souvent, les sommets des croupes, alors que les versants et bas-fonds sont cultivés. Un jardinage plu-

vial peut exister autour des habitations, particulièrement sur les versants exposés vers l'ouest.

Les cultures céréalières d'hiver occupent l'essentiel de l'espace agricole. L'orge est cultivée pour fournir un fourrage d'appoint à un élevage bovin semi-intensif. Les parcelles d'accès facile sont précocement labourées et semées en orge pour être pâturées, en remplacement de la jachère qui ne cesse de reculer.

Les cultures printanières, à caractère vivrier (fève, pois-chiche, maïs) sont pratiquées sur des parcelles au sol épais et aux potentialités hydriques importantes. Ces parcelles profitent aussi d'un apport permanent de fumier organique.

• Techniques de labour

La charrue ancestrale est maintenue, car irremplaçable dans certaines portions aux pentes fortes et surtout dans la préparation des petites parcelles destinées aux cultures maraîchères et printanières. Cependant, lorsqu'on compare la charrue en bois de la tribu des Shouls, à celle d'autres régions marocaines, on constate une grande différence dans les efforts d'amélioration et d'adaptation de l'outil. La charrue des Shoul est restée archaïque. Nous assistons actuellement, à l'abandon des portions de parcelles aux pentes fortes depuis que les bovins ne sont plus que rarement utilisés comme animaux de trait.

Le tracteur est de plus en plus introduit dans les rebords des plateaux, malgré le peu d'accessibilité à la machine. Le labour mécanisé est souvent effectué dans le sens de la plus forte pente à cause de la morphologie des parcelles, dictée par l'héritage. Le labour dans le sens de la pente peut multiplier par cinq le ruissellement et les pertes en sol, en comparaison avec le labour effectué selon les courbes de niveau [19]. Mais en cas de pluie excessive, il a été démontré que les sillons peuvent servir de drains, en évitant le confinement des sols, les arrachements, et l'appauvrissement des cultures suite aux engorgements. En plus des effets hydrologiques et érosifs du labour mécanisé, il faut noter que les impacts des aspects agronomiques ne sont pas à sous-estimer. En effet, on note la mauvaise levée des semences dans les parcelles labourées d'un seul tenant au tracteur, alors que les bas de versants, aux sols épais, peuvent être encore plus humides. En revanche, le labour à l'araire, se fait d'une façon graduelle, du sommet aux bas-fonds, en tenant compte de l'humidité de chaque portion de la parcelle à travailler. Ainsi, la levée des plants est homogène dans le labour traditionnel, à l'inverse de ce qui a été estimé dans le labour au tracteur, où les encroûtements et la prise en masse des sols, peuvent réduire jusqu'à 40 % le taux de levée.

Actuellement, les paysans sont conscients des effets négatifs de cette croûte de battance, et ils essaient d'y remédier par le passage d'une « griffe » traînée par un attelage. Il s'agit en fait d'une grille à griffes forgées, de 2 à 3 m² et qui a pour but de détruire les mottes, de racle les herbes arrachées et résidus de cultures, d'égaliser la surface et de briser la croûte de battance.

Toutes les parcelles destinées aux cultures printanières sont travaillées à l'araire. Le labour se fait donc dans le sens des courbes de niveau. De même, sur les portions des versants aux pentes fortes, là où le tracteur ne peut pas passer, les terres continuent à être travaillées à l'araire avec traction animale.

En revanche, dans les terres céréalières pluviales, et là où la topographie le permet, nous assistons à la généralisation du *cover-crop*¹. C'est ainsi que, sur le même versant, et parfois sur une même parcelle, le paysan fait appel à l'araire dans les portions aux pentes fortes et au tracteur dans les bas fonds et sur les sommets relativement plats.

Mesure et suivi hydro-climatique et hydro-morphologique, à l'échelle du site de Matlaq

Les observations et les mesures ont fait ressortir les caractéristiques suivantes :

- des ruissellements importants à la suite des événements pluviométriques particuliers (figure 4), avec transport de grosses quantités de matériel et de blocs décimétriques (figure 5) ; donc des débits instantanés élevés et une charge forte, malgré la modestie de taille du bassin-versant ;
- une tendance à l'incision du chenal principal en trait de scie ;
- un ruissellement aréolaire important quelle que soit l'humidité préalable des sols ; il est avant tout fonction de la nature des sols, de leur faible stabilité structurale et des états de surface et entraîne l'appauvrissement superficiel des sols, quoique inégal ;
- le fonctionnement des griffes est un seuil important dans la dynamique des versants. Les rigoles naissent surtout dans les champs fraîchement labourés, mais on les observe aussi sur de vieilles jachères abandonnées ;
- les terrains les plus secs (orientations sud) sont ceux qui portent les sols les plus fragiles (moindre proportion d'argile) et le couvert végétal le plus clair (moindre taux de matière organique). C'est là que l'insta-

1. Type de tracteur appelé aussi tracteur à disques.

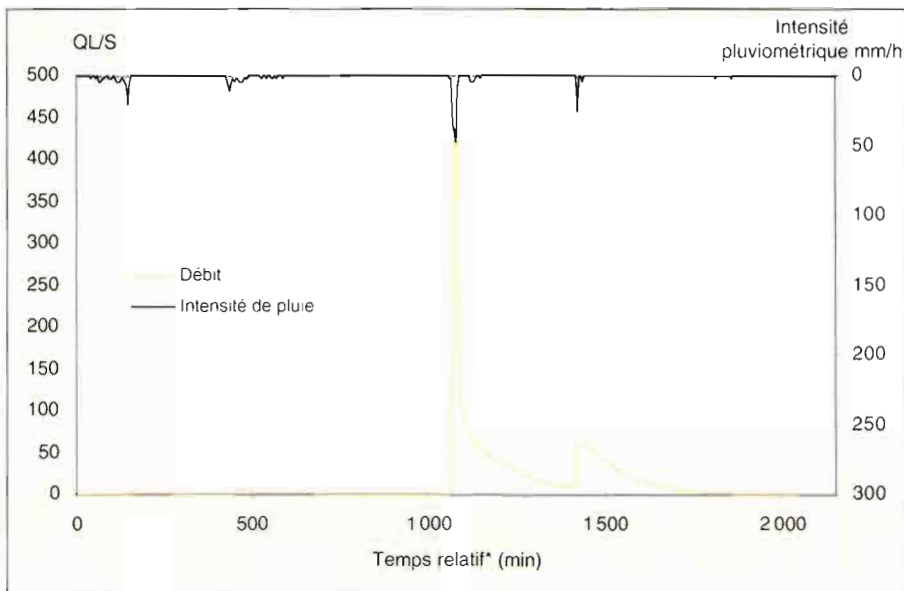


Figure 4. Débits à l'exutoire du bassin de Matlaq pendant l'événement pluvieux du 24-25 décembre 2001.

* Temps relatif (relative time) : temps réferé au début de l'événement.

bilité structurale explique l'organisation plus facile du ruissellement et le fonctionnement des griffes. Tout cela est conforté par les résultats de la modélisation hydrologique.

Mesure en station : comportement hydrologique du bassin-versant

Le bassin-versant de Matlaq se caractérise par un écoulement torrentiel ; les principales crues sont enregistrées au moment des précipitations à forte intensité, alors que dans la majorité des cas, le chenal d'écoulement reste à sec.

Généralement, l'écoulement dans le bassin est conditionné par un certain nombre de facteurs, notamment l'intensité des précipitations et le degré de couverture végétale du bassin. En effet, l'observation des crues enregistrées montre que les événements pluvieux de décembre 2001, d'une intensité de 48 mm/h sur un sol dépourvu de végétation, ont provoqué une crue instantanée mobilisant à l'exutoire un débit de 467L/s et des quantités importantes de sédiments (figure 4) et créant dans d'autres régions du pays des inondations catastrophiques. La même situation a été enregistrée en novembre 2002.

L'hydrographe de l'événement du 24-25 décembre 2001 (figure 5) montre la réaction immédiate du ruissellement à l'intensité de pluie de pointe ; le ruissellement prend moins de temps que l'intervalle d'enregistrement (5 minutes) pour arriver à l'exutoire.

Malgré leurs intensités, les précipitations enregistrées ultérieurement en saison hivernale ou printanière sur des surfaces protégées

par un couvert végétal dense, dépassant les 60 % de recouvrement, n'ont provoqué aucun ruissellement.

Analyse spatiale et temporelle dans le bassin-versant

À Matlaq, les sols sablo-limoneux, limono-argileux ou sablo-argileux caillouteux sont très sensibles à la battance ; ils peuvent, sous des pluies fortes (longues pluies d'hiver et violents orages), générer des ruissellements importants. En situation de pluie forte hivernale, toute la surface du bassin devient potentiellement génératrice de ruissellement. Mais le problème est de déterminer la contribution effective de chaque type de sol, de chaque type d'utilisation ou de technique de travail du sol dans ce phénomène du ruissellement.

- Répartition spatiale et développement du couvert végétal

On observe que la couverture est plus élevée en hiver qu'au printemps dans les cultures céréalières, tandis que dans les jachères, la couverture peut être maximale



Figure 5. Vue du déversoir comblé par les apports détritiques de la crue du 24-25 décembre 2002.

au printemps et minimale en hiver sur sols calcimagnésiques à tendance verticale.

- Caractéristiques physiques des sols et leurs états de surface

Les sols sont peu profonds (20-180 cm). L'infiltration des eaux de pluie est empêchée par des horizons de tuf calcaire ou par la roche-mère constituée de marne calcaire.

La couverture pédologique du bassin-versant se caractérise par la prédominance des sols peu évolués d'érosion ou d'apport et des sols fersiallitiques très limoneux à galets, exceptés quelques bas de versants exposés nord qui présentent un sol calcimagnésique à tendance verticale épais et argileux. Généralement ces sols sont très pauvres en matière organique (moins de 2 %).

Les états de surface de ces sols sont très variables dans le temps et dans l'espace et dépendent principalement des critères morpho-pédologiques (pente et types de sols) ; cela est vrai spatialement pour l'épaisseur des sols et la pierrosité, et spatio-temporellement pour l'humidité et la croûte de surface qui varient nettement entre les sommets des collines (terrasses) et le bas de versants (sur marne). La figure 6 montre le développement de l'encroûtement dans deux parcelles sous orge sur deux types de sols différents. L'encroûtement est maximal au printemps, avec l'assèchement des sols après la saison pluvieuse et se révèle plus important sur le sol fersiallitique que sur le sol calcimagnésique à mesure que l'hiver avance. En effet, les sols calcimagnésiques (bas de pentes) et bruns calcaires (dépôts de versants) sont plus argileux (40 % d'argile) et moins pierreux (moins de 5 %) ; ils gardent plus d'humidité et sont moins battants ; en revanche, les sols fersiallitiques à galets (terrasses surplombant le sommet des collines) sont très limoneux (plus de 70 % de limons), excessivement pierreux (pierrosité supérieure à 30 %) et très battants.

La rugosité de la surface est plus variable en hiver qu'au printemps. Dans les cultures céréalières, elle peut être plus ou moins élevée selon la saison, mais dans la jachère elle est plus élevée sur les sols fersiallitiques en hiver à cause de la couverture plus dense de végétation.

- Suivi de l'humidité des sols

Le bassin a été partagé en trois parties, en relation avec le paysage agricole, les formes d'occupation des terres et les types de sols. L'humidité des sols a été mesurée sur des transects transversaux qui se succèdent de l'amont vers l'aval du bassin (figure 7), sur des profondeurs de 0-6 cm et de 10-16 cm. Cinq campagnes de mesures ont été réalisées comprenant une phase sèche (26 mai 2002), deux phases

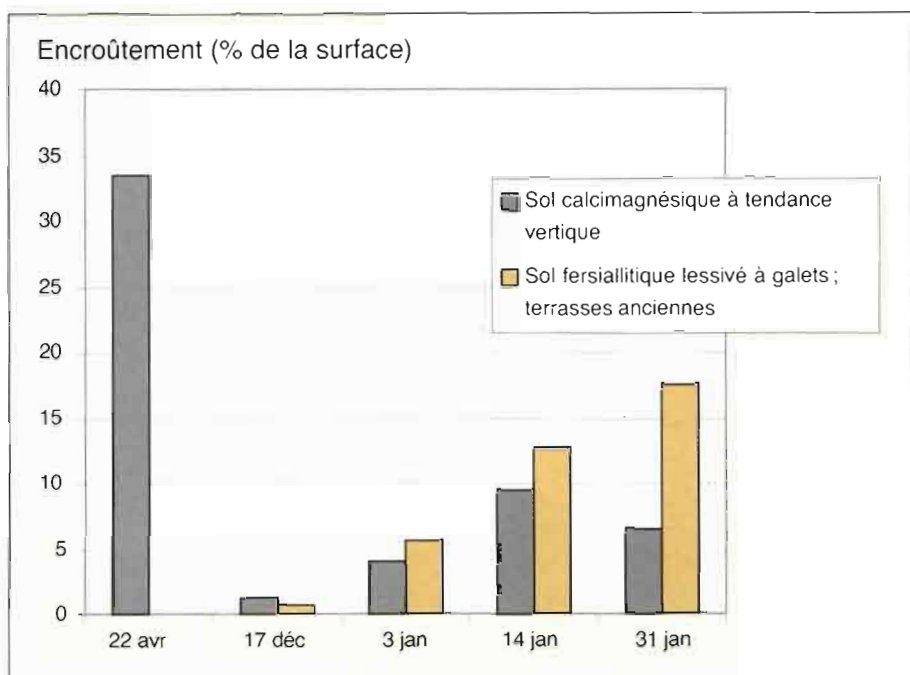


Figure 6. Développement de l'encroûtement dans des parcelles sous orge sur deux types de sol (2002-2003).

moyennement humides au début de l'automne (3 octobre 2002) et à la fin de l'hiver (5 février 2003), et une phase très humide (18 décembre 2002, 17 janvier 2003) (figure 8).

En comparant l'évolution de l'humidité entre les différentes phases et selon les transects, nous constatons que le versant ex-

posé au SE (mesures de 1 à 6) présente des valeurs d'humidité du sol faibles, comparé au versant exposé au NW. Pendant la phase sèche, toutes les valeurs s'homogénéisent et restent inférieures à 10 %. La phase moyennement humide au début de l'automne (3 octobre 2002) représente l'effet d'un ruissellement de surface impor-

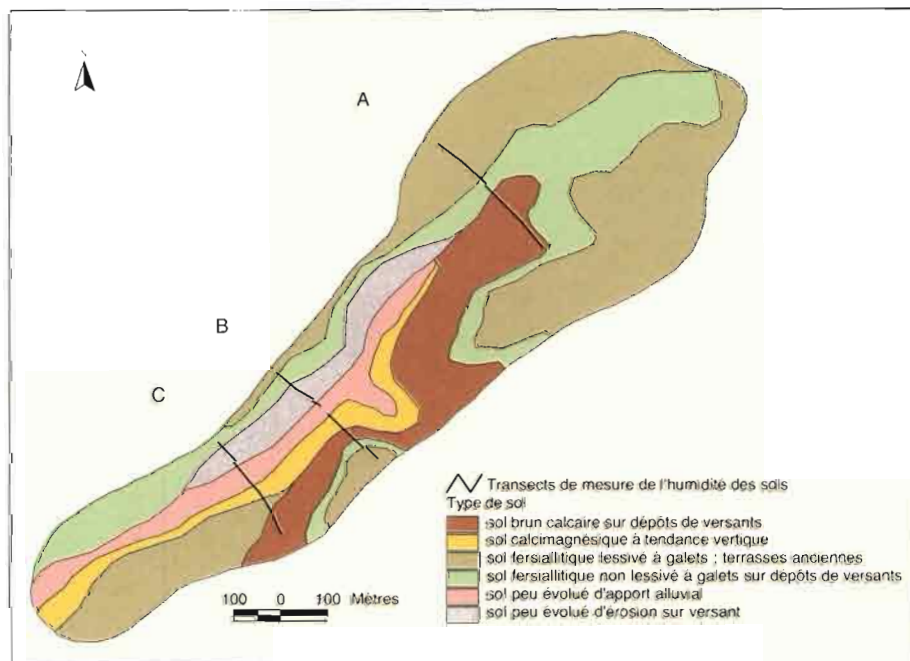


Figure 7. Localisation des transects de mesure de l'humidité des sols et types de sols dans le bassin de Matlaq.

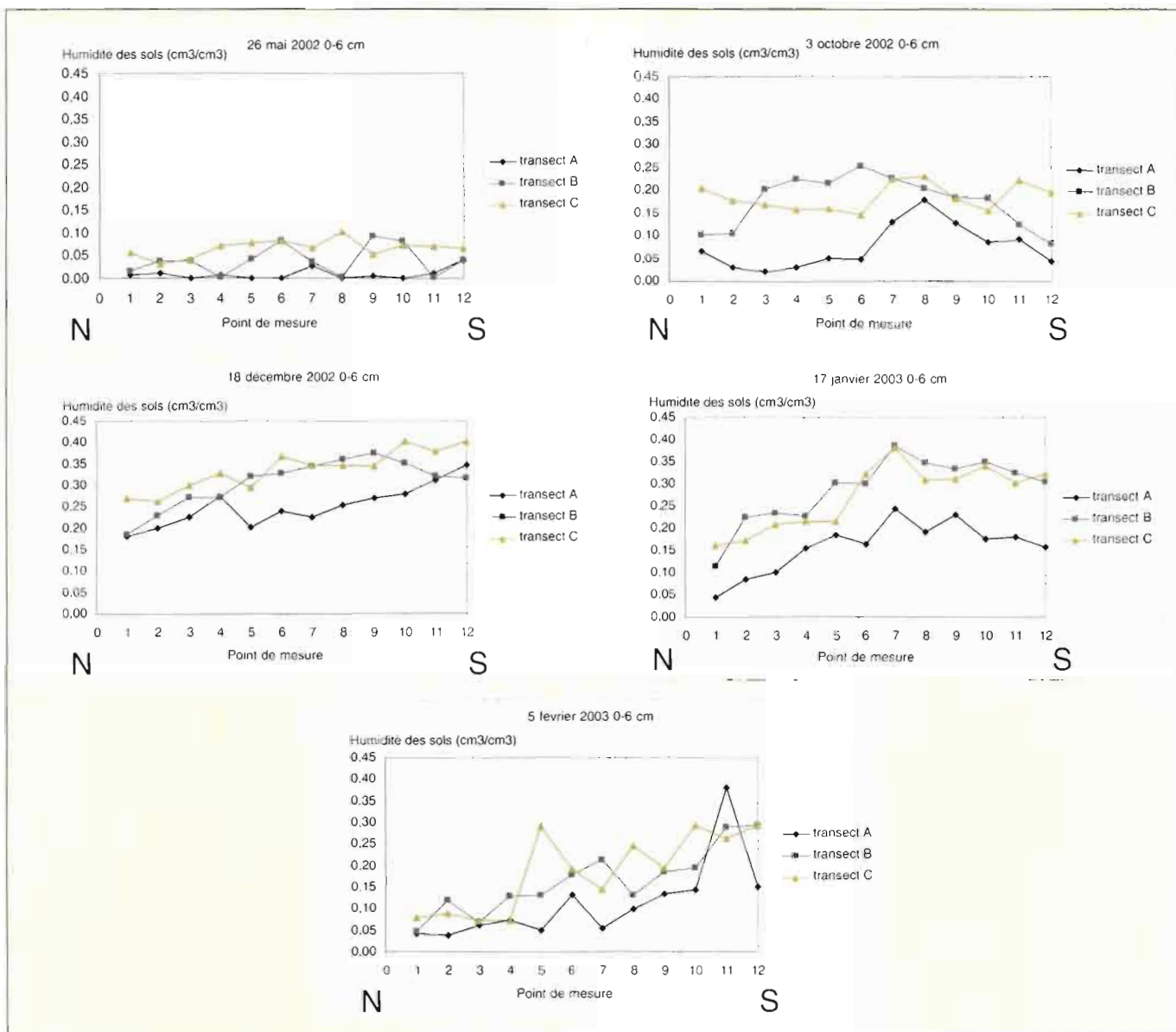


Figure 8. Humidité des sols le long des transects de mesure à 0-6 cm de profondeur, mesurée 5 fois, de mai 2002 à février 2003. Le fond de la vallée est représenté par les échantillons 6 et 7.

tant succédant aux premières pluies d'automne tombées deux jours avant (18 mm). Le ruissellement a causé une forte humidité dans le fond de la vallée. Cet effet n'est pas perceptible dans les mesures de la phase très humide (18 décembre 2002 et 17 janvier 2003), prises respectivement 7 et 8 jours après des événements pluvieux ayant provoqué un ruissellement de surface. Durant la phase très humide, les fortes valeurs sont rencontrées vers le haut du versant exposé au NW à cause d'une évaporation plus forte sur le versant orienté SE. Dans la phase moyennement humide à la fin de l'hiver (5 février 2003), des taux d'humidité moins élevés sont observés en raison d'une consommation croissante en eau des cultures.

On peut retenir, donc, que la répartition spatiale de l'humidité du sol est différente, d'un versant à l'autre, mais aussi d'une portion du même versant à l'autre, et par conséquent, on note les difficultés et l'impact négatif de travailler ces terres d'un seul tenant, comme c'est la tendance actuellement.

Simulation de pluies

Parmi les buts de la simulation, il y a celui de connaître les réponses hydrologiques des terres en fonction de leurs formes d'occupation. La jachère et la céréaliculture, restent les deux formes principales d'occupation dans ce bassin, mais la jachère prolongée gagne de la surface.

Le simulateur de pluie utilisé [15] est doté d'un gicleur calibré sur une intensité de 25-125 mm/h au-dessus d'une parcelle de 0,24 m². La facilité de la manipulation de ce dispositif et la possibilité d'effectuer des mesures répétitives à n'importe quel moment de l'année, permettent de bien analyser les comportements des sols sous différentes utilisations.

Pendant la saison sèche, l'humidité initiale du sol est inférieure à 10 %, mais il n'a fallu qu'autour de 2 mm de pluie pour que l'humidité augmente et se stabilise entre 30 et 35 % (figure 9). Pourtant, il y a des différences selon les types et les occupations de sols. Le front d'humidification progresse moins vite dans la couche superficielle des sols (6 cm) dans les sols

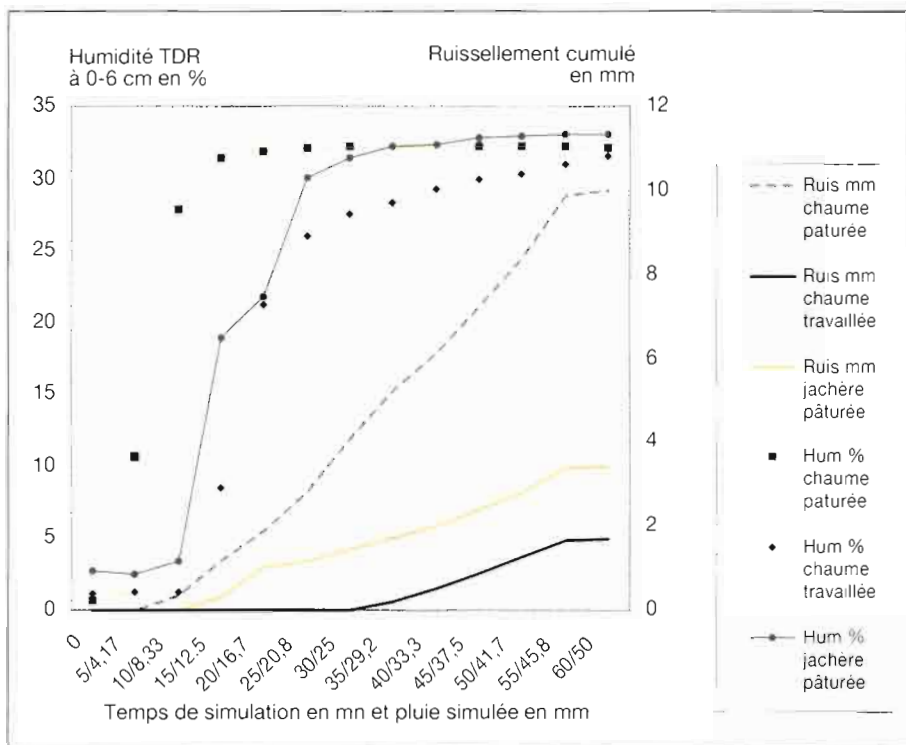


Figure 9. Résultat de simulation des pluies en saison sèche, évolution de l'humidité et ruissellement cumulé.

calcimagnésiques et dans les parcelles sur blé (après plus de 4 mm de pluie), indiquant que la vitesse d'infiltration y est moindre. La jachère, où le front s'approfondit après seulement 2,5 mm de pluie, fait exception, tandis qu'une vitesse d'infiltration plus faible y est attendue à cause de la compaction du sol par piétinement ; de ce fait, le coefficient de ruissellement y est élevé (22 %).

En revanche, lors d'une phase humide, l'humidité initiale tourne autour de 20 % dans toutes les formes d'occupation des terres. Un volume d'1 mm de pluie a été suffisant pour que la courbe d'humidité monte rapidement pour se stabiliser, cette fois-ci, entre 38 et 50 %.

Durant les phases sèches, des ruissellements peuvent se produire dans certaines formes d'occupation des terres avec des coefficients de ruissellement importants (figure 9). En revanche, après une phase humide, le ruissellement peut se déclencher d'une façon précoce, c'est-à-dire dès la cinquième minute de pluie, mais les volumes ruisselés ne sont pas plus importants que ceux des phases sèches.

• Humidité initiale

En saison sèche, l'humidité initiale est très basse dans la plupart des champs, mais on peut faire des distinctions entre les types de sol. Ainsi, dans les sols tirsifiés au fond de la vallée ou rendzineux, sols profonds et argileux, l'humidité initiale se situe

entre 8 et 9 % alors que dans les sols sableux à cailloutis, très répandus à l'amont et au centre du bassin, elle varie entre 1 et 4 %.

• Évolution de l'humidité

En saison sèche, le type d'utilisation ne semble pas influencer l'évolution de l'humidité ; le critère de différenciation est plutôt la nature du sol. Ainsi dans la partie amont du bassin où dominent les sols sablo-argileux très caillouteux, l'humidité extrêmement basse n'évolue qu'à partir de la septième minute de la simulation. La jachère ancienne très utilisée comme parcours a montré la même évolution. Mais la comparaison entre deux jachères, sur sols différents, montre que leur réaction est différente. Dès la vingt deuxième minute, la courbe d'humidité devient presque constante autour de 35 % d'humidité.

A l'aval du bassin, là où les colluvions et les sols sont marneux, plus structurés et plus épais, l'évolution de l'humidité a nettement changé d'un champ à l'autre. Dans le champ de chaume de maïs, sur sol tirsifié, travaillé à la sape, l'humidité de départ n'a évolué qu'après 10 minutes pour se stabiliser à 35 % à partir de la vingt cinquième minute (figure 9). La jachère sur un sol comparable, marque la même humidité initiale, mais dès la troisième minute l'humidité augmente d'une façon progressive jusqu'à stabilisation à 40 % à la trente troisième minute. Les

chaumes de céréales montrent aussi une humidification progressive qui débute dès la troisième minute.

Le ruissellement dépend essentiellement de la nature du sol, du type du couvert végétal et des états de surface (compacité, rugosité, fissuration, etc.). Ces aspects déterminent la capacité de l'infiltration et le déclenchement du ruissellement. Dimanche et Hoogmoed [20] ont trouvé des résultats comparables pour des sols limoneux sous blé sur le plateau du Saïs. Également, Yair et Kossovsky [21] ont prouvé que la genèse du ruissellement dans les régions semi-arides est d'abord contrôlée par les états de surface, plutôt que par les quantités de pluie tombées lors des événements pluvieux ou sur l'année [22].

La phase d'imbibition est tributaire de la nature du sol ; si le sol est bien aéré et filtrant cette phase est longue. Dans un sol filtrant, la capacité d'absorption de l'eau est supérieure au volume de pluie (50 mm). Dès que le sol comporte une croûte de battance, ou quand il est tassé, une lame d'eau se constitue à la surface et ruisselle.

En phase sèche, on a eu deux types de réactions. Les parcelles au sol sablo-argileux très caillouteux ont marqué une phase d'imbibition courte (13 minutes) pour des chaumes pâturées au sol piétiné. Le groupe des sols argileux à tendance verticale, en jachère ou au sol travaillé, n'a pas provoqué de ruissellement (figure 9).

• Évolution du ruissellement

L'observation de l'évolution du ruissellement a été faite selon un pas de temps de 5 minutes. Le coefficient de ruissellement diffère – comme le volume du ruissellement – d'une parcelle à l'autre. En septembre 2002, les coefficients ont été très variables mais ont révélé le rôle déterminant de la nature des sols : 0 % sur sols argileux, 18 à 30 % sur sols sablo-argileux caillouteux. En janvier 2003, c'est l'utilisation du sol et l'état de surface qui jouent un rôle important. Ainsi, une jachère de l'année couverte, n'a pas donné de ruissellement, contrairement à la jachère ancienne dont le sol est beaucoup plus tassé et fermé. Le labour frais arrive en seconde position après la jachère ancienne. La destruction des mottes par le labour a rendu le sol battant, d'où sa réaction rapide et importante à la simulation. Quant aux céréales, où les plants d'orge sont relativement hauts et denses, le ruissellement s'est manifesté mais sans avoir un caractère exceptionnel.

Les résultats de la simulation de pluie révèlent plusieurs situations :

1. Parfois c'est le sol qui est déterminant, notamment en période sèche quand les parcelles sont nues.

2. Parfois c'est l'utilisation, notamment pendant le cycle végétatif ou quand les sols ont subi des interventions, tel le labour (à l'araire, à la sape ou labour au tracteur).

3. Après les pluies de novembre et décembre 2002 très importantes, les mottes des sols humides ayant fondu, sur toutes les parcelles cultivées, le ruissellement s'est activé.

4. Les sols ont une faible capacité d'emmagasiner l'eau ($0,32-0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pour les sols fersiallitiques, mais plus élevée pour les sols calcimagnésiques ($> 0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) à cause de leur taux d'argile élevé); ainsi, les différentes pratiques introduites et les conditions climatiques influencent facilement et rapidement leur comportement hydrique.

5. Cette variabilité entre les réactions des différentes utilisations, due à une alternance de traitements, représente des relais d'arrêt du ruissellement le long des versants permettant aux sols de retenir une partie de l'eau lors de son passage d'un champ à autre. C'est ce que l'on remarque lors du printemps où des pluies fortes mais régulières n'ont pas laissé de griffes sur les champs.

6. En revanche, la monoculture, le long d'un versant, est beaucoup plus génératrice d'un ruissellement notamment sur les pentes fortes.

Modélisation du comportement hydrologique du bassin-versant

Le volume total ruisselé et le coefficient de ruissellement sont sous-estimés dans la majorité des cas avec le modèle LISEM, mais le temps jusqu'au débit de pointe est surestimé. Ces observations indiquent que le ruissellement souterrain dans des macropores [23] ne joue pas dans le bassin. Ce processus n'est pas décrit dans LISEM, et s'il avait été significatif dans le bassin, le ruissellement aurait été surestimé et le temps du débit de pointe sous-estimé [24]. En revanche, la sous-estimation du ruissellement et la surestimation peuvent être expliquées par l'effet de battance, non décrit dans LISEM, qui réduit l'infiltration et rend la surface moins résistante au ruissellement. La battance a été montrée comme importante sur les sols fersiallitiques limoneux dans le bassin. Mais en omettant l'infiltration de la modélisation (assumant que la pluie ne peut pas s'infiltrer), le débit de pointe est simulé trop tard (figure 10), indiquant que le stockage en eau en surface et la résistance hydraulique sont encore plus faibles que représentés dans les paramètres du modèle. Cela souligne la vitesse exceptionnelle de l'écoulement superficiel.

L'analyse d'incertitude du coefficient de ruissellement montre que la valeur obser-

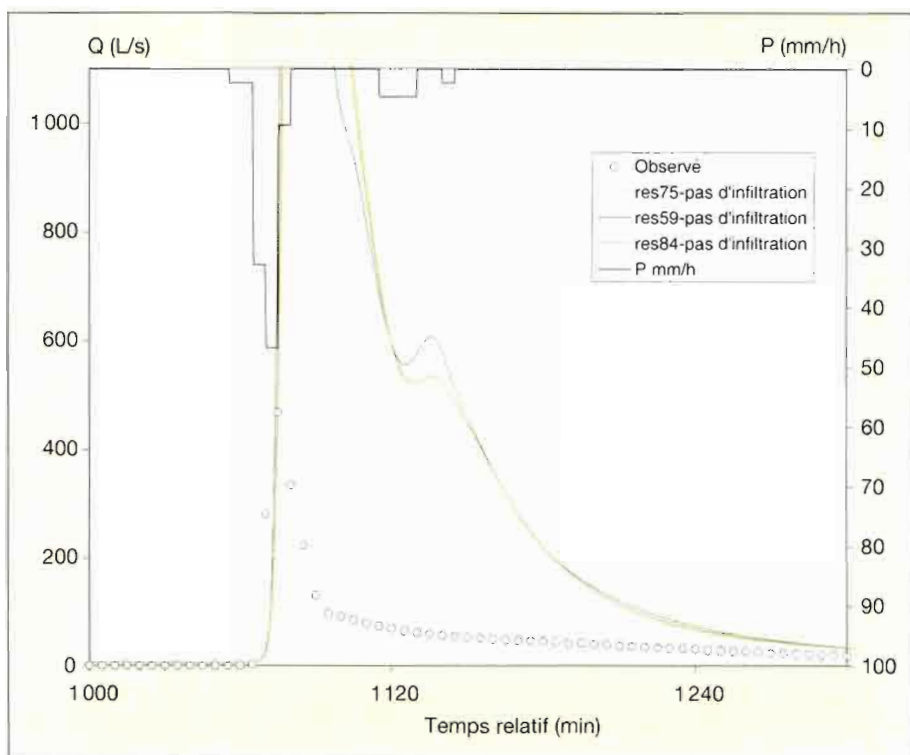


Figure 10. Débit observé à l'exutoire du bassin de Matlaq (points ouverts) et simulé sans infiltration (courbes) en trois reprises avec LISEM pour l'événement pluvieux du 24-25 décembre 2001.

vée (7,6 %) est comprise dans un intervalle de fiabilité à 90 % de valeurs simulées entre 4,9 et 8,5 % (0,049 et 0,085 mm/mm) (figure 11).

Les reprises les plus vraisemblables résultant de l'analyse d'incertitude montrent

que le ruissellement se produit dans la partie centrale du bassin, sur les deux versants, en dépit de l'effet de l'exposition représenté dans la carte d'humidité initiale. L'existence de ruissellement sur le versant sud du petit affluent et sur le versant

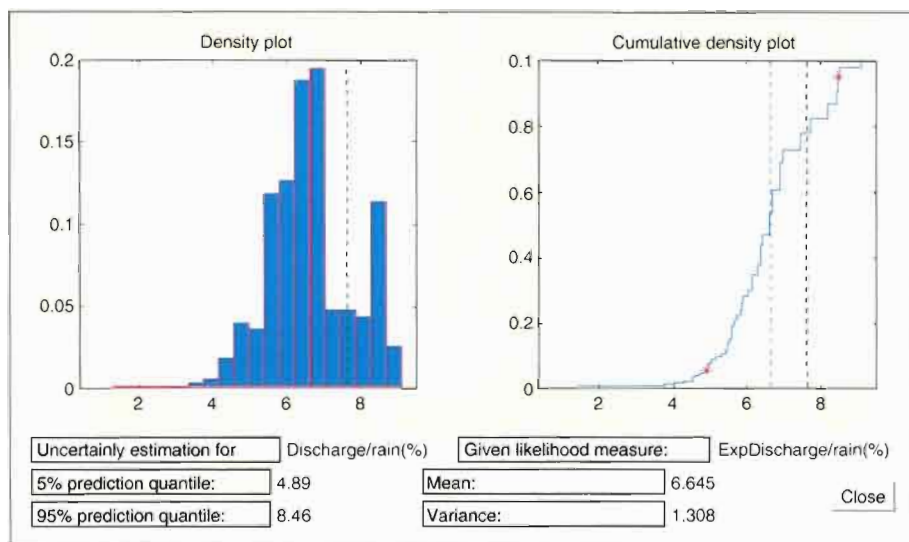


Figure 11. Intervalle de fiabilité (90 %) du coefficient de ruissellement simulé avec LISEM dans 100 reprises pour l'événement pluvieux du 24-25 décembre 2001.

Lignes rouge et bleue interrompues : moyenne des reprises ; ligne verte interrompue : valeur observée ; points rouges : limites de fiabilité de 5 % et 95 %.



Figure 12. Observations de phénomènes d'érosion sur le terrain démontrant l'existence de ruissellement sur quelques endroits dans le bassin de Matlaq comme simulé par LISEM.

orienté SE au milieu du bassin est démontré par des observations de terrain de phénomènes d'érosion (figure 12). Les répartitions spatiales du ruissellement se montrent surtout dépendants de la répartition spatiale de la conductivité hydraulique saturée. Si ce résultat concorde avec la nature des processus, en réalité, l'importance accordée aux états

de surface dans la recherche hydro-morphologique est justifiée.

Comportement hydrologique du bassin-versant, en fonction de l'utilisation des terres

Les formes d'érosion telles que les griffes et rigoles peuvent être rapidement effacées

par le labour. Le suivi de ces processus confirme l'effacement d'un chevelu de griffes et rigoles constituées particulièrement dans le labour frais. Ces griffes s'activent principalement sur les versants exposés au sud et sud-est (encadré 1). Mais en fait, si le travail de la terre permet de masquer l'effet de l'érosion sur les versants, le ruissellement concentré s'impose en produisant des incisions vives et profondes dans les basses terrasses et les fonds des vallons. Ces formes d'érosion vives confirment l'agressivité récente du ruissellement.

Pour spatialiser les effets de chaque technique de culture, il est nécessaire de travailler à l'échelle de la parcelle. Ainsi, la confrontation des cartes des formes d'érosion et de morphologie des parcelles, à celles des techniques et façons culturales, montrent que lorsque le labour est encore frais, les pluies automnales à caractère orageux, favorisent le développement des griffes et rigoles à caractère saisonnier, et cela même dans le labour effectué à l'araire et selon le sens des courbes de niveau. Les terres en jachère peuvent produire des ruissellements importants, mais avec moins de pertes en sol. Dans les parcelles destinées aux cultures printanières, les ruissellements sont rares et peu agressifs. Mais là encore, quelques événements pluviométriques durables, peuvent entraîner des arrachements suite à des engorgements.

Les sols cultivés dans le bassin Matlaq restent peu couverts pendant une certaine période de l'année (automne et début de l'hiver) qui peut être critique si les pluies sont abondantes et intenses, notamment dans les champs où les états de surface sont favorables à la formation et à la concentration du ruissellement. Ainsi, les plus importantes crues enregistrées durant les deux dernières années montrent que ces événements coïncident avec les premières pluies succédant à la saison estivale sèche durant laquelle les parcelles sont en chaume, mais intensément piétinées ou labourées précocement, donc dépourvues de toute protection végétale.

Il semble donc que les transformations du paysage agricole et des activités agropastorales, peuvent expliquer, les crises hydrologiques qui ont tendance à se produire particulièrement durant la saison d'automne. Parmi les éléments explicatifs on peut noter :

- la réduction du couvert végétal permanent, suite aux défrichements ;
- la faible stabilité structurale des sols, à cause du faible apport de fumure organique, et du taux d'humidité bas en été [25] ;
- le surpâturage des chaumes et le ramassage excessif des résidus de cultures pour répondre aux besoins d'un troupeau de

Encadré 1



Les premières pluies d'automne peuvent causer de gros dommages aux champs précédemment labourés. Dans la première photo, le champ vert correspond à un espace labouré où l'apparition de griffes n'a pas empêché la croissance céréalière. Le talus formé progressivement à la limite de deux exploitations a efficacement bloqué la poursuite des griffes vers l'aval. En revanche, à droite, sur pente continue, les griffes du champ labouré se sont poursuivies dans le champ encore en jachère, quoique avec une moindre densité. Dans ce champ en cours de labour, au moment de la prise de la photo (labour à l'araire), le travail du sol masque les griffes de l'automne ; mais l'appauvrissement du sol est réel, malgré cela.



Dans la seconde photo, l'abandon en jachère d'un champ appauvri a initié une exagération des rigoles existantes. Les versants abandonnés, suite à leur dégradation avancée sont la proie des griffes qui se transforment en rigoles.



Dans la troisième photo, le champ dégradé a été abandonné à la jachère. Mais le sol squelettique n'a pas permis la recolonisation végétale fondamentale pour sa protection. Les pluies agressives creusent des rigoles de plus en plus profondes. Le dépôt de bas de versant témoigne de l'importance de l'érosion en rills et de l'abandon de la charge de ces rigoles dès que la pente s'atténue.

plus en plus important, d'où un fort piétinement des champs, totalement dénudés ;
– les caractéristiques physiques des sols de Matlaq prédisposent à leur tour le bassin aux processus érosifs, avec notamment la dominance des limons connus pour leur faible stabilité structurale et leur grande aptitude à développer une croûte de bat-

– le labour mécanisé est souvent effectué dans le sens de la pente la plus forte.

Conclusion

La vulnérabilité aux changements climatiques est réelle et comporte à la fois une

dimension hydrique (pénurie de la nappe phréatique), une dimension agraire (chute des rendements) et environnementale (fragilisation des sols et recrudescence de l'érosion).

La crise hydraulique entraînera une situation de concurrence entre l'objectif d'améliorer la production par irrigation et celui d'améliorer la qualité de la vie : AEP (alimentation en eau potable).

La plus grande fréquence d'événements extrêmes entraînera une dégradation renforcée. L'assèchement, comme le réchauffement, risquent d'entraîner un déficit en eau plus élevé au niveau du sol (plus grande fragilité) et une moindre infiltration (moins d'alimentation de la nappe phréatique).

C'est pourquoi il faut renforcer les capacités d'adaptation à cette crise envisageable. Le risque de dégradation comme celui de vulnérabilité aux changements climatiques sont peu perçus. Or, cette perception est fondamentale pour une planification participative. Les capacités de la société locale à se saisir de la gestion de l'eau et à s'organiser en conséquence sont limitées du fait des attitudes individualistes. Il faut donc générer de nouveaux dispositifs de gestion de l'eau et d'économie de l'eau. La mise en place de techniques agraires protectrices du sol est limitée et un effort de démonstration doit être réalisé.

En ce qui concerne les perspectives d'évolution par adaptation ou inadaptation au changement climatique, il s'avère, suite aux entretiens effectués auprès des habitants du bassin, qu'ils ont une bonne perception de la variabilité pluviométrique, mais pas du changement climatique. Ainsi, leurs réactions se limitent-elles actuellement au développement de l'élevage bovin semi-intensif et au recours à des cultures pluviales ayant un cycle végétatif plus court, comme alternative. ☀

Références

1. Conacher A, Sala M, eds. *Land degradation in Mediterranean environments of the world*. Chichester (Great Britain) : John Wiley, 1998 ; 491 p.
2. Laouina A, Nafaa R, Chaker MP, et al. La problématique de la gestion de l'eau et du développement des communautés locales rurales au Maroc. *Mosella* 2000 ; XXV (3-4) : 431-46.
3. Coelho COA, Laouina A, Ferreira A, et al. *Forest and grazing impacts on hydrological and erosional processes in Southern Portugal and Northern and Central Morocco. Man and soil at the third millennium*. Logroño : Geofarma Ediciones, 2002 : 1255-64.
4. Laouina A. Compétition irrigation/eau potable en région de stress hydrique, le cas de la région d'Agadir (Maroc). In : *Interdependency between Agriculture and Urbanisation, conflicts on sustainable use of soil and water*. Options méditerranéennes Sér A, Medit. Seminars, n° 44. Bari : CIHEAM, 2002 : 17-31.

5. Bonvallet J, Tabias et jessour du Sud tunisien, agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; (21) : 105-14.
6. Tribak A. Stratégies et techniques de lutte anti-érosive dans les montagnes du Pré-Rif oriental (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 2002 ; (21) : 45-55.
7. Laouina A, Nafaa R, Wafteh A. Occupation des sols et dégradation des terres, le cas de la Mamora et ses bordures. *Méditerranée* 1997 ; volume 84 : 45-51.
8. Nasri S. Impact hydrologique des banquettes sur les opports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; (21) : 115-29.
9. Coelho COA, Ferreiro, AJD, Regaya K, et al. *The role of land-use changes in reservoir siltation in the Magrheb region and its implications for rural planning*. HYDROMED : Séminaire International des petits barrages dans le monde méditerranéen, Tunis, 28-30 May 2001.
10. Van Dam JC, éd. *Impacts of climate change and climate variability on hydrological regimes*. International Hydrology Series. Cambridge : Cambridge University Press, 1999 : 140 p.
11. BY D, Grant M, Dawson BD. *Isco open channel flow measurement Handbook*. 5th edition. Lincoln (Nebraska) : Isco, Inc, 1997 ; 501 p.
12. Sud YC, Yang R, Walker GR. Impact of *in situ* deforestation in Amazonia on the regional climate : general circulation model simulation study. *J Geophys Res-Atmosph* 1996 ; 101 : 7095-109.
13. Uchida T, Kosuri K, and Mizuyama T. Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. *J Hydrol* 1999 ; 222 : 18-36.
14. Mazour M, Roose E. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du NW de l'Algérie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; (21) : 320-30.
15. Cerdá A, Ibáñez S, Calvo A. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technol* 1997 ; 11 : 161-8.
16. De Roo APJ, Wesseling CG, Ritsema CJ. LISEM : a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins : 1 : Theory, input and output. *Hydrological Processes* 10. Chichester (Great Britain) : John Wiley & Sons, Ltd, 1996 : 1107-17.
17. Jetten V, De Roo APJ. Spatial analysis of erosion conservation measures with LISEM. In : Harmon R, Doe WW, eds. *Landscape Erosion and Evaluation Modelling*. New York : Kluwer Academic/Plenum, 2001 : 429-45.
18. Ratto M, Tarantola S, Saltelli A. Sensitivity analysis in model calibration : GSA-GLUE approach. *Computer Physics Communication* 2001 ; 136 : 212-24.
19. Chaker M, El Abbassi H, Laouina A. Montagne, piémont, plaine : investir dans les techniques de CES au Maroc oriental. In : Reij C, Scoones I, Toulmin P, eds. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. Paris : CTA : CDCE ; Karthala, 1996 : 75-86.
20. Dimanche PH, Hoogmoed WB. Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco : the role of surface and sub-surface soil conditions. *Soil, Tillage Research* 2002 ; 66 : 13-21.
21. Yair A, Kossovsky A. Climate and surface properties : hydrological response of small arid and semi-arid watersheds. *Geomorphol* 2002 ; 42 : 43-57.
22. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie, Synthèse de 50 parcelles. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
23. Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 1982 ; 18 : 1311-25.
24. Niehoff D, Fritsch U, Bronstert A. Land-use impacts on storm-runoff generation : scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *J Hydrol* 2002 ; 267 : 80-93.
25. Le Bissonnais Y, Renaux B, Delouche H. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena* 1995 ; 25 : 33-46.
26. Le Bissonnais Y, Benkhadra H, Chaplot V, Fox D, King D, Daroussin J. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from two small catchments. *Soil, Tillage Research* 1998 ; 46 : 69-80.

Fonds Documentaire IRD
Cote : A * 33558Ex : 2

Jean Albergel¹
Slah Nasri²
Mohamed Boufaroua³
Abdallah Droubi⁴
Abdel Aziz Merzouk⁵

¹ Laboratoire d'étude des interactions
entre sol, agrosystème et hydrosystème
Unité mixte de recherche (LISAH),
2, place Viala,
34060 Montpellier
<albergel@ensam.inra.fr>

² Institut national de recherche du génie
rural, des eaux et forêts (INRGREF)
BP 10,
Ariana 2080,
Tunisie

³ Direction générale de l'aménagement
et de la conservation des terres agricoles
(Ministère de l'Agriculture, DG ACTA),
Av. Charles Nicole,
1002 Tunis,
Tunisie

⁴ Arab Centre for Studies on Arid Areas
and Dry Lands (ACSAD)
PO Box 2440,
Damas,
Syrie

⁵ Institut agronomique et vétérinaire Hassan II
Département de sciences du sol (DSS)
BP 6202 Instituts,
10101 Rabat,
Maroc

Petits barrages et lacs collinaires, aménagement originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient

Résumé

Après les pays du nord de la Méditerranée, ceux d'Afrique du Nord et du Proche-Orient se sont lancés dans une politique de construction de petits barrages. Les objectifs de ces aménagements sont essentiellement de deux ordres, parfois contradictoires. On distingue : des objectifs de gestion et conservation des eaux et des sols avec la protection des infrastructures en aval et, en particulier en Afrique du Nord, celles des grands barrages contre une sédimentation trop rapide ; et des objectifs de développement économique et social en offrant une ressource renouvelable rare mais vitale, l'eau, de manière disséminée dans le paysage, tout en limitant les bouleversements d'ordre social (expropriation massive, déplacement d'infrastructures ou de logements). A partir des résultats d'une recherche pluridisciplinaire menée dans deux pays d'Afrique du Nord (Maroc et Tunisie) et deux pays du Proche-Orient (Liban et Syrie), cet article cherche à montrer la place des petits barrages dans la mobilisation et la gestion des ressources en eau et en sol dans les zones méditerranéennes semi-arides. Il trace d'abord le cadre de la construction de ces aménagements dans les pays étudiés. La culture de l'aménagement du territoire étant différente dans chaque pays, le développement des petits barrages a suivi des chemins et des objectifs différents. Le premier trait commun est une volonté politique de développer ce type d'aménagement dans les années à venir. L'évolution des capacités de stockage des petits barrages a été étudiée à travers un modèle d'estimation et de simulation des transports solides. Ces études ont permis de mieux comprendre les phénomènes d'envasement en relation avec l'érosion des sols sur les bassins-versants. Les enjeux de développement autour des lacs collinaires sont très liés à la pérennité de la ressource en eau. Les types de cultures et d'aménagements agricoles doivent être adaptés à la durée de vie du barrage et aux fréquences de son assèchement. La recharge de la nappe phréatique dans la vallée améliore les potentialités de développement rural en aval du barrage. Les impacts environnementaux de ces ouvrages sont liés à la qualité de l'eau et à son maintien. Ils sont plutôt positifs tant que l'ouvrage conserve sa fonction de stockage des eaux et des sédiments, le risque majeur étant la rupture de la digue.

Mots clés : Barrage ; Lac collinaire ; Érosion ; Maghreb ; Proche-Orient.



Summary

Small dams and hill reservoirs: Innovative management for water conservation and for protecting downstream infrastructures. The examples of small dams in Northern Africa and the Middle East

Following the example of countries North of the Mediterranean, those of Northern Africa and the Middle East initiated a policy of small dam construction. The objectives of this type of water resources management are essentially twofold and sometimes contradictory. We can differentiate soil and water conservation and management objectives, as well as economic and social development objectives: Erosion control, protection of downstream infrastructures and particularly control of the rapid sedimentation of large dams; integrated rural development by offering a rare but vital and renewable resource: the fair distribution of water in the countryside while limiting disruptions in the social order such as massive expropriation, and displacement of infrastructures or houses. Based on the results of multi-disciplinary research carried out in two countries in Northern Africa (Morocco and Tunisia), and two countries in the Middle East (Lebanon and Syria), this article endeavors to show the position of small dams in the mobilization and management of water and soil resources in the semi-arid Mediterranean zones. It first draws up the framework of the multiplication of these projects implemented in the countries studied. As territorial management is carried out along different lines in each country, development of small dams has followed different directions and objectives. The first common trait is the political will to develop this type of conservation project in the years to come. The goal of large dam protection is more prevalent in Northern Africa than in the Middle East. The fishery aspect is completely absent in Tunisia. The prospect of protecting conservation works and structures has been studied using a model for estimating and simulating sediment transport and yields. These studies provide a better understanding of the erosion and siltation phenomena. The stakes of integrated development around hill reservoirs are strongly linked to the sustainability of the resource. The types of the crops and of the agricultural conservation projects must be adapted to the expected duration of the dam and to the rhythm it is drying up. The consequent recharge of the water table improves the potential of development downstream. The environmental impact of these projects are linked to the quality of the water and to its maintenance. They are positive, the main risk being the breaking of the dikes.

Key words: Dams; Hill Reservoirs; Erosion; Northern Africa; Middle East.

Lorsqu'on parle des barrages d'Afrique du Nord ou du Moyen-Orient, on pense aux grands barrages dont les digues peuvent atteindre 100 mètres de hauteur, en béton ou en terres compactées, sur les grandes rivières de l'Atlas, sur le Nil ou sur les fleuves du Levant : Tigre, Euphrate, Jourdain, Litani... Les pays de ces régions sont pourtant engagés depuis plus ou moins longtemps dans une politique de construction de petits barrages qui apparaissent comme des aménagements très spécifiques destinés non seulement à la mobilisation des ressources en eau de surface mais aussi à la lutte contre les fortes crues. Ces barrages ont des hauteurs de digue faibles (jusqu'à 15 m, limite inférieure des grands ouvrages pour la Commission internationale des grands barrages). Ils sont constitués en remblai, sur de petits bassins-versants ruraux, dans des zones de relief. Ils sont équipés de déversoirs latéraux de conception rustique, capables d'évacuer quelques dizaines de mètres cubes par seconde, parfois un peu plus de 100 mètres cubes par

seconde. Ils possèdent ou non une vanne de fond et leur coût unitaire est de l'ordre du demi-million d'euros, voire quelquefois nettement moins. D'extension modérée (quelques hectares), les lacs de ces barrages ont une capacité de rétention qui varie de quelques dizaines de milliers à 1 million de mètres cubes [1].

À partir d'exemples pris au Liban, au Maroc, en Syrie et en Tunisie, quatre pays qui ont participé au programme Hydro-med [2] de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen, cet article montre le rôle des petits barrages dans l'aménagement rural et la protection des infrastructures aval.

Cadre général de la construction des petits barrages

En Tunisie, dans le cadre du programme « Aménagement des terres en pente, mobilisation des ressources en eau, entretien et

sauvegarde des aménagements », inscrit au VIII^e plan de l'État, était prévue, au cours de la décennie 1990-2000, la construction de plus d'un millier de petits barrages dans la partie septentrionale du pays. Ces ouvrages (*photo 1*) sont devenus la pièce maîtresse de la stratégie nationale en matière de conservation des eaux et des sols (sources : ministère de l'Agriculture, direction de la Conservation des Eaux et des Sols). Les objectifs de cette stratégie étaient les suivants [3] :

- réduire les pertes en terres agricoles (estimées à 10 000 hectares par an) par l'aménagement des versants ;
- réduire l'envasement des grands barrages (25 Mm³ par an en 1990) ;
- augmenter la recharge des nappes ;
- mobiliser la plus grande partie possible des 500 Mm³ d'eau perdus alors dans la mer ou dans les sebkhas ;
- créer des points de développement des cultures irriguées.

Au Maroc, la période de sécheresse du début des années 1980, considérée comme la plus longue jamais observée, a



Photo 1. Petit barrage de Kamech construit en 1994 au Cap-Bon (Tunisie) et périmètre irrigué en aval (printemps 1997).

été le point de départ d'une politique de construction de petits barrages et de lacs collinaires réalisés avec une pratique de chantiers à haute intensité de main-d'œuvre. Ces ouvrages sont destinés principalement à l'irrigation, à l'abreuvement du bétail, à la protection contre les crues ou à l'alimentation en eau potable des zones rurales dépourvues de ressources en eaux souterraines facilement exploitables. Quelques essais de pisciculture dans des bassins en aval des barrages ont été réalisés. Au cours des années 1970 et 1980, le Maroc s'est doté d'une importante infrastructure hydraulique or la quasi-totalité des grands barrages ainsi mis en place sont concernés par des apports importants en sédiments. De nombreux petits barrages ont donc été construits pour ralentir cet envasement. Ainsi, le plus grand barrage du royaume, le barrage d'Al Wahda sur l'oued Ouergha, dans la province de Sidi Kacem (88 m de hauteur et 3,4. 10⁹ m³ de capacité) est protégé par de nombreux petits barrages construits à l'amont de son bassin pour retenir les produits de l'érosion provenant des fortes pentes marneuses du Rif. L'érosion du bassin-versant de l'Ouergha, estimée à 98 T/ha/an sur une superficie de 6 150 km², ferait perdre annuellement au barrage un volume de 60 Mm³ [4]. Au lancement du projet Hydromed, une cinquantaine de petits barrages d'une hauteur supérieure à 10 m étaient en exploitation et un grand nombre de lacs collinaires, dont les barrages ont une hauteur comprise entre 5 et 10 m, avaient été créés [5].

En Syrie, les petits barrages sont connus depuis la haute antiquité, tel le barrage construit sur l'oued Nahr El Asi près de Homs sous le règne de Sethi 1^{er} (1 319-1 304 av. JC). Beaucoup ont été construits au début de l'ère chrétienne (barrage de Badieh sur la route de Palmyre). De nombreuses ruines attestent de leur présence

dans les steppes sèches. Certains existent toujours mais sont complètement remplis de sédiments. Les premiers petits barrages construits selon des techniques modernes, ont été réalisés au cours des années 1960 dans la province de Swaida pour l'alimentation en eau potable de villages situés sur un plateau basaltique sans aucune ressource en eau souterraine. Ces retenues sont le plus souvent empoisonnées et la pêche y est pratiquée. Proches de grandes villes, les sites de ces aménagements sont des lieux de résidences secondaires et les plans d'eau sont exploités pour les loisirs. C'est le cas du petit barrage d'Al Corane, non loin de Damas, dans une petite vallée d'altitude. Au Proche-Orient, la notion de lac collinaire n'est pas aussi bien définie qu'au Maghreb, mais de nombreux aménagements de très petite taille ont été construits pour créer des réserves d'eau destinées au bétail des tribus nomades bédouines. Une cinquantaine de petits barrages d'une hauteur supérieure à dix mètres, construits après 1960, étaient en exploitation en Syrie au début du projet Hydromed, ainsi qu'un grand nombre de micro-aménagements.

Au Liban, dans le cadre du programme de reconstruction du Pays, le Plan Vert¹ a lancé une étude pour la construction d'une centaine de petits barrages, essentiellement dans les zones de piémont des chaînes de montagnes jouxtant la plaine de la Bekaa. Dans cette zone semi-aride, dominée par les chaînes montagneuses du Mont-Liban et de l'Anti-Liban, il s'agit de barrages de régulation de crues qui peuvent être très violentes. Il existe aussi, dans les montagnes du Liban, une multitude de petits réservoirs utilisés pour capter les eaux souterraines et les eaux de fonte des neiges. Ces captages alimentent des cha-

1. www.greenplan.gov.lb

pelets de réservoirs disposés en cascade sur les versants. Leur eau est utilisée pour l'irrigation de vergers (photo 2).

Les petits barrages : aménagements de protection des infrastructures aval

L'expérience mondiale évalue le taux de perte en volume des barrages par sédimentation à 1 % par an et à 130.10⁹ euros le coût de récupération des volumes mobilisables d'eau ainsi perdus [6]. En Tunisie, où les grands barrages, représentent un volume mobilisable de 1 612 millions de m³, cette perte est estimée à 1,6 % [7]. L'idée est donc de stopper les sédiments, essentiellement produits par les zones amont montagneuses, dans de petites retenues au coût de construction modéré. La construction de petits barrages en cascade sur les oueds amortit l'onde de crue et diminue la dynamique érosive des écoulements, souvent brutaux en climat méditerranéen.

Évaluation du transport solide

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

$$T = V_s \times d + \sum S_i C_i$$

T : transport solide total entre deux mesures bathymétriques (t) ;

V_s : volume de vase mesurée (m³) ;

d : densité de la vase ;

n : nombre de crues ayant déversé entre deux mesures ;

S_i : volume déversé pendant la crue i (m³) ;



Photo 2. Réservoirs de captage d'eau souterraine et de fonte des neiges dans les montagnes libanaises (décembre 2002).

C_i : concentration moyenne en matière en suspension mesurée durant la crue i (t/m^3).

Cette méthode, simple à mettre en œuvre, permet d'obtenir une bonne estimation des transports solides à l'exutoire d'un bassin-versant équipé d'une retenue. Elle globalise les pertes en terre dues aux trois formes d'érosion hydrique :

- l'érosion en nappe qui provient du ruissellement des pluies sur les versants ;
- le ravinement causé par les écoulements linéaires sur les versants à forte pente ;
- l'érosion des berges et du fond produite par les écoulements dans le réseau hydrographique principal.

La difficulté de cette méthode réside dans la transformation du volume des sédiments déposés dans la retenue en masse de terre transportée. En effet, la densité apparente des matériaux déposés dans le fond de la retenue varie avec le temps suivant la compaction des dépôts et leur teneur en eau. Dans un barrage bien envasé, les dépôts de fond ont une densité proche de 2 tandis que la densité des vases en surface varie entre 1 et 1,2. La mesure de densité lors de la bathymétrie n'est pas facile à réaliser. On profite des assèchements des retenues pour procéder à des prélèvements au cylindre pour mesurer ces densités. Sur les petits barrages tunisiens, on utilise une valeur moyenne de 1,6.

Un modèle permet de simuler les apports, crue par crue [8]. Il a été validé sur 8 sites

répartis dans les quatre pays du programme Hydromed et appliqué à 24 petits barrages de la dorsale tunisienne [9]. La figure 1.a montre la mesure de bathymétrie du petit barrage de Kamech (bassin versant de $2,5 \text{ km}^2$) dans la péninsule du Cap-Bon au nord-est de la Tunisie et la figure 1.b, l'évolution de cet envasement depuis la construction du petit barrage en 1994.

Envasement

L'envasement des petits barrages, rapporté à la surface du bassin-versant, varie de $1,1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ (soit $1,8 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$), sur un bassin de piémont bien aménagé en dispositifs anti-érosifs et assez boisé (El Gouzine en Tunisie centrale), à $31 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ (soit $50 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$) sur un petit bassin très marneux des collines pré-rieffines au Maroc. Cet envasement est de $2,4 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$, (soit $3,8 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$) pour le barrage de Syndiané, sur le plateau basaltique de Homs en Syrie. Les zones cultivées sur les versants de ce bassin sont aménagées en talus et murettes de pierre délimitant les champs. Rappelons que l'*United States Department of Agriculture* (USDA) considère, comme érosion « normale » en sol cultivé, une érosion comprise entre 1 et $11 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$ [10].

Le même suivi sur 24 petits barrages de la dorsale tunisienne montre une perte totale de $585\,200 \text{ m}^3$ à la fin de l'année 1999 sur une capacité initiale de stockage de

$2\,634\,000 \text{ m}^3$, soit une perte de 22 % pour une durée d'existence moyenne de 7,7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est donc de 4,6 % par an, du même ordre de grandeur que celle des petits barrages italiens [11]. Les transports solides captés par les petits barrages seraient d'environ $16 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$. En extrapolant ce résultat aux mille lacs collinaires prévus par la stratégie nationale tunisienne et en leur donnant les caractéristiques moyennes des 24 lacs étudiés, on obtiendrait un stockage en sédiments de 3,2 millions de m^3 par an, soit 13 % de l'envasement actuel des grands barrages, ce qui n'est pas négligeable. Bien sûr, ce résultat ne tient pas compte des barrages qui seraient totalement envasés ou de ceux qui seraient emportés par de grosses crues et libèreraient les sédiments stockés.

Le modèle de reconstitution du transport solide, crue par crue, a permis de mieux comprendre les phénomènes érosifs et leurs conséquences sur l'envasement des retenues. La figure 2 montre cette reconstitution pour le barrage de Kamech en Tunisie. On voit, sur cette figure, que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de 9 années, trois crues ont apporté 50 % du transport solide [27 février 1996, 18 janvier 1999 et 29 novembre 1999]. La dernière a contribué à elle seule à 20 % du transport observé en 9 ans [9].

À partir des mesures du transport solide retenu par le petit barrage de Saboun (bassin versant de 7 km^2), l'érosion spécifique du bassin a été estimée à $50 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$ [12]. Ces valeurs d'érosion très fortes sont en contradiction avec les mesures de l'érosion sur parcelles dont les plus fortes ne dépassent pas $10 \text{ t}/\text{ha}/\text{an}$. Deux raisons peuvent expliquer la différence importante entre les données d'érosion spécifique modélisée à partir des données d'envasement du barrage et celles estimées à partir des mesures sur parcelles d'érosion :

1. Le barrage a intégré tous les événements érosifs depuis sa création (1991), tandis que les parcelles ne sont étudiées que sur quelques années, les événements exceptionnels y étant mal observés en raison du débordement des dispositifs de mesure.

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

À partir d'expérimentations sous simulation de pluie et de l'application d'un modèle de production et de transfert des sédiments, Hamed et al. [13] ont fait la part des différents types d'érosion sur le bassin-versant du petit barrage de Mrichet

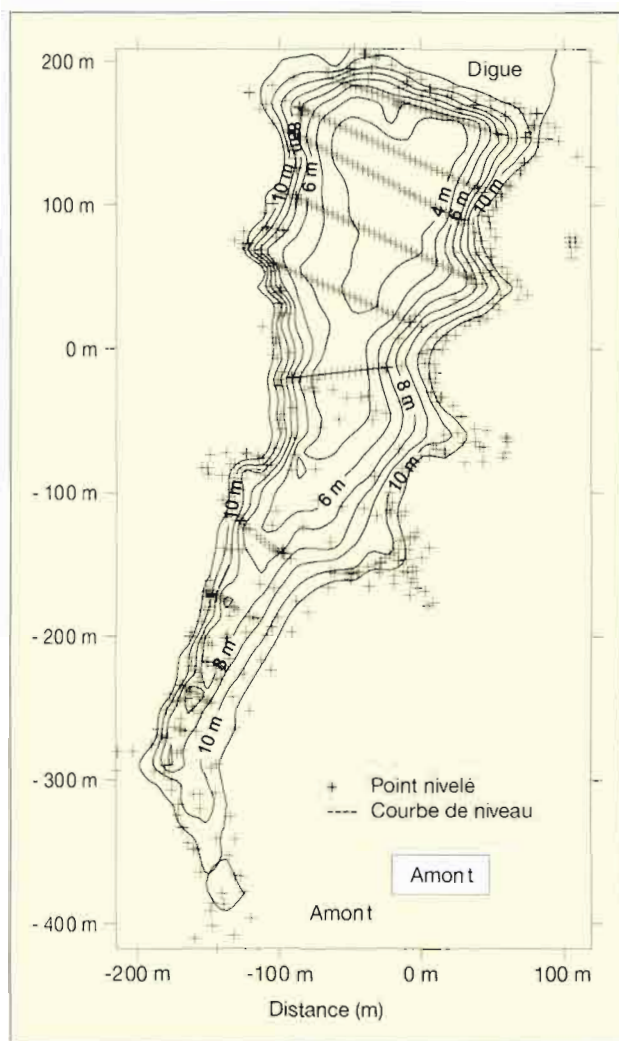


Figure 1.a. Mesure de l'envasement à Kamech (décembre 1999).
Les courbes de niveau sont calculées à partir d'un zéro arbitraire correspondant au zéro de l'échelle de crue installée dans la retenue.

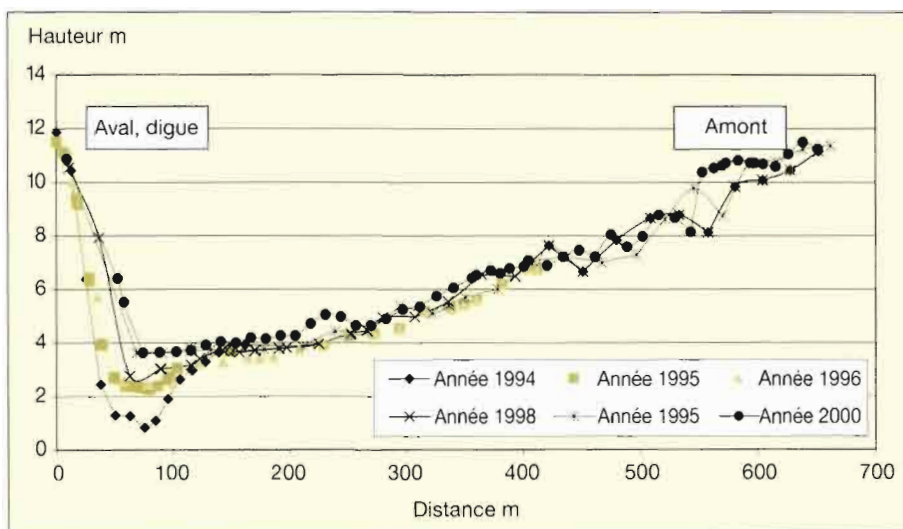


Figure 1.b. Évolution de l'envasement du barrage de Kamech depuis sa mise en eau en 1994.
En 2000, il a perdu 20,7 % de sa capacité initiale, ce qui correspond à une érosion de 32 t/ha/an.

El Anse en Tunisie centrale (érosion estimée à 12,5 t/ha/an). Ils montrent qu'en année sèche, l'érosion aréolaire produit 90 % des sédiments arrivant au barrage, alors qu'en année pluvieuse, seulement 65 % de l'érosion provient des versants, le reste étant produit par le surcreusement des ravines et les effondrements de berge. La photo 3 montre une route plusieurs fois coupée par les crues d'un oued. La construction d'un barrage collinaire en amont peut avoir pour objectif de la protéger. Il n'existe pas encore d'étude générale sur le rôle protecteur des petits barrages sur les infrastructures aval, bien que, cas par cas, on note un rôle de protection du barrage dans les études d'impact.

En conclusion, on peut dire qu'une retenue artificielle de petite dimension est un lieu privilégié pour l'observation du bilan des matières solides transportées par le réseau hydrographique à l'exutoire d'un bassin-versant. Les produits de l'érosion collectés par l'écoulement superficiel sont piégés dans le réservoir, à l'exception de ceux déversés lors de rares débordements. Il est facile d'estimer ces transports solides en faisant des mesures régulières de bathymétrie, des prélèvements lors des déversements et un suivi hydrologique de la retenue.

Les petits barrages : aménagement de mobilisation et de conservation des eaux pour le développement local

Les écoulements qui remplissent les petits barrages sont générés par les pluies fortes. Il suffit souvent d'une seule pluie forte pour remplir la retenue. En climat méditerranéen, ces pluies arrivent le plus souvent en automne et en hiver, mais un fort orage d'été peut être générateur d'un écoulement suffisant pour provoquer un déversement. L'évaporation importante des plans d'eau et leur faible profondeur ne permettent pas de conserver l'eau longtemps. De plus, les infiltrations sont importantes lorsque les berges ennoyées sont perméables. La figure 3 montre pour le barrage de Sydniané en Syrie :

- les précipitations journalières ;
- les cotes de l'eau dans le barrage ;
- et le niveau de l'envasement au pied du barrage.

La cote du déversoir permet de mettre les déversements en évidence. On remarquera le faible remplissage de l'année 1999, qui a été très sèche dans tout le Proche-Orient [14].

Cette eau stockée temporairement peut avoir de nombreux usages : le tableau 1 montre le résultat d'une enquête réalisée

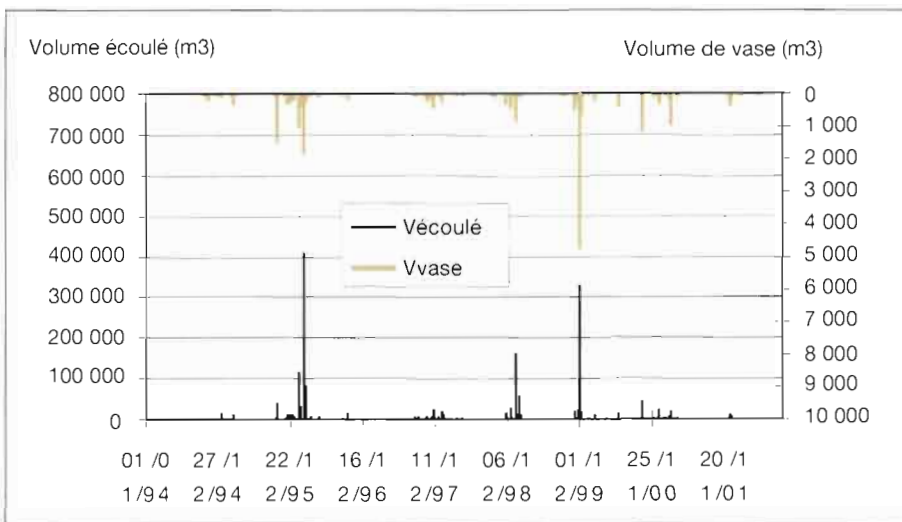


Figure 2. Écoulements et transports solides, reconstitués crue par crue, au barrage de Kamech sur une période de 9 années.

en 1997 sur l'usage des eaux des petits barrages dans les pays du programme Hydromed.

L'analyse des systèmes de production agricole autour de 26 lacs collinaires en Tunisie, réalisée de 1993 à 1996, a permis de comprendre la dynamique de développement agricole. Elle montre que [15] :

- 50 % des exploitants n'ont pas introduit l'irrigation et conservent leur système de production traditionnel ;
- 28 % commencent à intégrer l'irrigation dans leur système de production agricole ;
- 22 % des exploitants pratiquent couramment la petite irrigation.

Six ans après le début de leur construction, le taux d'exploitation des lacs collinaires

est encore faible mais en augmentation constante et très variable d'un site à l'autre. Sur le site de Kamech, dans le Cap-Bon, au nord-est de la Tunisie, la retenue est équipée de nombreuses pompes. Des périmètres de cultures industrielles y cohabitent avec des jardins maraîchers traditionnels et l'irrigation au goutte à goutte s'y généralise. D'autres sites, plus isolés des marchés ou dont les retenues s'assèchent souvent et longtemps, restent peu ou pas exploités.

L'usage de l'eau permet d'introduire de nouvelles spéculations très rentables (notamment le maraîchage et l'arboriculture) dont la marge brute peut atteindre dix fois celle de la céréaliculture traditionnelle



Photo 3. Infrastructure routière endommagée par une crue en Tunisie centrale (septembre 1995).

extensive. Cette exploitation de l'eau des lacs collinaires est à l'origine de la création d'un supplément de revenu annuel important qui se traduit par l'amélioration de l'habitat et une spéculation foncière sur les terres jouxtant les lacs.

Cependant, l'envasement rapide de certaines retenues a déçu les agriculteurs. Ainsi, huit hectares de pommiers plantés dans les trois premières années d'existence du lac de Sadine 1 (haut bassin du Zéroud en Tunisie) souffrent aujourd'hui du manque d'eau et sont actuellement très peu productifs. La retenue est en effet comblée de sédiments à 90 % de sa capacité de stockage.

Vu la forte variabilité interannuelle des stocks d'eau disponibles dans ces réserves, l'idée a été de les exploiter comme des ouvrages de recharge de nappes phréatiques. A la mise en eau de certains lacs, on a remarqué une recharge rapide de la nappe alluviale en aval de l'ouvrage. Les variations quasi concomitantes des niveaux d'eau dans le barrage d'El Gouazine (Tunisie centrale) et de deux puits distants de 300 et 1 000 mètres de la digue, représentés sur la figure 4, montre bien la dépendance de la recharge de la nappe au remplissage du barrage [16]. Montoroi *et al.* [17] ont apporté les preuves géochimiques d'une recharge efficace de la nappe alluviale par les infiltrations fortes lorsque, en période de crue, les eaux du lac atteignent les terrasses alluviales perméables. En zone semi-aride, un barrage peut ainsi forcer le système naturel de recharge des nappes alluviales. Cette recharge se fait majoritairement par les inondations des lits majeurs des oueds lorsque ces lits sont suffisamment perméables.

À partir de l'enquête réalisée sur un grand nombre de retenues de petits barrages, on voit bien comment cet aménagement de petite ou moyenne hydraulique complète une politique de mobilisation des eaux de surface jusqu'alors centrée sur la construction de grands barrages. La part de la ressource ainsi mobilisée reste modeste : en Tunisie, elle représentait 149,5 millions de m³ en 1999, dont 72 millions pour les plus petites unités de capacité inférieure à 300 000 m³ [7] contre 1 612 millions pour les grands barrages. Mais cette part représente 30 % des eaux de surface non mobilisables par les grands barrages (500 millions de mètres cubes par an). Disséminée dans le paysage, cette ressource touche souvent des régions où il n'y a ni grand barrage, ni ressource en eau souterraine importante. Toutefois la valorisation de cette ressource dépend largement de la durée de vie de l'aménagement et la possibilité de recharger des nappes phréatiques à partir de ces ouvrages

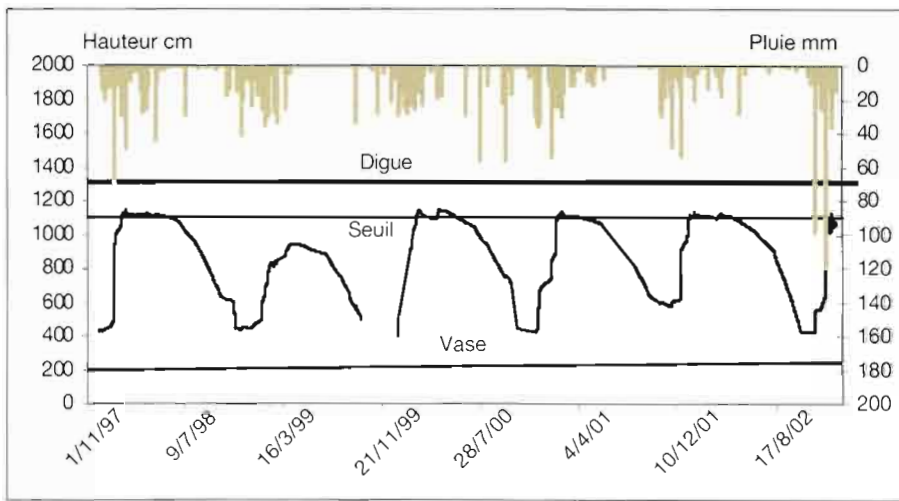


Figure 3. Observations hydrologiques à Syddiané (Syrie). Remarque la sécheresse de l'année 1999. Les descentes rapides du niveau d'eau correspondent à des ouvertures de la vanne de fond.

permet de sauvegarder une quantité d'eau non négligeable, utilisable en été lorsque la retenue s'est asséchée.

Impacts des petits barrages sur l'environnement

Au cours du programme Hydromed, une étude sur la qualité de l'eau de 24 retenues a été menée en Tunisie [18]. Elle a permis

d'apprécier la variabilité de la salinité des eaux stockées en relation avec la nature géologique des bassins-versants et sous différentes chutes de pluies. Les salinités mesurées satisfont généralement aux divers usages. Trois groupes géochimiques ont été identifiés. Les eaux sulfatées-calciques caractérisent les retenues situées dans les bassins-versants du Zéroud et du Merguellil (Tunisie centrale) où affleurent d'importantes formations gypseuses. Ces eaux sont les plus chargées en sels et l'augmentation

de la salinité par évaporation peut limiter les usages en irrigation. Les eaux à dominante bicarbonatée-calcique ont été collectées dans les sous-bassins-versants de la Medjerdah (centre et nord du pays) où les formations géologiques dominantes sont des alternances de calcaires et de marnes. Bien plus diluées que les eaux sulfatées-calciques, elles présentent moins de contraintes. Deux retenues situées au Cap Bon (nord-est de la Tunisie) se singularisent par des eaux peu chargées mais à dominante chlorurée-sodique.

Les eaux des petites retenues sont sous-saturées ou à l'équilibre par rapport à l'hydroxyapatite, mais la précipitation du phosphore dissous ajouté expérimentalement dans les eaux du lac de Fidh Ali (Tunisie centrale) semble dépendre de la formation du phosphate tricalcique amorphe. Le rôle des sédiments dans la régulation du phosphore a été étudié dans trois retenues. Les teneurs en phosphore total des sédiments analysés vont de 0,4 à 1,9 mg P.g⁻¹ sec et la fraction P-CaCO₃ prédomine [250 à 800 µg P.g⁻¹ sec]. La fraction P-FeOOH est globalement plus importante dans les sédiments les plus riches en FeOOH. La capacité d'adsorption des sédiments n'est toutefois pas directement liée à la quantité de FeOOH, elle pourrait dépendre du degré de cristallisation de ces composés.

Une analyse des risques de pollution par les effluents agricoles a été menée dans le

Tableau 1. Usage de l'eau dans les pays concernés par Hydromed (source : enquête de 1997 [2]).

	Liban	Maroc	Syrie	Tunisie
Barrages réalisés	2 petites unités, mais de nombreuses microréalisations	50 unités moyennes, de nombreuses petites unités	43 unités moyennes, 100 petites unités	40 unités moyennes, 450 petites unités
Projets futurs	Une trentaine d'unités prévues	500 unités prévues, priorité aux unités de 0,5 à 5 Mm ³	30 unités prévues	200 unités moyennes et 1 000 petites unités
Objectifs				
Alimentation en eau potable (AEP)	Oui	Oui	Oui	Non
Protection aval	Oui (crues)	Oui (crues, sédiments)	Oui (crues)	Oui (crues, sédiments)
Recharge nappes	Oui	Oui	Oui	Oui
Agriculture	Oui	Oui	Oui	Oui
Pisciculture	Oui	Oui	Oui	Non
Environnement	Oui	Oui	Oui	Oui
Tourisme, loisir	Oui	Non	Oui	Non
Types d'ouvrages	Barrages en terre ou en béton armé	Barrages en terre, en béton compacté. Recherche sur les différents types d'étanchéité	Barrages en terre	Barrages en terre. Rares en béton
Ministères (organisme resp.)	Irrigation	Intérieur (cercle)	Irrigation (direction de bassins)	Agriculture (centres régionaux du développement agricole)
Organisation des utilisateurs		AEP : société de distribution des eaux. Privée ou collective	Centralisée, direction de bassins	Encouragement à la création d'associations et comités de gestion
Remembrement et redistribution des terres		Suivant les barrages	Oui	Non pour les petites unités ; oui pour les moyennes
Torification de l'eau, couverture des frais d'exploitation		Oui	Oui	Non
Études et suivis	Faibles	Importants	Moyens	Très importants

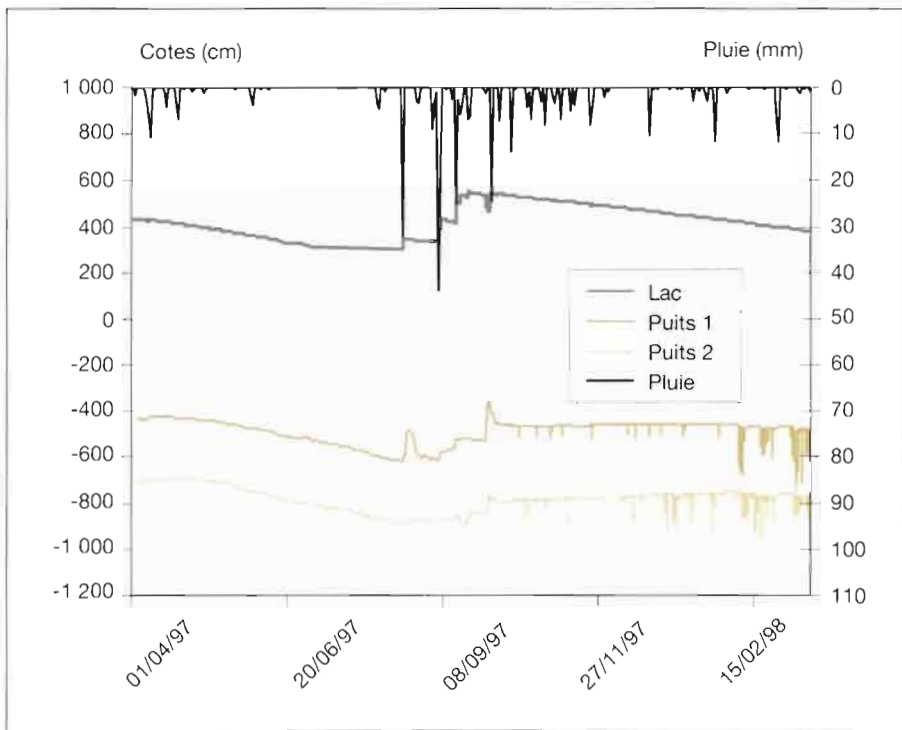


Figure 4. Variation des niveaux du lac et des niveaux piézométriques de deux puits en aval du petit barrage d'El Gouazine (centre de la Tunisie).

On remarque la remontée de l'eau d'abord dans le lac, ensuite dans les puits aval suivant leur distance à la retenue. Les prélèvements commencent dès la recharge. Lorsque les pluies cessent, le niveau d'eau dans les puits reste constant malgré les pompages.

bassin-versant du petit barrage de Kamch (Cap Bon, Tunisie) [19]. Aucune molécule des pesticides utilisés par les agriculteurs n'a été retrouvée en quantité significative dans les eaux analysées en début d'été. Les contaminations par les engrais azotés restent dans des proportions acceptables. Ces résultats peuvent être extrapolés à l'ensemble des retenues en milieu rural, excepté celles où des élevages intensifs de volaille ont été installés près des berges ou en amont des retenues. Du point de vue de la qualité des eaux, les impacts environnementaux des petits barrages semblent donc plutôt positifs lorsque les retenues se situent loin d'effluents amont importants : gros villages, élevages avicoles industriels ou élevages bovins en stabulation.

Les enquêtes de santé publique ne montrent pas, à cette date, de recrudescence ou d'apparition de maladies nouvelles liées à la mise en fonction de ces barrages. La direction générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres agricoles du ministère de l'Agriculture tunisien a cependant pour projet de mener une étude sur le risque de transmission des maladies liées aux eaux stagnantes avec la collaboration de l'Institut Pasteur de Tunis. Les maladies transmises par les moustiques sont plus particulièrement visées par ce projet.

L'étude de la structure verticale des lacs montre l'existence de stratifications thermiques estivales dans les retenues les plus profondes, et, dans ce cas, d'une transparence réduite. Les teneurs en chlorophylle *a* sont souvent inférieures à $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, mais les macrophytes se développent dans les eaux limpides et ces réservoirs favorisent le développement d'une végétation et d'une faune aquatiques (batraciens, serpents d'eau, tortues, mollusques). Les principales espèces végétales rencontrées sont *Juncus spp* et *Potamogetum pectinatus* sur la zone de marnage, *Typha angustifolia* et *Phragmite communis* dans les zones inondées.

Les lacs et leur rives, souvent reboisées, sont des lieux de nidification et de conservation des oiseaux. Le *Fuligule nyroca*, espèce rare en Afrique du Nord, inclus dans la liste des espèces protégées en Tunisie, nidifie sur le site du lac collinaire Cherichira (Tunisie centrale) où Azafaf et Hamrouni [20] ont recensé quatre couples.

Les risques environnementaux les plus souvent cités pour les barrages sont les conséquences de leur rupture. Malgré leur faible charge, les petits barrages ont un taux de rupture moyen qui est du même ordre de grandeur que pour les grands barrages. Comme il y a au moins cinquante fois plus de petits barrages que de grands barra-

ges, quelques dizaines de petits barrages sont détruits chaque année dans le monde [21]. Lorsqu'il s'agit d'un barrage de $50\,000 \text{ m}^3$, sa destruction passe inaperçue. Elle n'engendre que peu de catastrophes à l'aval, mais les sédiments stockés dans la retenue sont libérés dans le réseau hydrographique et le cours d'eau reprend son régime hydrologique naturel. Lorsqu'il s'agit d'un ouvrage de 10 à 15 m de haut avec un stockage de quelques centaines de milliers de mètres cubes, sa rupture peut créer des crues dangereuses de plusieurs centaines de mètres cube par seconde dans un fond d'oued qui n'a pratiquement plus vu passer d'eau depuis la construction du barrage et dans lequel des populations ont pu s'installer.

Conclusion

Cette rétrospective de résultats obtenus par le programme de recherche Hydromed montre que les petits barrages sont des aménagements qui complètent une politique de mobilisation de la ressource en eau. Ils jouent un rôle important dans l'aménagement rural des zones semi-arides et constituent des points focaux pour un développement agricole local reposant sur l'irrigation ou l'élevage.

Les lacs de retenue sont de bons pièges à sédiments. Ils protègent les infrastructures aval et, en nombre suffisant, peuvent prolonger la durée de vie d'un grand barrage. Recharger la nappe alluviale est un objectif réaliste dans de nombreux cas, mais le site du barrage doit être choisi en conséquence et faciliter l'infiltration des eaux stockées dans la retenue.

Le colmatage rapide des réservoirs va cependant à l'encontre d'un développement agricole durable. Dans les pays méditerranéens, les petits lacs collinaires sont perçus comme une ressource en eau à utiliser et l'aménagement anti-érosif des versants permet d'accroître leur durée de vie.

Du point de vue environnemental, tant que la digue ne s'est pas rompue, les impacts sont plutôt positifs si l'on préserve la qualité de l'eau en faisant attention aux effluents possibles générés par une agglomération ou un élevage industriel. Généralement implantés dans des milieux ruraux à faible concentration humaine, les petits barrages sont de petites zones humides qui contribuent à la diversité biologique et plus particulièrement à la protection des oiseaux et au développement d'espèces aquaphiles. Le risque environnemental majeur est celui de la rupture de digue. Nos travaux montrent que le choix des implantations doit être en rapport avec des objectifs précis, soit d'ordre conser-

vatoire d'infrastructures aval, soit orientés vers le développement rural. Dans le premier cas, l'objectif de conservation doit être clairement défini. Ainsi, pour protéger un grand barrage, il faut un certain nombre de retenues en amont de l'ouvrage. Celles-ci ont une durée de vie limitée, mais, lorsqu'elles seront complètement ensasées, elles serviront de petits deltas d'épandage des eaux et d'amortissement des ondes de crue. Durant la vie de l'ouvrage, on peut alors réaliser des reboisements ou des plantations d'oliviers qui n'ont besoin d'être irrigués que les trois premières années et le coût de l'ouvrage peut être comparé à celui du transport de l'eau en citerne.

Dans le cas d'un objectif de développement rural, la pérennité de la ressource en eau devient prioritaire et des aménagements de versants limitant les apports solides et l'érosion, tout en préservant les apports liquides, sont à prévoir dès la construction du petit barrage. La gestion de l'eau pose alors les problèmes de responsabilité et de partage des droits et des devoirs de maintenance d'une ressource naturelle renouvelable à statut collectif. ■

Références

- Albergel J, Rejeb N. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *CR Acad Agri Fr* 1997 ; 19 mars 1997 : 77-88. (Discussion : 101-4).
- HYDROMED. *Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen*. Albergel J, Nasri S, eds. Contrat européen INCO DC ERBIC 18CT 960091 – STD4. Tunis : IRD ; INRGREF, 2001, 120 p + 6 annexes.
- Talineau JC, Selmi S, Alayo K. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse* 1994 ; 5 : 251-6.
- Maroc Agri. Le Gharb, hier, aujourd'hui et demain. *Terre et Vie* 2001 ; (47) : 12 p.
- Mahmood K. *Reservoir sedimentation : Impact, extent, mitigation*. World Bank Technical Paper Number 71. Washington (DC) : World Bank, 1987 ; 17 p.
- El Mohamadi N. *Gestion et impact des petits barrages sur l'environnement – Cas du Maroc*. Journées nationales d'études : Petits barrages, AFEID CFGB, Bordeaux, France, février 1993 : 391-403.
- Haboïeb H, Albergel J. *Vers une gestion optimale des ressources en eau : exemple de la Tunisie*. Séminaire International « Hydrologie des Régions Méditerranéennes ». PHI-V/Documents Techniques en Hydrologie. Paris : Unesco, 2001 : 187-93.
- Albergel J, Pépin Y, Nasri S, Boufaroua M. *Modeling small dams siltation with MUSLE*. Proceedings of the International Seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration HYDROMED. Department of water resources engineering, 29/6 ou 3/7/98. Report 3222. LUND (Sweden) : Lund Institute of Technology, 1999 : 95-204.
- Albergel J, Pépin Y, Nasri S, Boufaroua M. *Érosion et transport solide dans des petits bassins-versants méditerranéens*. "Hydrology of the mediterranean and semi-arid regions". Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003, IASH Publ. n° 278, 2003 : 373-9.
- Roose É. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pedol FAO* 1994 ; (70) : 420 p.
- Gazzala T, Bossi G. Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. *Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique* 1969 ; (53) : 5 p.
- Abdelhooui B, Merzouk A, Aberkan M, Albergel J. Bilan hydrologique et envasement du barrage Sabaun (Moroc). *Rev Sciences de l'eau* 2002 ; 15 : 737-48.
- Hamed Y, Albergel J, Pépin Y, et al. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena* 2002 ; 50 : 1-16.
- Albergel J, Claude J. *Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du sud et de l'est du bassin méditerranéen*. Séminaire International « Hydrologie des Régions Méditerranéennes ». PHI-V/Documents Techniques en Hydrologie. Paris : Unesco, 2001 : 19-32.
- Selmi S. *Interventions de l'État en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien*. Thèse de doctorat en économie du développement agricole, agro-alimentaire et rural, École nationale supérieure agronomique de Montpellier (Ensam), 1996, 342 p.
- Nasri S. *Hydrological effects of water harvesting techniques. A study of tabias, soil contour ridges and hill reservoirs in Tunisia*. PhD, Lund Institute of Technology, Lund University, 2002, 104 p.
- Montoroi JP, Grunberger O, Nasri S. Ground water geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. *Applied Geochemistry* 2002 ; 17 : 1047-60.
- Rahoingomanana N. *Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore*. Thèse de doctorat en hydrologie, université Montpellier 1, 1998, 311 p.
- Vateau C. *Diagnostic de pollution agricole sur le bassin-versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie)*. DAA agro-environnement de l'Ensam, Montpellier, 2003, 53 p.
- Azafzaf H, Homrauni H. *Observations ornithologiques effectuées dans les zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO) et dans la région de Douz du 13 au 15 juillet 2001*. Association Amis des oiseaux/Groupe tunisien d'ornithologie (AAO/GTO), 2002 (Unpublished Report).
- Lemperière F. *Introduction de Monsieur François Lemperière, Président du Comité Français des Grands Barrages*. Journées nationales d'études : Petits barrages, AFEID CFGB, Bordeaux, France, février 1993 : 465-6.

Bilan de l'enquête sur la défense et restauration des sols (DRS) en Algérie

Mourad Arabi¹
Oum Elkhir Kedaid¹
Lakhdar Bourougaa¹
Tarik Asla²
Eric Roose³

¹ Institut national de recherche forestière (INRF),
Station Ain Dheb,
26001 Médéa,
Algérie
<inrfmedea@yahoo.fr>

² Université Mouloud Mammeri,
Département des sciences agronomiques,
15000 Tizi Ouzou,
Algérie

³ Institut de recherche pour le développement (IRD),
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5
<roose@mpl.ird.fr>

Résumé

Après quarante années de lutte antiérosive, l'Algérie a lancé un programme de recherche pour évaluer l'efficacité des techniques de défense et restauration des sols (DRS). L'enquête parrainée par deux instituts de recherche, l'Institut national de recherche forestière (INRF, Algérie) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD, France), a permis de recenser 10 types d'aménagement couvrant une superficie de 387 833 hectares, étudiés dans 30 wilayas (départements) de l'Algérie septentrionale. Parmi les ouvrages réalisés, les banquettes d'infiltration et de diversion totalisent 80 % des surfaces aménagées. L'implantation des aménagements obéit à des objectifs à la fois socio-économiques et environnementaux. La région Nord-Est du pays est la plus arrosée, mais c'est la région Nord-Ouest, semi-aride, qui est la mieux équipée en barrages et en DRS. La lutte contre l'érosion a été perçue par l'Administration comme un problème purement technique : d'où la diffusion généralisée d'ouvrages mécaniques sur de vastes surfaces sans pour autant associer les paysans à leur prise en charge ni à leur entretien. Le coût des aménagements est impressionnant : l'aménagement d'un hectare de banquettes, par exemple, coûtait entre 1 300 à 2 200 euros en 2003. Considérée comme une technique sûre qui a fait ses preuves aux États-Unis, la banquette n'a pas fait l'objet de recherche d'adaptation locale mais a souvent été utilisée en dehors de son domaine de validité. Or, les deux tiers des aménagements ont été réalisés sur roche tendre argileuse, des pentes de 3 à 25 % et sur les terres privées. La majorité des paysans rejettent cette technique et refusent d'entretenir les banquettes car elles consomment 5 à 15 % de la surface agricole utile (SAU) sans pour autant améliorer les rendements des cultures.

Mots clés : Érosion ; Enquête ; Algérie.

Summary

Assessment of a 40-year strategy of soil defence and restoration in Algeria

After 40 years of soil defence and restoration (DRS), in 1986, Algeria launched a national programme to assess the efficiency of DRS techniques. Jointly sponsored by two research institutes – the Institut national de recherche forestière (INRF, Algeria) and the Institut de recherche pour le développement (IRD, formerly Orstom, France), the inquiry identified 10 types of soil and water conservation techniques (SWC) covering a surface of 387,833 hectares, in 30 wilayas (départements) in Northern Algeria, representative of the Mediterranean mountains. Among the works achieved, it appears that different shapes of terraces cover 80% of the surfaces equipped. The North East region gets more rainfall but the North West is better provided with dams and DRS installations. The objectives of DRS were socio-economic (to give labour) as much as environmental (soil and water reservoir protection). Erosion control was seen as a technical problem by the Algerian Administration, which explains the overall spread of mechanical works over large surfaces without involving the farmers for their maintenance. Their cost was very high: the development of one hectare of terraces, for instance, cost between 1,300 and 2,200 euros in 2003. Being proven in the USA, the efficiency of the technique and its applicability to the Algerian situation was never seriously questioned nor studied before its extension and thus terraces were set up regardless of their appropriate target (landslides, gullies, steep slopes, over-



crowded areas...). In fact, 77% of DRS developments have been made on soft rocks, on 3-to-25% slopes and on private lands. Most farmers are rejecting this technique and refuse to see to their maintenance because terraces have not prevented the soil from degrading and productivity from declining.

Key words: Erosion; Enquiry; Algeria.

Pour lutter contre l'érosion en Algérie, des moyens importants ont été consentis entre 1940 et 1977 pour revégétaliser l'amont des bassins-versants, stabiliser les ravines, restaurer la productivité des terres et protéger les barrages de l'envasement : c'est la stratégie de défense et restauration des sols (DRS) qui allie en quelque sorte l'approche « Restauration des terrains de montagne » (RTM) des forestiers français à celle de la Conservation de l'eau et des sols (CES) des agronomes américains. Sur les terres cultivées, il s'agit d'imposer des ouvrages mécaniques de petite hydraulique rurale tels que banquettes de diversion, murettes, terrasses d'absorption totale, gradins, le plus souvent consolidés par des arbres fruitiers. Ils sont disposés en courbes de niveau, de façon à freiner l'action érosive du ruissellement sur les versants et à limiter les inondations et l'envasement des barrages [1-5]. Malgré 40 années de DRS, les terres continuent à se dégrader et la production de céréales à diminuer, l'érosion à se développer et les barrages à s'envaser rapidement [6] ; les paysans, qui ont perdu de 5 à 15 % de surface agricole utile (SAU) n'ont pas vu leurs rendements améliorés. Le coût élevé des ouvrages et les résultats peu concluants ont donc conduit les pouvoirs publics, en 1977, à l'abandon de cette stratégie [7]. Or, près de 400 000 hectares de terres ont été aménagés dans des circonstances écologiques et socio-économiques très diverses.

Il nous a donc paru intéressant de savoir :

- ce que sont devenus ces aménagements et leur état actuel ;
- ce qu'ils ont apporté en termes de protection de l'environnement ;
- quels enseignements tirer de cet immense champ expérimental pour améliorer les futurs programmes antiérosifs à entreprendre afin de développer une agriculture durable.

Le programme de recherche appelé « bilan de 40 années de DRS » fut lancé en 1986 dans le cadre d'une convention entre l'Institut national de recherche forestière (INRF d'Algérie) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD de Montpellier France, anciennement Orstom), sur la base d'une enquête nationale.

L'enquête administrative à laquelle ont pris part sur le terrain 30 services des forêts de

30 wilayas (départements) sur un total de 45 devait aboutir à :

- un inventaire des différents aménagements mis en place en milieu rural ;
- un premier jugement global sur la situation actuelle de la DRS par l'Administration forestière, en charge de la lutte contre l'érosion en Algérie.

Une étude scientifique et objective, sur un échantillon suffisant d'aménagements, devait rechercher les relations entre l'efficacité des divers ouvrages, leur réalisation et leur milieu environnant.

La dégradation de la sécurité en Algérie à partir de 1990 a empêché l'achèvement de cette phase scientifique. Nous présentons donc ici une synthèse des résultats de l'enquête administrative des méthodes DRS en Algérie, issue du dépouillement de 415 dossiers, concernant 10 types d'aménagements sur une superficie de 387 833 hectares représentant la diversité des conditions physiques (substrat, sols, climat...), humaines (occupation de l'espace, densité de la population, systèmes agricoles...) et des processus mis en cause (érosion en nappe, ravinement, glissement...). Cet article s'appuie sur des inventaires partiels déjà réalisés [8-11].

Milieu

La région nord de l'Algérie, formée essentiellement de montagnes récentes, datant du Tertiaire est un milieu méditerranéen fragile. La lithologie est constituée en majorité de roches tendres (schistes, marnes et argiles) alternant avec des roches dures (grès et calcaires), les pentes sont fortes et les paysages sensibles à l'érosion. Les sols issus de ces matériaux sont riches en argiles gonflantes favorables au déclenchement du ruissellement dès que les états de surface le permettent [12]. Cette région est également exposée à un climat d'influence méditerranéenne ; les pluies sont en général peu agressives, mais les averse orageuses de fortes intensités (> 100 mm/h) sont fréquentes (1/5 ans), en particulier en automne lorsque le couvert végétal est très limité [13, 14].

Selon Ghazi et Lahouati [15], les régions de montagne s'étendent sur 20 millions d'hectares, dont 63 % sont situés à plus de 800 m d'altitude. Le quart des terres est situé sur des pentes supérieures à 25 %, peu couvertes par la végétation dégradée.

Dans de nombreuses régions, la densité de la population (20 à 60 hab./km²) dépassant la densité naturelle acceptable, conduit à une forte pression sur le milieu par la mise en culture des sols sur fortes pentes, la réduction des surfaces pâturables et le développement du surpâturage (6 moutons/ha) sur un matorral dégradé. Les pratiques ancestrales de protection des sols et de gestion des eaux largement répandues autrefois par les Romains dans les pays méditerranéens [16, 17] sont actuellement très limitées en Algérie (Jijel, Bejaia) ; elles auraient été effacées par l'expansion des réalisations de DRS et de la mécanisation de l'agriculture.

Ces nombreuses circonstances ont favorisé la rupture de l'équilibre naturel. Ainsi, l'érosion s'est développée sous différentes formes : décapage de l'horizon humifère, formation de rigoles évoluant en ravines sur les versants, localement ravinement généralisé, glissements de terrain, dégradation des berges et divagation des oueds dans les vallées sont les signes d'une dégradation poussée et généralisée des paysages de cette région.

Parallèlement au développement de l'agriculture en montagne, les besoins en eau pour l'alimentation des villes et pour l'irrigation des plaines croissent rapidement, mais les ressources sont limitées. Aujourd'hui, les 48 barrages en exploitation affichent un taux de remplissage inférieur à 30 % de leur réserve (statistiques du ministère de l'Hydraulique, février 2003). Quand elles sont disponibles, les eaux sont polluées à cause de l'érosion. D'après Demmak [6], des concentrations de 200 g/L sont fréquemment observées dans les oueds. Pour faire face à cette situation, les pouvoirs publics ont développé une stratégie largement inspirée des travaux du *Soil and Water Conservation Service* (SWC) américain et des techniques de restauration des terrains de montagnes (RTM) en France [18, 19] appelées « défense et restauration des sols » (DRS). Parmi ces méthodes, la banquette a dominé les techniques de lutte contre l'érosion en Algérie depuis 1940. Le colloque international sur la conservation et la restauration des sols de Téhéran en 1961 a favorisé sa diffusion dans de nombreux pays méditerranéens.

Méthode

Pour faire le point sur les techniques de défense et restauration des sols en Algérie, et aboutir à un bilan le plus objectif possible, « faisant table rase » des avis contradictoires passionnés qui entourent les aménagements antiérosifs et la banquette en particulier, il a été décidé, en 1985, de lancer une enquête sur l'efficacité de la DRS à l'échelle nationale. Pour y parvenir un questionnaire unique, utilisant un langage commun sur lequel se sont mis d'accord plus de 200 participants lors du séminaire de Médéa en 1987, a été minutieusement élaboré par une équipe interdisciplinaire de chercheurs, de spécialistes de la lutte antiérosive et de forestiers. Avant le lancement de l'opération, le questionnaire a été validé par un test statistique dans une quinzaine d'aménagements [20]. Selon les objectifs attendus, le questionnaire a été structuré en trois parties :

- définition du milieu physique, biologique et humain ;
- aspect technique et prise en charge des méthodes de DRS ;
- bilan des projets sur les plans technique, économique et sociologique.

Deux phases ont été prévues :

1. La phase administrative vise à faire l'inventaire des techniques de DRS mises en place dans les quarante dernières années, en examinant leur localisation, leur état actuel, les surfaces traitées, leur coût,

leur mise en valeur dans une grande diversité écologique et socio-économique du pays, et à étudier la bibliographie disponible.

2. La phase scientifique a pour objet d'étudier objectivement les relations entre l'efficacité des différents types d'aménagements et les milieux où ils ont été implantés. Six bassins-versants (Isser-Sikak, Fergoug, Sly à l'ouest, Isser au centre et Ighil M'da, Bouhamdane à l'est) ont été sélectionnés pour une étude approfondie par traitement statistique (ACP), dans le cadre de cette phase scientifique.

Malgré la bonne préparation et le dévouement de l'équipe en charge, quelques retards dans la réalisation des enquêtes et des réponses imprécises bloquant le pré-dépouillement des données ont engendré des cascades de vérifications et de retards dans la publication des résultats. Compte tenu de ces problèmes, mais aussi de la complexité de la tâche, le questionnaire version 3 (QV3) comprenant 30 pages a été simplifié (QV4 en 12 pages). Le recouplement de ces deux questionnaires a permis finalement de parvenir aux résultats que nous allons présenter.

Résultats de l'inventaire

Situation générale des aménagements

Le *tableau 1* précise la répartition des surfaces par type d'aménagement et par wi-

layas, classées en trois régions : Nord-Est, Centre et Nord-Ouest. Ainsi, le dépouillement des 415 dossiers QV3 plus QV4 obtenus dans le cadre de cette enquête a permis d'inventorier 20 types d'aménagement (lesquels ont été regroupés par affinité en 10 groupes pour faciliter leur lecture) dans 30 importantes wilayas couvrant une superficie de 387 833 hectares (*figures 1 et 2*).

Ce chiffre paraît dérisoire compte tenu des prévisions qui portaient sur le traitement de 5 millions d'hectares, dont 2 millions à brève échéance [21]. Par ailleurs, on constate que les diverses formes de banquettes répertoriées (banquettes seules ou associées à d'autres ouvrages) qui constituent l'ossature de la DRS représentent plus de 80 % des surfaces aménagées, soit près des deux tiers du chiffre fréquemment annoncé dans la littérature [7]. L'implantation des aménagements dans les différentes régions du pays (*figure 1*) obéit à des considérations à la fois stratégiques et économiques. En effet, les aménagements se sont développés surtout dans les régions Nord-Ouest (50 %) et Centre (28 %) contre seulement 22 % pour la région Nord-Est (*tableau II*), avec pour objectif principal, la protection des barrages-réservoirs qui irriguent les plaines de la Mitidja, le couloir du Chélif et les plaines oranaises. La région de Tlemcen, éprouvée par de graves problèmes d'érosion (débordement torrentiel des oueds à l'automne 1940 et envasement progressif de l'estuaire du port de Ghazaouet (Ne-

Tableau 1. Coût des opérations de DRS.

Opérations	Fourchette des prix	Actualisés à :	Obs.
Reboisement nouveau	700 euros/ha	2003	1 200 plants/ha
Reboisement industriel	700-900 euros/ha	2003	Fertilisation
Plantation fruitière	720-850 euros/ha	2003	200 plants/ha
Plantation fourragère	450 euros/ha	2003	400 à 600 plants/ha
Fixation des berges	700-1 000 euros/ha	2003	
Plantation brise vent	350 euros/ha	2003	
Correction torrentielle	Gabions = 34 euros/m ³ Pierres sèches = 25 euros/m ³	2003	Prix variant en fonction de la disponibilité de la pierre
Ouverture de piste	3 400 à 5 600 euros/km	2003	
Amélioration foncière	6 000-8 000 euros/ha	2003	Défoncement, éperrage, cordons de pierres et plantation arborée
Retenue collinaire	17 045-34 091 euros	2003	20 000-100 000 m ³ par unité
Banquette	1 300-2 200 euros/ha	1985	Prix de l'OAMV de Médéa
Murette	28 euros/m ³		
Terrasses	136 euros/ha	1990	
Gradin forestier	29 euros/ha	1986	À la main projet INRF/ANRH
Amélioration pastorale	490 euros/ha	2003	Plantation d'Atriplex
Rootage	500 euros/ha	2003	

1 = environ 10 Dinars algériens en 2003.

Les prix varient en fonction de la nature du terrain, de la topographie, du mode de réalisation (manuelle ou par rooters, tracteurs) et de l'affectation de la parcelle : arboriculture, reboisement ou plantation fourragère.

Rootage : mat américain, utilisé dans le cadre de la défense et restauration des sols, qui signifie opération de défoncement du sol en profondeur par un appareil puissant, massif, monté sur roues et équipé de trois à deux dents, le *roooter*, tiré par des tracteurs ou *rippers*.

INRF = Institut national de recherche forestière ; ANRH = Agence nationale des ressources hydrauliques.

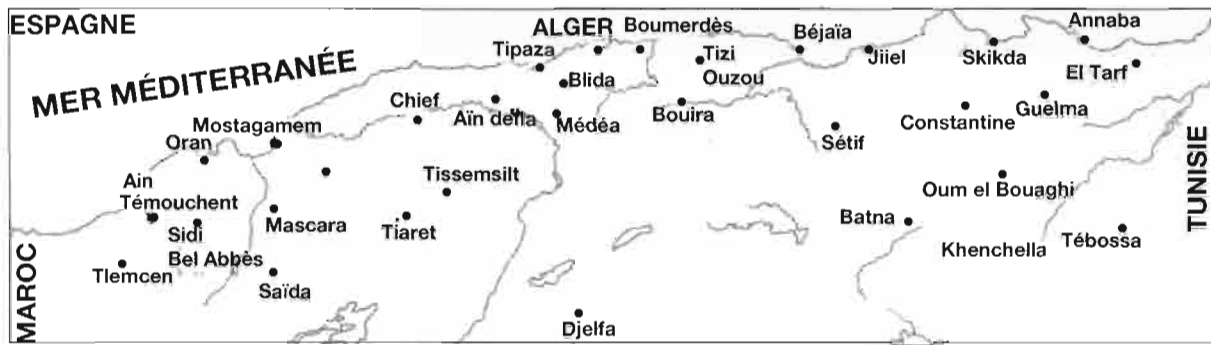


Figure 1. Carte de situation des wilayas d'Algérie concernées par l'enquête.

mours) a bénéficié, à elle seule, de 19 % de toute la surface traitée. En général, les travaux sont accordés en priorité aux régions menacées par l'érosion ou menaçant les intérêts économiques de la métropole. Ainsi, les interventions urgentes ont été décidées par les pouvoirs publics pour aménager en banquettes le bassin-versant de l'Oued el Kebir sur 13 000 hectares entourant les plaines colonisées de la Mitidja. Mais il arrive que dans certaines circonstances, l'objectif initial soit réorienté vers d'autres choix, essentiellement politiques, comme par exemple l'emploi des militaires démobilisés en

juillet 1940 [21, 24] ou le traitement en banquettes des monts du Dahra par un personnel non qualifié pour lutter contre le chômage en milieu rural. Il y a deux fois plus d'aménagements étalés sur marnes et argiles, roches peu résistantes à l'action conjuguée des pluies et du ruissellement (ravinement), que sur grès et calcaires, roches plus résistantes. Pourtant, on sait depuis longtemps que leur implantation sur ces roches argileuses sensibles aux glissements de terrain est déconseillée [1, 25]. On y rencontre surtout des banquettes et les grands aménagements mixtes associés à la correction

torrentielle et aux retenues collinaires (figure 3). En revanche, les reboisements se sont développés sur les sommets de versants où dominent les grès et calcaires, plus stables. La figure 4 montre que les deux tiers des ouvrages mécaniques sont concentrés essentiellement sur deux classes de pentes : 3-12 % et 13-25 %. La reforestation couvre 11 870 hectares sur la classe de pente 3-25 % alors que sur les pentes abruptes (> 40 %) elle ne dépasse pas 350 hectares. A noter que depuis le lancement du programme de rénovation rurale, l'introduction de l'arboriculture implantée sur banquettes s'est sensiblement accrue.

La nécessité d'aménager répond à deux enjeux majeurs :

- un impératif de sécurité lié à la protection des infrastructures hydro-agricoles pour intensifier l'agriculture des plaines et répondre à la demande sans cesse croissante en eau des grandes agglomérations ;
- l'accroissement de l'infiltration pour améliorer l'agriculture en milieu semi-aride ainsi que le montre la figure 5. Tels que définis, les ouvrages sont conçus en réseaux cohérents avec des fossés dont les caractéristiques varient en fonction des conditions du milieu, pour intercepter le ruissellement émanant de l'espace inter-ouvrage [1, 5]. Dans les conditions arides, l'ouvrage joue alors le rôle de régulateur des débits, pour accroître la rétention en eau des sols, recharger les nappes et,

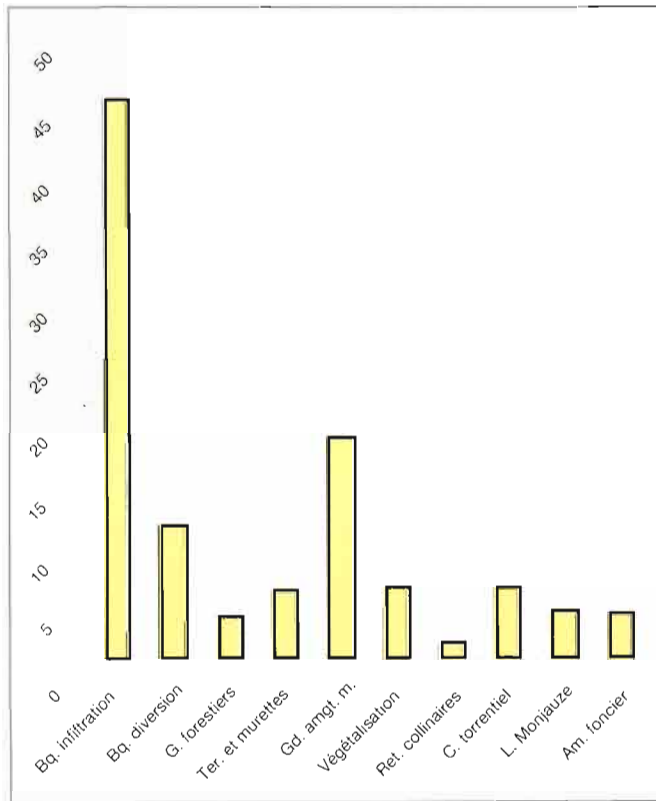


Figure 2. Distribution des surfaces aménagées (en % de la surface totale).

Bq = banquette ; G = gradins ; Ter. = terrasses ; Gd. amgt. m. = grand aménagement mixte ; Ret = retenue ; C. torrentiel = correction torrentielle ; L. = levée ; Am. foncier = aménagement foncier = rippage de la croûte calcaire.

Tableau II. Répartition par région des surfaces aménagées en fonction du mode de gestion du foncier.

Régions	Foncier		%
	Domestique %	Privé %	
Est	23	74	97*
Centre	25	70	95*
Ouest	29	69	98*

* Les 2 à 5 % complémentaires jouissent de statuts spéciaux.

éventuellement, réduire les débits de pointe dans les oueds lors des averses orageuses.

Ces arguments sont à la base de l'implantation massive de banquettes d'infiltration dans les contrées peu arrosées (91 067 hectares). Dans les zones step-piques, où il pleut moins de 400 mm de pluie par an, des opérations d'amélioration foncière par le *rootage* furent entreprises pour briser la croûte calcaire sur 1 m de profondeur et accroître la réserve hydrique du sol. Les jeunes plantations fruitières sont protégées par des rideaux de cyprès brise-vents. Enfin, plus de 14 000 m linéaires de levées de terre hautes de 2 m et larges de 6 à 8 m d'embase quadrillent les paysages pour freiner l'impact du ruissellement dans les parcelles cultivées. En milieu humide et subhumide, on rencontre surtout les banquettes de diversion (26 496 hectares) et les retenues collinaires (44 digues stockant 20 à 100 000 m³) réalisées pour la plupart dans la région de Kabylie (Tizi Ouzou, Bejaia et Jijel).

Aussi contradictoire que cela paraisse, le développement de la correction torrentielle en milieu semi-aride plutôt qu'en milieu humide se justifie par la violence des crues d'automne responsables des inondations catastrophiques. Le type de correction torrentielle utilisé est constitué d'une succession de petits seuils de 1 m de haut, inspirés des méthodes de correction torrentielle alpine (RTM). Les surfaces traitées sont dérisoires, compte tenu de l'extension des ravines. Toutefois, ils renseignent sur la manière dont était menée la lutte anti-érosive. Il s'agit de la petite correction active qui vise à endiguer le mal avant qu'il ne se développe [26]. Enfin, les gradins forestiers et éléments de banquettes, plus proches de leur stratégie de reforestation des hautes vallées, ont été développés essentiellement sur roches résistantes sur les versants escarpés.

D'importants investissements publics ont été consentis dans le cadre de la stratégie DRS [27] pour lesquels nous avons tenu à rapporter les coûts pratiqués par les principales entreprises de réalisation (actualisés ou en vigueur à la dernière date des travaux (tableau I). Le coût normalisé de la banquette revient entre 8 750 et 14 500 DA/ha en 1985 avant la première dévaluation monétaire, soit actuellement à 1 300 à 2 200 euros/ha. La variation dépend à la fois de la nature du terrain, de la topographie, de la réalisation (mécanique par *rooters* et tracteurs, ou manuelle) et de l'affectation parcellaire (arboriculture, reboisement, plantation fourragère).

État actuel des banquettes

L'analyse des données montre que les banquettes sur terres cultivées, soit 66 415 hectares, réalisées sur marnes et argiles, sont dans un état de dégradation avancée. Les plus touchées sont les banquettes d'infiltration (tableau III). Dans 41 % des cas seulement, les fonds sont fonctionnels ou ont une bonne tenue ; ils sont érodés dans 53 % des cas. Les bourrelets sont fonctionnels ou présentent une bonne tenue dans 63 % des cas ; les autres sont détruits ou effacés volontairement par des labours successifs. Les talus ne sont stabilisés que dans 22 % des cas rencontrés. Dans la région de Tizi Ouzou (19 368 hectares), Arabi et Asla [10] montrent que 19 % des ouvrages situés sur marnes et argiles sont endommagés par

les glissements de terrains et autant par le ravinement à partir de 13 % de pente. Le taux d'endommagement par ravinement croît proportionnellement à la pente du versant. En ce qui concerne les glissements, ce taux augmente surtout entre 13 et 25 % de pente. Sur les terres agricoles, les labours ont détruit 12 % des banquettes entre 3 et 25 % de pentes. Sur roches résistantes, 36 % des banquettes dégradées par tassement du sol et ravinement sont méconnaissables.

Seuls 14 % des ouvrages réalisés sur formation granitique résistent au cheminement du bétail. Qu'en est-il des banquettes de diversion ? Bien qu'elles ne représentent dans cette zone que 10 % des surfaces aménagées, les banquettes de diversion furent introduites sur roches peu

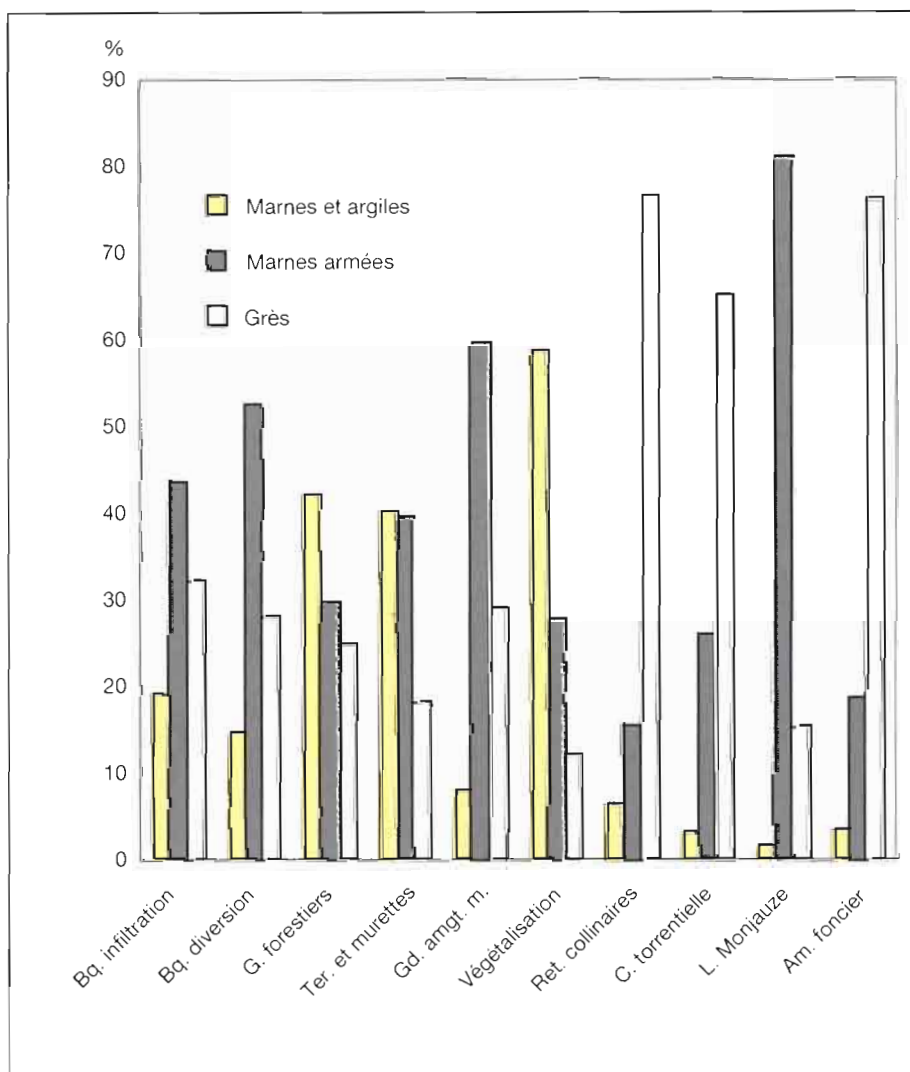


Figure 3. Répartition des surfaces aménagées en fonction de la lithologie (grès, marnes, marnes armées).

Bq = banquette ; G = gradin ; Ter. = terrasses ; Gd. amgt. m. = grand aménagement mixte ; Ret = retenue ; C. torrentielle = correction torrentielle ; L. = levée ; Am. foncier = aménagement foncier = rippage de la croûte calcaire.

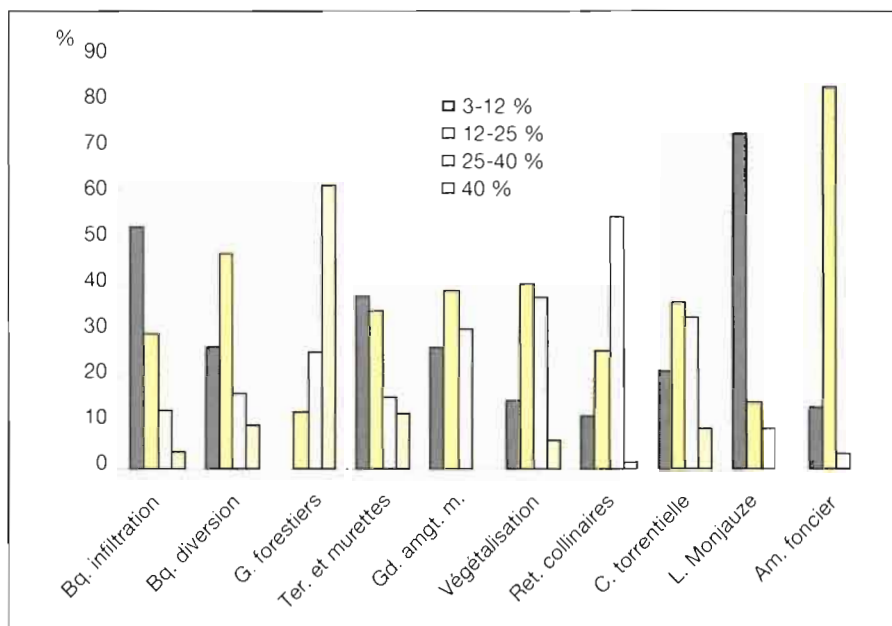


Figure 4. Distribution des surfaces en fonction des classes de pente (3-12 %, 12-25 %, 25-40 %, > 40 %).

Bq = banquette ; G = gradin ; Ter. = terrasses ; Gd. amgt. m. = grand aménagement mixte ; Ret = retenue ; C. torrentiel = correction torrentielle ; L. = levée ; Am. foncier = aménagement foncier = rippage de la croûte calcaire.

cohérentes dans des proportions comparables aux banquettes d'infiltration (28 %), mais dans 26 % des cas, sur pentes supérieures à 25 %, dans des conditions pluviométriques (500 mm et plus) favorables aux glissements (66 % des cas rencontrés). Cette situation explique en partie l'état de dégradation encore plus avancée de ce type de banquette de diversion (tableau IV). Les différentes parties touchées sont :

- le fond, très érodé (61 %) à cause de la dynamique du ruissellement en circulation. L'enquête montre que la pente longitudinale de 0,5 % est rarement respectée. De plus, Heusch [28] montre que, quelle que soit la forme donnée au fossé, les risques de débordement existent ;
- les bourrelets sont dans 53 % des cas détruits ou effacés aux points où se concentrent les eaux ;

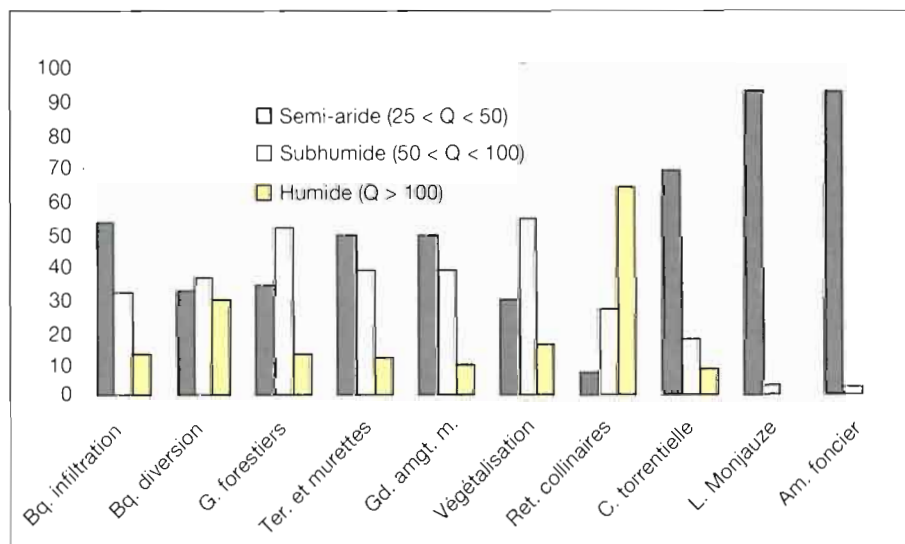


Figure 5. Répartition des aménagements en fonction du bioclimat.

Bq = banquette ; G = gradins ; Ter. = terrasses ; Gd. amgt. m. = grand aménagement mixte ; Ret = retenue ; C. torrentiel = correction torrentielle ; L. = levée ; Am. foncier = aménagement foncier = rippage de la croûte calcaire.

- les talus non enherbés, sous le poids de la saturation, s'érodent (72 %) et contribuent à la stagnation des eaux ;
- les exutoires qui évacuent les eaux des banquettes de diversion sont généralement ravinés.

Ce constat d'échec est également relaté dans diverses situations. Ainsi, Heusch [28] montre qu'au cours de la période 1947-1968, les banquettes n'ont eu aucune influence sur la vitesse de sédimentation du barrage de l'oued Fodda. Tamaghout, [29] étudiant la perméabilité des sols argileux sur les réseaux de banquettes qui entourent le barrage du Hamiz près d'Alger, parvient à la même conclusion. Ses travaux confirment les observations de Kerriou [30] sur les glissements de terrains provoqués par les réseaux de banquettes dans le bassin-versant de l'oued Arbatach (de la wilaya de Boumerdes). D'après Arabi et Asla [10], les facteurs qui expliquent ces glissements sont la nature des roches argileuses sensibles au glissement et le cheminement du bétail le long des ouvrages. Dans des circonstances analogues, Bannour [31], en Tunisie, fait remarquer que les banquettes n'arrêtent pas la progression du ravinement ; les surfaces ravinées ont augmenté de 12 % entre 1963 et 1973. Dans le même pays, Belaid [32] souligne le risque des banquettes sur roches marneuses qui sont détruites par des renards qui se forment à partir des fentes de retrait des argiles. Boudjadi [33] rapporte que les banquettes réalisées dans le périmètre de Djebala (Tlemcen, Algérie) sont entaillées à la base ; les causes avancées sont souvent la nature du sous-sol (marnes et argiles) et le risque de débordement de l'eau qui s'accumule dans certaines parties de la banquette. En effet, l'étude italienne réalisée dans le bassin versant d'Isseer-Sikak [34] a mis en évidence une relation entre la lithologie et les formes d'érosion : les glissements apparaissent sur les roches marno-gréseuses, tandis que le ravinement apparaît sur les marnes.

Les études sur la valorisation des aménagements ont montré que la banquette n'a pas une grande influence sur la réserve hydrique d'un sol brun calcaire sur 20 % de pente [35]. Les tests sur l'amélioration de production de trois cultures de légumineuses (pois chiches, lentilles et fèves) cultivées sur interbanquette (dont la réalisation des ouvrages remonte à 1975) ne sont pas significatifs [36]. Sur les versants marneux du pré-Rif (Maroc), Sabir et Boudhar [37] ont réalisé une enquête sur huit périmètres d'aménagement en banquettes avec plantations d'oliviers et de vignes. En 1999, deux des périmètres ont disparu et les autres ont réussi à 50 %. L'état des arbres est très moyen. Des ravines se sont déve-

Tableau III. État des banquettes d'infiltration (en % de la surface aménagée).

État de la banquette	Fonds %	Bourrelets %	Talus %
Fonctionnelle	23,6	11,2	
Bonne tenue	17,3	22,6	
Moyenne tenue		29,4	
Partiellement détruite		15,6	
Effacée		18,5	
Stabilisée			22,1
Légère érosion en nappe	29,4		
Très érodée	23,6		72,5

loppées ainsi que des glissements de terrain sur les versants marneux de plus de 25 % de pente : l'absence d'entretien est à l'origine des échecs. Le taux de remboursement n'est que de 5 %, alors que la production oléicole représente 56 % des revenus des exploitations et 71 % de la production végétale. Récemment, la plantation d'oliviers sans banquettes mois avec apport de fumier a beaucoup progressé. En tournée dans l'Oranie, Aubert [38] observe en revanche la bonne tenue des banquettes 30 ans après leur mise en place sur sols dérivés du granit. Il constate que seuls les arbres plantés n'ont pas résisté ou ont été coupés. Dans les marnes armées de calcaire du pré-Rif marocain, Heusch [28] montre que, sur sols saturés, 40 mm de pluie suffisent à déclencher l'érosion. Dans son bilan sur les banquettes [7], il précise que ces ouvrages conviennent seulement dans le cas particulier des sols limoneux et d'orages d'été, violents et brefs.

Analysant l'inventaire de la DRS en Oranie, Taabni et Kouti [39] rapportent que les réseaux de banquettes qui ont réussi sont peu nombreux et situés sur de petites parcelles boisées en pins d'Alep, sur terrains domaniaux, sans litige. En réalité, la banquette mal entretenue devient un facteur d'accélération de l'érosion [40], car la moindre brèche non colmatée entraîne une véritable réaction en chaîne dans tout le réseau (glissement) lors des pluies torrentielles et prolongées.

Les utilisateurs des terres apprécient diversement les aménagements selon qu'ils sont

propriétaires des terres aménagées ou qu'elles appartiennent à l'État. A signaler que les réponses ont été fournies durant la période 1986-1990, au moment où l'agriculture est en pleine restructuration après l'échec de la révolution agraire, ce qui explique le taux élevé d'abstention, surtout pour ce qui est des terres domaniales (41 %). Mais 77 % des paysans désapprouvent les banquettes implantées sur leurs terres (figure 6).

Parmi les causes de rejet figurent surtout le sentiment d'expropriation des terres, les pertes de surface et, dans une moindre mesure, une entrave à la liberté de circulation des riverains. La réaction des fellahs est de s'opposer énergiquement à l'implantation des aménagements (42 %) sur leurs terres et ils refusent de les entretenir (65 %). A ce sentiment de frustration s'ajoute l'indifférence totale, d'où le délaissement et l'abandon des aménagements. Une autre raison du refus provient du système d'élevage errant : le pâturage libre et la vaine pâture sont incompatibles avec la création de vergers sur les talus des banquettes. Enfin, le système foncier (indivision de certaines terres) contribue, à terme, au désistement des fellahs surtout après l'indépendance. Quand les travaux de DRS sont réalisés en dehors de leurs terres, ils sont appréciés par 19 % (contre 5 % chez les privés) car ils génèrent un revenu supplémentaire [41]. Cette réaction de rejet des paysans provient surtout de la crainte que l'État qui a financé et réalisé l'aménagement, finisse par se considérer comme le propriétaire des ter-

res oménogées (pour mémoire, la nationalisation des terres en Tunisie).

Évolution de la stratégie DRS

La stratégie de défense et restauration des sols a beaucoup évolué en quatre décennies. Comme les montagnes d'Algérie étaient surpeuplées, l'option de reboisement, qui fut introduite en France avec succès dans le cadre de la RTM [19], a été limitée à 21 645 hectares de terres situées, pour la plupart, sur les hauts versants des collines. D'ailleurs les premiers reboisements réalisés dans le cadre de la loi forestière de 1903 en Oranie ont été un échec. D'après Benchetrit [21], 10 000 hectares seulement furent reboisés en 34 ans. Mais devant les succès remportés par le *Soil Conservation Service* dans la grande plaine semi-aride des États-Unis, et les encouragements apportés par Lowdermilk [42] en tournée dans les pays du Maghreb, aux équipes en place, la stratégie DRS fut définitivement acceptée en privilégiant la primauté des ouvrages mécaniques sur la végétalisation. Ce sont alors les aménagements mécaniques, et particulièrement les banquettes, qui furent répandus sur de vastes surfaces agricoles appartenant aux domaines aussi bien public que privé. Les travaux de défense et restauration des sols furent confiés à un service technique de DRS créé par la loi du 2 février 1941, placé sous l'autorité du Gouverneur général d'Algérie. Contrairement à la SWC, la DRS ne s'est pas développée dans un environnement scientifique. La banquette fut importée des États-Unis sans expérimentation préalable [1]. De plus, les aménagements DRS ont été souvent imposés aux fellahs au nom de l'intérêt général. Tenus à l'écart pour cause d'analphabétisme, les paysans n'ont pas été suffisamment préparés ni informés de l'utilité de ces aménagements. Après 20 années de DRS, les résultats portant sur une tranche de 250 000 hectares sont décevants [21]. Le constat fait ressortir une reprise de l'érosion sur les surfaces traitées. Les paysans boudent ces travaux qui constituent des obstacles à leurs activités.

Observateur lucide, Monjauze, influencé par le courant de pensée des forestiers réformateurs Le Play et Albert Fabre [18], a compris que la lutte contre l'érosion ne peut se ramener à un problème purement technique, celui de la promotion de la banquette. En innovateur, il a introduit un nouveau concept : celui de l'intégration de la banquette dans le contexte socio-économique du pays. La conciliation entre l'intérêt des paysans vivant sur leurs terres et des objectifs de protection l'a conduit à développer une nouvelle doctrine : celle de la rénovation rurale. Les enseignements tirés du passé ont conduit à l'élaboration

Tableau IV. État des banquettes de diversion (en % de la surface aménagée).

État de la banquette	Fonds %	Bourrelets %	Talus %	Exutoires %
Fonctionnelle	11,2	6,6		
Bonne tenue	17,3	18,4		
Moyenne tenue		17,2		
Partiellement détruite		34,2		
Effacée		18,6		
Stabilisée			22,1	18,2
Légère érosion en nappe	9,5			
Très érodée	61,3		72,5	73,2

d'un vaste programme en faveur des paysans. Il s'agit de créer un système agricole fondé sur le principe de la rentabilité des cultures (intérêts des agriculteurs) tout en préservant l'environnement (intérêts collectifs). La prépondérance de l'action agronomique sur la protection se manifeste par des actions de mise en valeur dans les steppes, la résorption de la jachère nue, la diversification des systèmes de production par l'introduction de plantes vivaces, arborescentes et frutescentes mieux adaptées aux conditions du milieu que la céréali-culture extensive. Les événements liés à la révolution algérienne, puis l'avènement de l'indépendance en 1962, n'ont pas permis la concrétisation de ce programme. Les terres furent aussitôt nationalisées et les fellahs sont devenus des salariés travaillant les terres de l'État. Pour faire face aux problèmes socio-économiques en milieu rural, la priorité a été accordée à la résorption du chômage.

Conclusion et propositions

La lutte contre l'érosion s'est développée en Algérie avec une stratégie d'équipement rural appelée la DRS. Dans le cadre de cette enquête, 10 types d'aménagements ont été répertoriés, couvrant 387 833 hectares dans 30 wilayas représentatives de la moyenne montagne méditerranéenne algérienne : 80 % des surfaces aménagées sont en banquettes, dont 20 % sont effacées par les labours, 30 % sont détruites par ravinement/glisement, 30 % n'ont jamais été entretenues et sont en mauvais état et seulement 20 % sont en bon état, mais on peut se demander si elles ont fonctionné.

La méthode d'enquête administrative par questionnaire a permis de donner des ré-

ponses globales non définitives : c'est pourquoi il est essentiel de poursuivre le travail dans sa phase scientifique en analysant les aménagements dans leur contexte environnemental. La banquette a été réalisée dans un contexte autoritaire défavorable, mais les changements conduits dans le cadre de la rénovation rurale ont suscité beaucoup d'espairs auprès des paysans. La lutte contre l'érosion ne peut se concevoir sans le développement du monde rural. La banquette n'a pas freiné l'érosion là où elle fut introduite. L'analyse de son état de dégradation montre que l'érosion est partout présente sous toutes ses formes, même dans les aménagements encore fonctionnels. Les causes de son échec sont multiples : effort expérimental insuffisant, utilisation en dehors de ses limites de validité, coût exorbitant, d'où l'inadaptation de l'ouvrage dans les conditions locales. Les gradins et terrasses progressives, plus proches de la stratégie traditionnelles des paysans, semblent mieux convenir. Cette expérience montre les limites d'utilisation des stratégies d'équipement quand elles ne prennent pas en considération les intérêts des paysans. La planification doit englober aussi bien l'amont que l'aval. La carte d'occupation des terres doit faire ressortir les zones qu'il convient de traiter. Les facteurs essentiels à prendre en considération dans le cadre d'un programme antiérosifs sont :

- l'intégration des communautés paysannes dans les programmes de développement ;
- l'amélioration des systèmes de production ;
- la recherche d'ouvrages dont le rapport coût/efficacité serait optimum ;
- le choix de technologies proches des paysans et adaptées au milieu écologique ;

- la participation graduelle des paysans au financement ou à leur entretien ;
- la définition des rôles et responsabilités des intervenants par contrats relatifs à l'aménagement des ressources naturelles.

Tous ces points restent à développer dans le cadre d'une politique globale d'aménagement du milieu rural. Cependant, les études sur la stratégie GCES en Algérie [43, 44] montrent qu'il est possible d'intensifier l'agriculture en Algérie sans dégrader l'environnement, en développant une approche participative reposant sur une lutte biologique. ■

Références

1. Saccardy L. Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et eaux* 1950 ; 11 : 3-19.
2. Putod R. Mayens complémentaires de la lutte contre l'érosion dans le cadre de la rénovation rurale. *Annales du centre algérien de recherche et d'expérimentation forestière* 1962 ; 1 : 4-23.
3. Monjauze A. *Rénovation rurale. Rôle et dispositif des aménagements d'infrastructure*. Alger : Service des forêts et de la défense et restauration des sols. Direction de l'agriculture et des forêts, 1961 ; 16 p.
4. Plantié I. *Techniques françaises algériennes des banquettes de défense et restauration des sols*. Alger : Ministère de l'Agriculture, 1961 ; 22 p.
5. Greco J. L'érosion, la défense et la restauration des sols, et le reboisement en Algérie. *MARA Algérie* 1966 ; 303 p.
6. Demmak A. *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie*. Thèse de docteur-ingénieur, Paris, 1981 ; 323 p.
7. Heusch B. Cinquante ans de banquettes de DRS-CES en Afrique du Nord : Un bilan. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 153-62.
8. Hammoudi A, Monjengue BS, Roose E, et al. Enquête sur l'efficacité des aménagements de DRS en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1989 ; 9 : 14-8.
9. Kedaid O, Bourougaa L. *Synthèse du bilan DRS en Algérie*. Alger : INRF 1994 ; 117 p. + cartes.
10. Arabi M, Asla T. États de dégradation des banquettes dans le Massif Central de Kabylie en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1998 ; 18 : 374-9.
11. Asla T. *Contribution à l'étude de l'efficacité des travaux de DRS en Kabylie (W. de Tizi Ouzou) Algérie. État actuel et aspect morphologique des réseaux de banquettes. Utilisation d'un questionnaire d'enquête*. Thèse de magister en forêt, Univ Tizi Ouzou 2002, 134 p.
12. Monnier G, Boiffin J, Papy F. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 123-31.
13. Arabi M, Roose E. Influence de quatre systèmes de production de moyenne montagne méditerranéenne algérienne. *Bull Réseau Erosion* 1989 ; 9 : 39-51.

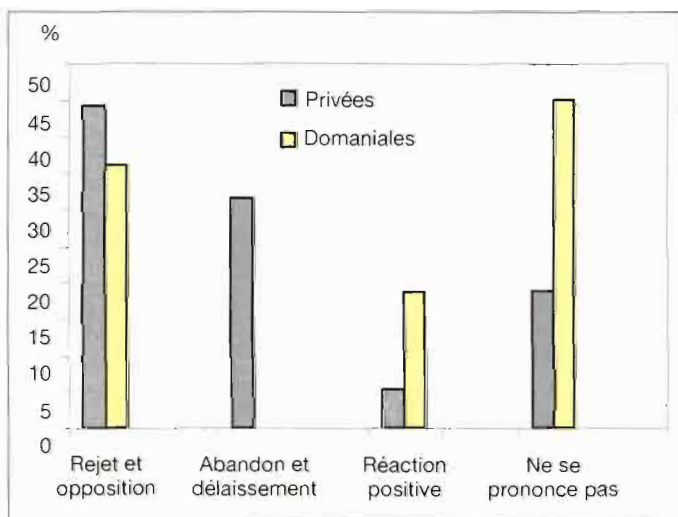


Figure 6. Degré d'approbation des utilisateurs en fonction de la nature juridique des terres.

14. Arabi M. *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen Médéa Algérie*. Thèse Doctorat, université de Grenoble, 1991, 272 p.
15. Ghazi A, Lahouati R. *Algérie 2010, sols et ressources biologiques*. Alger : Institut national des études de stratégie globale (INESG), 1997 ; 39 p.
16. Plateau H. La défense et la restauration des sols du Maroc. *Rev Forestière Française (Paris)* 1976 ; 28 : 231-8.
17. Roose E, Sabir M, De Noni G. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 523 p.
18. Lilin C. Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19^e siècle. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 139-45.
19. Mura R. La restauration des terrains de montagne dans l'approche actuelle de la conservation des sols. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 258-363.
20. Lefay O. *Étude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie (Médéa : zone de l'Atlas tellien central)*. Rapport de stage Cnearc, 1986, 48p. + Annexes.
21. Benchetrit M. *L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie*. Paris : PUF, 1972 ; 216 p.
22. Kadik B. Journées de travail sur l'érosion. Quelques observations sur les problèmes d'érosion des sols et des techniques de lutte en Algérie Alger : INRF, 1978 ; 16 p.
23. Heddadj D. La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 168-75.
24. Sari D. *L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis (Algérie)*. Thèse doctorat. Alger : éditions SNED, 1977 ; 621 p.
25. Monjauze A. Notes sur la mécanisation des travaux de DRS-CES en Afrique du Nord. *MARA Algérie* 1961 ; 11 p.
26. Deymier C. Les outils du génie civil dans la lutte contre l'érosion torrentielle. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 28-39.
27. Cleaver KM. *The agricultural development experience of Algeria, Morocco and Tunisia*. World Bank Staff Working Paper n°552. Washington (DC) : World Bank, 1982 ; 20 p.
28. Heusch B. L'érosion du Pré Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif Occidental (Maroc). *Annales de la Recherche Forestière (Rabat, Maroc)* 1970 ; 12 : 176 p.
29. Tomagault M. *Note sur la banquette et son effet sur les sols et la stabilité des versants argileux en zone humide (B.V du Hamiz) Algérie*. Actes du Séminaire sur la DRS, INRF, Médéa, novembre 1987 : 215-6.
30. Keriou M. *L'érosion dans le bassin-versant de l'Oued Arbatache : Étude approfondie des sous-unités du bassin-versant (O. Allel, Ferkioua) sur substrat marneux et flyschs*. Alger : INA, 1979 ; 162 p.
31. Bannour H. *Problème de l'aménagement anti-érosif d'un bassin versant de la Tunisie centrale : le cas de l'Oued Foul*. DS N°530. Tunis : s.n., 1978 ; 29 p. + carte.
32. Belaid R. *Le bassin-versant du moyen Milane entre pont du Fahs et le Djebel Ouest : étude géomorphologique*. Thèse ULP, Strasbourg, 1965, DS : 304, 200 p.
33. Boudjadi H. *Projet de DRS et reboisement, Djebala, Tlemcen Algérie ; Mostaganem*. Mémoire d'ingénieur agronome ITA, 1979, 194 p.
34. Centro Studi Ricerche. *Étude des bassins-versants des Oueds Isser et Sikkak*. Alger : Secrétariat d'État aux forêts (SEFOR), 1974 ; 3 volumes, 640 p.
35. Djellal R. *Tests sur l'amélioration des réserves hydriques d'un sol par la technique des banquettes d'infiltration totale*. Diplôme ingénieur INES de Blida, 1989 ; 68 p. + annexes.
36. Kousseir. A. *Tests phytotechniques et physiques d'amélioration de la réserve hydrique au moyen de certaines techniques de DRS*. Diplôme Ingénieur INES de Blida, 1989, 57 p. + annexes.
37. Sabir M, Boudhar B. Efficacité de la DRS fruitière sur versants marneux du Pré-Rif, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 297-310.
38. Aubert G. Réflexions sur l'utilisation de certains types de banquettes de « Défense et restauration des sols » en Algérie. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 147-51.
39. Taobni M, Kouti A. Stratégies de conservation, mises en œuvre et réactions du milieu et des paysages dans l'Ouest algérien. *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 215-29.
40. Bellatreche A. *Érosion et perspectives de conservation des sols dans le bassin sédimentaire de Médéa-Beni-Slimane, Algérie*. Thèse de géographie USTHB Alger, 1986, 276 p.
41. Moachou B. Relation entre régime foncier des terres dans les bassins-versants et l'érosion. *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 241-2.
42. Lowdermik WC. *Érosion et conservation des sols en Algérie*. Alger : Services de la colonisation et de l'hydraulique, 1939 ; 32 p.
43. Roose E, Arabi M, Brahmia K, Chebani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
44. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pédol FAO (Rome)* 1994 ; 70 : 420 p.

Fonds Documentaire IRD
Cote: A * 33558 Ex: 2Boukhil Morsli¹
Mohammed Mazour²
Nadjia Mededjel³
Abdelkrim Hamoudi⁴
Eric Roose⁵¹ Institut national de recherche forestière
(INRF),
BP 88,
Mansourah,
Tlemcen,
Algérie
<morbinrf@yahoo.fr>² Faculté des sciences,
Dépt Foresterie,
Tlemcen,
Algérie

<mohamed_mazour@yahoo.fr>

³ Institut national de recherche forestière
(INRF),
BP 893,
RP Tlemcen,
13000,
Algérie⁴ Institut national de recherche forestière
(INRF),
BP 73,
Chéraga,
Alger,
Algérie⁵ Institut de recherche pour le développement
(IRD),
Laboratoire MOST,
BP 64501
34394 Montpellier cedex 5
<roose@mpl.ird.fr>Influence de l'utilisation des terres
sur les risques de ruissellement
et d'érosion sur les versants semi-arides
du nord-ouest de l'Algérie

Résumé

L'érosion cause actuellement de sérieux problèmes à la production agricole, caractérisée par une grande variabilité et un déficit chronique. La gravité de ce phénomène semble dépasser tous les efforts consentis jusque-là pour juguler les divers processus d'érosion. L'aridité climatique de ces vingt dernières années n'est probablement pas étrangère à l'accélération de la dégradation du milieu rural. Mais cette contribution montre qu'en plus de la sécheresse qui a marqué les paysages du Nord-Ouest algérien, certaines activités humaines (défrichage des versants, surpâturage et techniques culturales) semblent responsables de cette dégradation. Les auteurs ont donc testé diverses alternatives de gestion des terres pour tenter de réduire les risques d'érosion et d'amorcer une augmentation de la productivité des terres et du travail. Les résultats ont montré que l'exploitation continue des sols avec un entretien régulier des matières organiques du sol ne présente pas de grand risque en année normale : les sols seraient très résistants et les pluies généralement peu érosives. En revanche, les sols nus épuisés et/ou abandonnés, les jachères surpâturées et les pistes sont à l'origine de ravinements bien plus graves que l'érosion en nappe. Malgré le déficit pluviométrique enregistré, certaines formes de gestion ont été à l'origine de forts ruissellements ($K_{rmax} = 56\%$) mais, globalement, l'érosion sur parcelles de 100 m^2 et le ruissellement en nappe restent modérés ($K_{ram} = 3$ à 10% ; $E = 0,3$ à 6 t/ha/an), ce qui confirme les résultats de nombreux auteurs en Afrique du Nord. Cependant, l'érosion en nappe décape sélectivement les argiles, matières organiques et nutriments associés et altère la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol, source essentielle de la fertilité.

Mots clés : Techniques culturales ; Érosion ; Algérie.

Summary

Impact of land use on runoff and erosion risks in the semiarid hillslopes of North Western Algeria

Erosion is currently causing serious problems to an agricultural production whose characteristics are irregularity and chronic deficit. The gravity of this phenomenon seems to exceed all the efforts made to check the various erosion processes. The climatic aridity of these last 20 years has probably accelerated the degradation of the rural environment. But this contribution shows that in addition to the drought, certain human activities (deforestation, overgrazing, cultural techniques) appear as the most significant causes of soil degradation. The authors have thus tested various land uses in order to reduce erosion processes and trigger an increasing productivity of land and labor. The results showed that the continued exploitation of the soils together with a regular maintenance of soil organic matter (SOM) does not entail a high sheet erosion risk. It is the bare, exhausted and abandoned fields, the prolonged



and overgrazed fallows, and the roads which cause the most significant degradations. In spite of a recorded rainfall deficit, certain forms of management are at the origin of strong runoff ($K_{rmax} = 56\%$) but generally, erosion and runoff remain moderate ($K_{ram} = 3$ to 10% ; $E = 0,3$ to 6 t/ha/year), which confirms the results found by many authors in North Africa. However, sheet erosion selectively scours clay, SOM and nutrients and deteriorates the thin organo-mineral film of the topsoil which is the essential source of fertility.

Key words: Cultural Practices; Erosion; Algeria.

Les versants du Nord-Ouest algérien qui représentent un grand potentiel de production agricole sont affectés depuis un siècle par une dynamique de dégradation du couvert végétal et des sols. Si l'érosion est importante à cause de la fragilité du milieu physique et de l'agressivité climatique, il semble que l'influence du mode de gestion des terres devient de plus en plus déterminante depuis la persistance de la sécheresse au cours des vingt dernières années. Cet article analyse justement l'impact du mode d'utilisation des terres sur divers processus d'érosion et sur la productivité des sols représentatifs de ces moyennes montagnes méditerranéennes semi-arides.

Aujourd'hui, les équilibres entre la végétation, le sol et l'eau se trouvent perturbés. Le défrichement, le surpâturage, la mise en culture des terres sur forte pente sont autant de facteurs liés à l'homme qui ont accentué les phénomènes de dégradation. En conséquence, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active, et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportées annuellement par les eaux [1]. Les pertes annuelles en capacité de stockage des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m^3 et sont dues à l'envasement [2]. La subsistance des populations est de plus en plus menacée par l'accélération de ces phénomènes d'érosion.

De grands moyens ont été déployés depuis plusieurs décennies, mais ces efforts en matière d'aménagement et de protection des sols n'ont pas toujours atteint leurs objectifs. Les échecs constatés au niveau des nombreux aménagements sont essentiellement dus aux erreurs d'appréciation des types d'érosion, de la complexité des processus, du manque de suivi et des coûts élevés [3]. Pour mieux contrôler les divers types de dégradation, il est nécessaire de mieux comprendre les processus en cause et d'évaluer l'efficacité des facteurs de risque.

Deux écoles s'affrontent encore aujourd'hui sur les stratégies de lutte : l'une développée par Bennet [4] qui structure la lutte antérosive autour de moyens mécaniques (terrasses et drains), l'autre développée par Ellison [5] qui organise la lutte au

niveau des systèmes de culture pour réduire le volume et la vitesse du ruissellement au champ en améliorant le couvert végétal et la rugosité du sol.

L'Institut national de recherche forestière (INRF) (avec la collaboration des universités de Tlemcen et de Mascara) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD-ex Orstom) dans le cadre d'une convention bilatérale, ont testé une nouvelle stratégie participative appelée Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) [6]. Cette approche fait l'objet, depuis 1985, de plusieurs expérimentations dans le Nord algérien. À partir de cette nouvelle méthodologie, s'est développé un programme à plusieurs volets : enquête sur l'efficacité de la défense et restauration des sols (DRS), aménagement de micro-bassins-versants et quantification des différents processus d'érosion en fonction des systèmes de gestion. C'est de ce dernier volet dont il est question dans cet article.

Des recherches sur le ruissellement, l'érosion en nappe, l'érodibilité des sols et la production de biomasse ont été menées sur un réseau de 30 parcelles d'érosion réparties sur différents sites du Nord-Ouest algérien. Les principaux sols et les systèmes de culture les plus pratiqués dans ces régions ont été testés ainsi que différentes améliorations et innovations en vue d'une exploitation optimale et durable des ressources naturelles. Ces parcelles expérimentales sont localisées dans les bassins-versants de Mascara et de Tlemcen qui constituent le réservoir d'eau de toute la région ouest de l'Algérie (10 barrages).

Matériel et méthode

L'approche méthodologique repose sur l'analyse du ruissellement et de l'érosion en fonction des systèmes de gestion au niveau de parcelles expérimentales de $100 m^2$ de type Wischmeier [7]. Sont également étudiés les facteurs de l'agressivité climatique et les caractéristiques du sol.

Ces recherches sont menées sur un dispositif expérimental comprenant 30 parcelles d'érosion réparties au niveau des monts de Tlemcen et de Mascara (figure 1).

Les parcelles d'érosion sont constituées d'un pluviomètre et d'un champ de $100 m^2$ isolé par des tôles fichées en terre. En aval de cette parcelle, un canal comprenant un piège à sédiments grossiers (TDF), dirige les eaux et les suspensions (MES) dans deux cuves de stockage à travers un partiteur à 15 tubes. La pluie, le ruissellement et les pertes en terre ont été mesurés après chaque pluie. Les pertes en terre englobent les particules fines en suspension (argile + limons + matières organiques) et les sédiments lourds (agrégats et sables) tractés à la surface du sol.

Les parcelles sont regroupées en blocs comprenant :

- un témoin international, qui représente une jachère travaillée dont le sol est maintenu dénudé durant toute l'année ;
- un témoin régional avec des cultures traditionnelles : céréales, jachères, légumineuses et fourrages ;
- des parcelles comportant différents types de végétation naturelle (forêts, matorrals, parcours) ;
- des parcelles améliorées (engrais, travail du sol, semences sélectionnées ou regarnissage par des arbustes fourragers et mise en défens).

L'agressivité climatique est déterminée à partir des caractéristiques des pluies (hauteur, intensité et érosivité) par les différentes stations selon la technique décrite par Wischmeier [7]. La sensibilité des sols à l'érosion est évaluée à partir d'indicateurs tels que la stabilité structurale et le taux de matières organiques (MO).

La zone étudiée du Nord-Ouest algérien est caractérisée par :

- un climat de type méditerranéen semi-aride ;
- des pluies annuelles variant de 280 mm à 500 mm : elles tombent de septembre à mai, avec deux pointes en automne et au printemps. Ces pluies sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité (l'intensité maximale atteint 84 mm/h en 30 mn) ;
- un relief fortement disséqué, ayant souvent de fortes pentes et un réseau de drainage très dense ;
- une lithologie caractérisée par l'alternance de roches tendres (sensibles à l'éro-

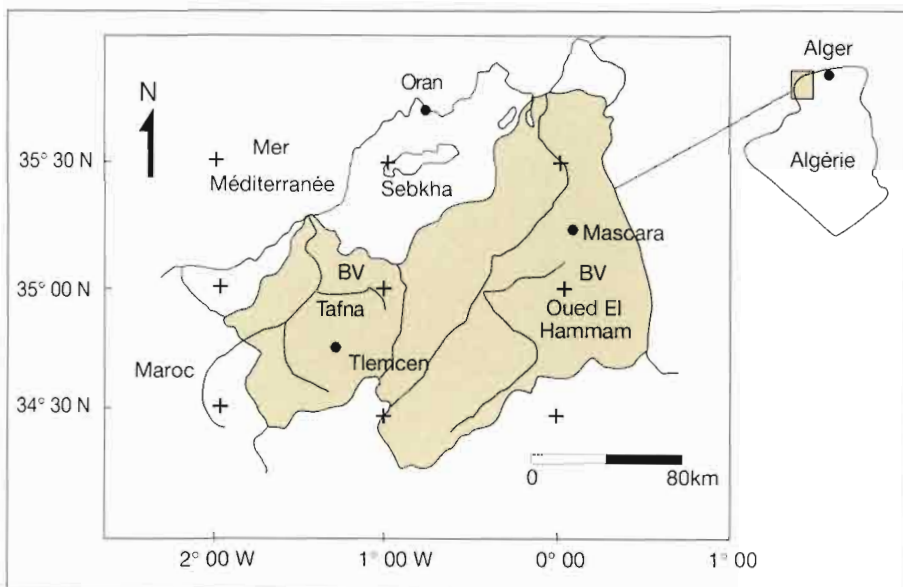


Figure 1. Carte de situation de la zone nord-ouest de l'Algérie.

sion) et de roches plus résistantes dont l'association va marquer le relief : on trouve souvent une roche dure protégeant une roche tendre très pentue ;
 - des formations végétales très dégradées, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération.

Résultats et discussion

Précipitations

Les pluies annuelles ont varié de 280 à 550 mm. Durant la dernière décennie, les pluies ont été généralement faibles : 65 % des averses ont une hauteur inférieure à 10 mm. Toute la région a enregistré un

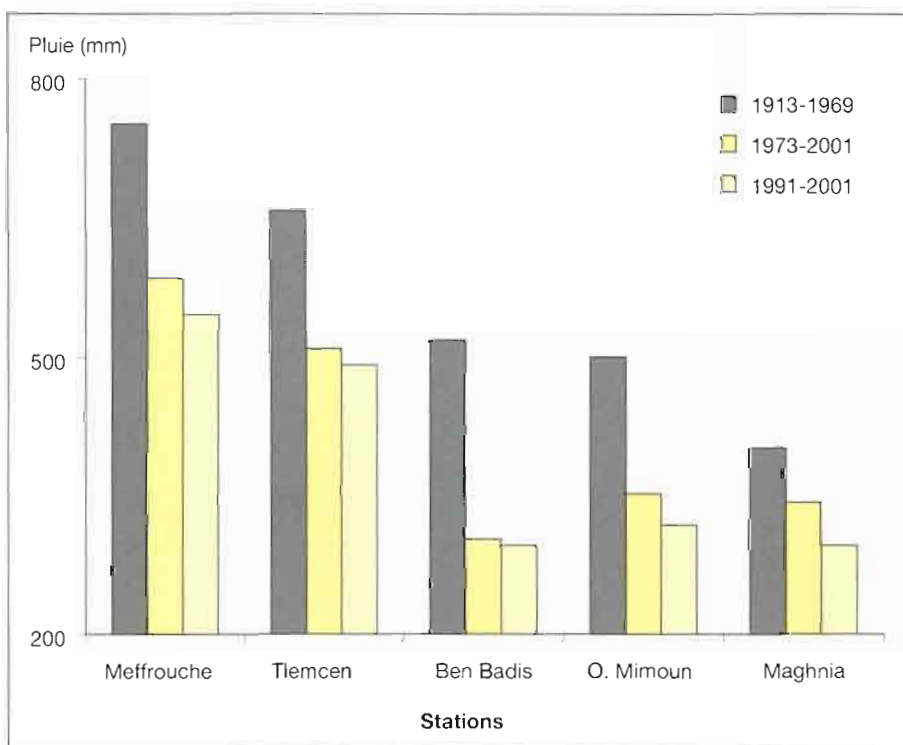


Figure 2. Réduction des pluies annuelles de 1913 à 2001.

déficit notable de 60 à 280 mm par rapport aux moyennes sur 30 ans [8]. Non seulement la hauteur des pluies a été modeste dans toutes les stations mais aussi leur intensité, d'où une agressivité climatique faible.

Les précipitations mensuelles sont également très irrégulières et concentrées sur quelques jours des mois les plus pluvieux, laissant apparaître des périodes de sécheresse relative au cours de la saison pluvieuse. Les averses de la fin d'été et d'automne sont les plus dangereuses, car elles tombent sur des sols tassés, encroûtés et dénudés après la saison sèche.

Les précipitations enregistrées lors des trois dernières décennies, y compris la période où ont été effectuées les mesures, sont relativement faibles (figure 2).

L'indice Rusa de l'agressivité des pluies oscille entre 30 et 100 en moyenne (figure 3) et le rapport Rusa/hauteur des pluies annuelles est de l'ordre de 0,10 à 0,12 dans le Nord-Ouest algérien. Ce rapport est de 0,12 dans l'oued Mina (Algérie), où le module pluviométrique annuel varie de 150 mm à 300 mm, alors que ce rapport varie de 0,45 à 0,60 en Afrique occidentale et de 0,20 à 0,30 dans les montagnes de l'Afrique centrale [9-10]. Les pluies ordinaires sont donc relativement peu agressives.

Il faut noter que malgré les faibles valeurs de l'indice d'agressivité des pluies, l'activité de l'érosion est toujours intense comme en témoignent les paysages très dégradés, les versants ravinés et les inondations catastrophiques répétées. Cette situation paradoxale semble indiquer que les séries de pluies saturantes et la faible épaisseur du sol sont à l'origine de ces phénomènes catastrophiques de ravinement bien plus que l'agressivité des pluies orageuses, très intenses mais limitées dans l'espace et dans le temps [8].

Ruissellement

Le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram %) a été modeste : selon les années, il varie de 4 à 13 % sur sol nu, de 1,5 à 10 % sur parcelles cultivées traditionnelles et de 0,3 à 6 % sur cultures améliorées (tableau I). Cela s'explique en partie par les pluies déficitaires. En revanche, le ruissellement maximum (K_{max} %) a atteint des valeurs relativement élevées : jusqu'à 56 % à Tlemcen et 80 % sur sol nu tassé à Médéa.

C'est lors d'événements exceptionnels (de fréquence décennale) que se déclenchent les graves manifestations de ravinement, des crues soudaines des oueds, des glissements de terrain et l'envasement rapide des réservoirs. Souvent, le ravinement s'organise au pied de zones de glissement de terrain dans des paysages concaves où les

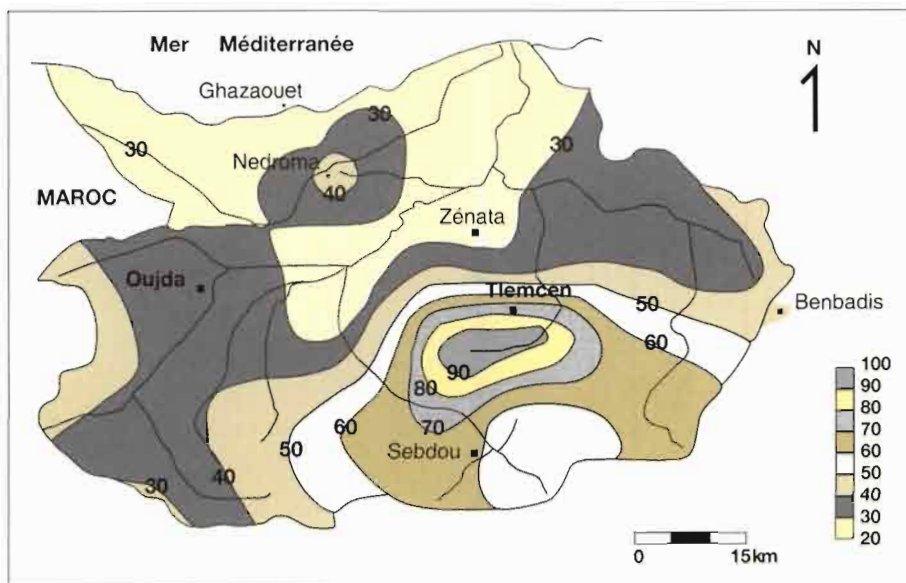


Figure 3. Carte de la répartition spatio-temporelle de l'agressivité climatique (isovaleurs de R. 1973-2001-Tafna.) [11-12].

versants forment des cirques, zones de concentration des eaux de surface [13]. La limite de déclenchement du ruissellement est variable en fonction de la hauteur et de l'intensité de la pluie, de l'humidité du sol, des états de surface du sol (fissuration, cailloux, mottes...), du couvert végétal et des propriétés du sol. Ainsi, en zone marneuse de Tlemcen, cette limite a atteint 80 mm sur sol sec et seulement 25 mm sur sol humide. Sur les sols lithomorphes en général, toutes les pluies dépassant 20 mm déclenchent un ruissellement, même si le sol est sec [14].

D'autre part, le ruissellement peut se déclencher même pour des pluies de hauteur ou d'intensité faible lorsque les pluies sont consécutives et le sol très humide et encroûté. Une pluie de 8 mm a pu déclencher un taux de ruissellement de 32 % (tableau II). Cela montre l'influence de l'humidité préalable et de l'état de surface du sol (sol totalement fermé et lisse). Les observations faites sur le terrain confirment ces résultats et montrent que le ruissellement se développe rapidement sur les terrains abandonnés (par exemple, après l'arrachage des vignes). Il est fréquent aussi d'observer des rigoles et des ravines provenant des chemins, des parcours dégradés et surtout des pistes.

Par ailleurs, le ruissellement et l'érosion en nappe restent très variables dans l'espace nord-maghrébin, vu la diversité des facteurs écologiques. Selon Heusch [15], le ruissellement varie de 0 à 30 % selon les situations, mais il reste en général inférieur à 10 %. L'évolution du ruissellement au cours de l'année est semblable pour toutes les parcelles : les taux les plus élevés sont enregistrés en automne jusqu'à l'époque de semis où les conditions optimales du

ruissellement sont réunies (pluies abondantes et relativement intenses, sol nu labouré et peu cohérent ou croûte de battance). Ce n'est que lorsque le sol est labouré et que la végétation commence à couvrir le sol, que la différence de fonctionnement devient nette. L'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent profondément l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. Ces observations ont été confirmées par les résultats obtenus par Morsli et Meddi [16] sous pluies simulées dans la même région.

Pertes en terre

L'érosion en nappe varie de 2 à 6 t/ha/an sur sol nu, de 0,3 à 1,5 t/ha/an sur parcelles cultivées traditionnelles et de 0,3 à 1,3 t/ha/an sur parcelles améliorées (tableau I). L'érosion globale varie, quant à elle, dans des proportions encore plus grandes à l'échelle du Maghreb : négligeable dans de nombreux cas, elle peut atteindre des chiffres records (54 t/ha/an), comparables à ceux des *bad-lands* [17]. Les taux d'érosion sont aussi variables à l'échelle interannuelle (tableau III) et mensuelle.

Les résultats montrent que c'est au début de l'automne qu'on observe l'érosivité maximale des orages et la fragilité maximale du milieu cultivé. Globalement, ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Roose *et al.* [8] et Gomer et Vogt [18] en Algérie ainsi que par Laouina *et al.* [19] et Mouffadal [20] au Maroc.

Ces mesures d'érosion sur parcelles expérimentales de 100 m² sur les sols représen-

tatifs des montagnes méditerranéennes du nord-ouest de l'Algérie, confirment l'hypothèse défendue par Heusch [15] et Demmak [21] selon laquelle l'érosion en nappe sur les versants n'apporte qu'une petite contribution (0,2 à 10 t/ha/an) aux sédiments transportés par les oueds. Cependant, le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80 % durant les averses exceptionnelles tombant sur des terres compactées et encroûtées. C'est ainsi qu'on a mesuré, en 1927, un débit de 500 m³/s dans le petit bassin de l'oued Melah dans les Beni Chougrane et de 3 600 m³/s dans la basse Tafna, en 1936 [17].

Dans la zone tellienne de l'Algérie, la plus grande partie des sédiments provient des ravines et non des interfluvies. Selon Gomer et Vogt [18], l'érosion diffuse ne contribue que peu dans la charge évacuée à l'exutoire des petits bassins-versants. Les résultats montrent que l'érosion est due principalement au ruissellement exceptionnel. Ce dernier est favorisé par l'encroûtement et par la compaction de la surface du sol par les animaux, le faible couvert végétal, les fortes pentes et la topographie concave des versants.

L'érosion en nappe ne semble pas être le processus le plus actif pour l'érosion des versants méditerranéens, mais même si les pertes en terre pour ce type d'érosion restent en général modérées par rapport aux seuils de tolérance (2 à 12 t/ha/an), la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol, source essentielle de la fertilité des sols, est continuellement éliminée par l'érosion sélective de l'argile, des limons et des matières organiques [22]. Cela modifie profondément la dynamique de l'eau au niveau des horizons superficiels et réduit l'infiltration ; on observe par conséquent une réduction du stockage des eaux de pluie dans les sols, un déficit du bilan hydrique et une réduction des rendements des céréales qui entraîne à son tour une diminution du stock de carbone du sol.

L'étude pédologique a montré qu'une partie des matériaux érodés reste piégée sur le versant. La quantité de terre retenue sur le versant dépend des conditions topographiques et du mode de gestion des sols. Des dépôts importants sont observés dans les zones de ralentissement du ruissellement (replat, concavité, adventices, talus, haies vives...), ce qui crée une redistribution de la fertilité des sols. La compréhension de cette dynamique en fonction des utilisations des terres peut aider à une meilleure gestion des potentialités des couvertures pédologiques et à la restauration des stocks de carbone dans le sol tant pour des questions de durabilité de la production agricole que pour des objectifs environnementaux.

I. Stade ultime du ravinement

Tableau 1. Ruissellement et érosion dans le nord-ouest semi-aride de l'Algérie.

Hériz, Tlemcen ; sol brun vertique sur marnes ; pluie moyenne sur une durée de 20 ans : 337 mm ; pluies : (1989-1990 : 354 mm ; 1990-1991 : 321 mm ; 1992-1993 : 242 mm ; 1993-1994 : 20 mm)				
	Période	Kram (%)	Krmax (%)	Érosion (t/ha/an)
<i>Système agropastoral ; pente 15 % ;</i>				
Témoin : sol nu labouré	1989-1994	7,3	39	2,83
Blé-jachère traditionnelle	1989-1994	5,4	30	1,46
Blé intensif	1989-1993	4,0	22	1,26
Vesce + avoine	1993-1994	2,3	5	0,23
Station chérif 1, Tlemcen ; sol brun vertique sur marnes ; pluie moyenne sur une durée de 20 ans : 337 mm (1989-1990 : 354 mm ; 1990-1991 : 321 mm ; 1992-1993 : 242 mm ; 1993-1994 : 200 mm)				
<i>Système agropastoral ; pente 30 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1989-1994	7,0	27	1,81
Blé-jachère traditionnelle	1989-1993	5,7	14	1,35
Blé intensifié + NP	1992-1993	2,2	9	0,37
Pois chiche traditionnel	1993-1994	4,0	11	0,31
Pois chiche amélioré	1993-1994	3,3	9,4	0,30
Station chérif 2, Tlemcen ; sol brun vertique sur marnes ; pluie moyenne sur une durée de 20 ans : 337 mm (1989-1990 : 354 mm ; 1990-1991 : 321 mm ; 1992-1993 : 242 mm ; 1993-1994 : 200 mm)				
<i>Système agropastoral ; pente 20 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1989-1994	6,1	25	1,76
Blé traditionnel	1989-1993	5,8	22	1,40
Blé + NP	1992-1993	2,8	8	0,39
Vesce avoine traditionnelle	1993-1994	2,6	7	0,40
Vesce avoine améliorée	1993-1994	0,9	2,4	0,27
Station de Fergoug, Mascara ; sol brun calcaire limoneux ; pluie moyenne sur une durée de 25 ans : 450 mm (1993-1994 : 242 mm ; 1994-1995 : 320 mm ; 1995-1996 : 470 ; 1996-1997 : 240 mm ; 1997-1998 : 259 mm)				
<i>Système agropastoral ; pente 20 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1993-1998	6,5	32	5,82
Orge traditionnelle	1993-1998	2,2	13	0,70
Orge intensive	1993-1998	1,8	12	0,60
Pois + engrais	1993-1998	1,8	11	0,34
Jachère pâturée	1993-1998	3,9	25	0,96
Jachère non pâturée	1993-1998	0,3	26	0,64
Station Ain Farès, Mascara, sol brun vertique ; pluie moyenne sur une durée de 25 ans : 450 mm (1993-1994 : 242 mm ; 1994-1995 : 320 mm ; 1995-1996 : 470 mm ; 1996-1997 : 240 mm ; 1997-1998 : 259 mm)				
<i>Système agropastoral ; pente 40 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1993-1998	3,9	33	4,08
Blé traditionnel	1993-1998	1,5	22	0,95
Blé amélioré	1993-1998	1,2	22	0,60
Pois chiche	1993-1998	2,2	23	1,58
Jachère non pâturée	1993-1998	1,8	22	0,65
Jachère pâturée	1993-1998	2,1	22	1,00
Station Maghnia, Tlemcen ; sol brun calcaire colluvial ; pluie moyenne sur une durée de 21 ans : 284 mm ; (pluie 1998-1999 : 303 mm)				
<i>Système agropastoral ; pente 25 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1998-1999	10,2	56	4,10
Blé-jachère traditionnelle	1998-1999	10,1	35	3,30
Blé-vesce avoine intensif	1998-1999	6,2	22	3,60
Station de Madjoudj ; sol brun calcaire érodé ; pluie moyenne sur une durée de 29 ans : 416 mm ; (pluie 1989-1990 : 345 mm)				
<i>Système sylvoagropastoral ; pente 21 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1989-1990	5,4	35	3,80
Matorral dégradé, pâturé	1989-1990	1,2	8	0,50
Matorral en défens, enrichi	1989-1990	0,8	4	0,30
Station de Gourari, Tlemcen ; sol fersiallitique ; pluie moyenne sur une durée de 29 ans : 432 mm ; (pluie 1990-1991 : 550 mm)				
<i>Système pastoral ; pente 10 %</i>				
Témoin : sol nu labouré	1990-1991	13,6	34	5,20
Matorral très dégradé pâturé	1990-1991	15,2	25	2,10

Tableau II. Érosion et ruissellement pour quelques averses particulièrement agressives sur parcelles nues standard.

Date	Averse (mm)	Kr (%)	E (kg/ha/an)	Sites
01-1990	80,0	38,6	5 700	Hériz (Tlemcen)
01-1990	22,6	29,3	1 322	Madjoudj (Tlemcen)
05-1993	49,0	26,5	1 621	Hériz (Tlemcen)
01-1994	22,0	12,5	651	Chérif (Tlemcen)
05-12-1995	45,0	8,5	1 800	Mascara
28-12-1995	8,0	32,3	1 000	Mascara
02-1996	54,0	15,0	2 000	Mascara

Tableau III. Variabilité interannuelle du ruissellement et de l'érosion en nappe dans une parcelle nue standard sur sol brun calcaire dans les Monts de Beni Chougrane, près de Mascara.

Année	Pluies annuelles	Kram %	Krmax %	Érosion t/ha/an
1993-1994	242	6,4	26,6	2,50
1994-1995	320	6,9	28,1	3,50
1995-1996	470	7,6	32,3	8,50
1996-1997	240	6,2	27,3	5,40
1997-1998	259	5,3	25,9	9,20
1993-1998	306	6,5	32,3	5,82

Tableau IV. Relations entre l'érosion, la lame d'eau écoulée et les facteurs explicatifs au cours des saisons.

Saison	Expression	Coefficient de corrélation (R)
Automne	$Lr = 0,29 P - 2,06$	0,97
	$E = 471,9 P^{0,25} - 6,4431$	0,90
	$E = 244,65 \text{ Log.}(Lr) + 309,91$	0,84
Hiver	$Lr = 0,11 P + 0,041 \text{ IPA} - 0,64$	0,92
	$E = 64,25 P - 4,53 \text{ IPA} - 2,04$	0,88
	$E = 64,25 Lr + 1,45 \text{ IPa} + 33,02$	0,95
Printemps	$Lr = 0,12 P + 0,031 \text{ IPA} - 0,42$	0,98
	$E = 3,42 P + 53,3$	0,69
	$E = 31,69 Lr + 72,26$	0,77

P : pluie en mm ; I : intensité moyenne de la pluie en mm/h ; Lr : lame d'eau ruisselée ; E : érosion en kg/ha ; IPA : indice représentant l'état d'humidité du sol (pluie des cinq jours précédant le jour considéré).

Tableau V. Effet des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion sous pluies simulées.

Modes de gestion		TM	TA	D	JNP	JP	SNTp	Témoïn
Ruissellement (%)		7,1	9,0	10,0	33,1	45,0	43,0	55,0
Pluie d'imbibition (mm)	Sec	33,0	31,0	28,0	19,0	14,0	15,0	12,0
	Humide	17,0	13,0	10,0	6,0	5,0	4,6	1,5
	Très humide	4,1	2,8	2,3	1,8	1,5	0,9	0,4
Infiltration finale (mm/h)	Sec	23,0	20,0	20,0	6,1	3,3	2,8	1,8
	Humide	6,8	5,2	4,1	2,1	0,6	0,7	0,4
Turbidité (g/L)		22,0	30,0	32,0	18,0	28,0	36,0	38,0

TM : travail par le chisel ; TA : travail à l'araire ; D : défoncement des sols en pente ; JNP : jachères mises en défens ; JP : jachères pâturées ; SNTp : sols abandonnés.

Les pertes en terre sont généralement liées aux pluies, à la couverture végétale et aux états de surface du sol. La relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année, elle varie au cours des saisons [23]. Dans le cas des monts de Beni Chougrane, des coefficients de corrélation significatifs sont obtenus si les données sont séparées en trois saisons (tableau IV).

L'indice de pluie tombée les 5 jours précédents (IPA) s'est aussi avéré un bon indicateur des risques de ruissellement au niveau du bassin-versant de l'oued Mina à l'ouest de l'Algérie [24].

Impact des systèmes de culture sur le ruissellement et l'érosion

Le système de culture, défini comme la succession des cultures sur une parcelle et des techniques culturales qui leur sont appliquées, est le facteur important où l'homme peut intervenir pour modifier la sensibilité des sols à l'agressivité des pluies. Toute opération culturale induit une modification de l'état structural du sol et de l'infiltration et par conséquent une diminution ou une augmentation du ruissellement et de l'érosion.

La céréaliculture extensive est la culture traditionnelle la plus pratiquée dans les régions du Nord-Ouest algérien, en rotation avec quelques légumineuses (pois chiches, petits pois et fèves), suivie d'une jachère pâturée. Sur la jachère, la végétation naturelle est essentiellement herbacée et annuelle avec présence localisée de formations arbustives, souvent épineuses (*Ziziphus*).

Les sols cultivés sont pratiquement nus durant l'été et l'automne. Au début de la saison pluvieuse, la différence d'érosion entre le sol nu et les parcelles améliorées n'est pas importante. Ce n'est qu'après labour et recouvrement des sols par la végétation que les traitements influencent le ruissellement et l'érosion (diminution jusqu'à 25 fois par rapport au sol nu pour la jachère mise en défens). Cette diminution est due principalement à la rugosité des états de surface du sol et à la présence de résidus de culture ou de litière.

Le taux de ruissellement maximal (Krmax) au cours des principales averses peut atteindre 8 à 32 % des pluies journalières sur un sol correctement cultivé et 56 % sur parcelles épuisées, abandonnées, dénudées, tassées par le bétail et encroûtées par la pluie.

Les résultats obtenus sous pluies simulées dans les Monts de Beni Chougrane avec une intensité de 30 mm/h (tableau V) ont montré l'amélioration de l'infiltration par le travail grossier par le chisel (TM), par le travail à l'araire (TA), les jachères mises en défens (JNP) et l'effet négatif du défonce-

ment des sols en pente (D), des jachères pâturées (JP) et des sols abandonnés (SNTP).

Sous végétation naturelle (matorral dégradé), le ruissellement est fréquent lors des averses importantes ; en revanche, l'érosion y est relativement faible : la matière organique (litière) est transportée en grande quantité par le ruissellement. Le ruissellement maximal (K_{rmax}) varie de 4 à 8 % sur un matorral bien couvert et de 10 à 56 % sur un parcours très dégradé, tassé et surpâturé. Si ce ruissellement traverse un champs labouré situé en aval, il risque de créer une ravine bien plus dangereuse que l'érosion en nappe.

L'amélioration des systèmes de gestion (forte densité de semis, fertilisation, rotation avec légumineuses, cultures fourragères) a réduit plus ou moins fortement les risques d'érosion et de ruissellement. La mise en défens a réduit de 2 à 25 fois le ruissellement et de 3 à 10 fois l'érosion, et a amélioré la productivité des sols. Ainsi, les rendements ont été multipliés de 2 à 4 fois sur parcelles cultivées améliorées, malgré le déficit hydrique. L'amélioration de la production de biomasse (paille) a contribué de manière significative à l'alimentation du bétail, à l'entretien de la fertilité des sols, à la stabilité de la structure du sol, et donc à sa résistance à l'érosion. Le suivi temporel (5 ans) de l'évolution de la fertilité au niveau des stations expérimentales a montré que la teneur du carbone organique du sol dans la couche 0-10 cm évolue en fonction du système de gestion (figure 4). Elle diminue de 1,0 à 1,5 % sur un sol nu et augmente de 1,5 à 2,0 % sur un sol couvert par la végétation comme c'est le cas de la jachère mise en défens.

De ces études expérimentales effectuées au champ, de nombreuses conclusions peuvent être tirées.

Généralement, un sol cultivé présente moins de risques qu'un sol nu tassé. Le travail du sol et le billonnage sur les zones cultivées, de pente inférieure à 15 %, ont une influence très marquée sur le risque de ruissellement : ces techniques retardent le déclenchement du ruissellement et augmentent l'infiltration. Le billonnage en courbes de niveau effectué sur plusieurs cultures semble bénéfique dans cette région. Lors de fortes pluies et sur fortes pentes, les billons peuvent être rompus et donner naissance à des rigoles qui peuvent évoluer en ravines. Bien menées, ces techniques (billons isohypses, cloisonnés, microrelief accentué...) peuvent diminuer considérablement le ruissellement et l'érosion et permettre ainsi un bon stockage d'eau dans le sol sur des versants de pente inférieure à 15 %.

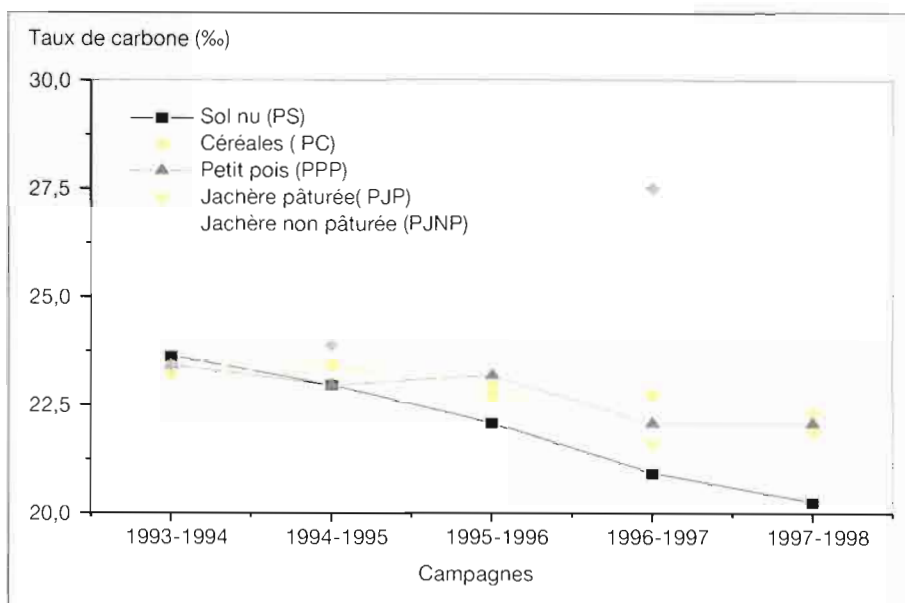


Figure 4. Évolution du taux de carbone (0-10 cm) en fonction des systèmes de gestion sur sol brun calcaire limoneux.

En revanche, la jachère pâturée, les parcours et les sols abandonnés tassés présentent un grand risque où le ruissellement et l'érosion ravinante sont élevés : les états de surface sont caractérisés par une rugosité faible, une dominance des surfaces fermées et par une couverture végétale très faible. Le risque devient encore plus grand sur les zones de surpâturage.

La jachère mise en défens et les parcours améliorés où la biomasse est relativement importante, présentent moins de risques et permettent l'enrichissement du sol notamment en carbone. Cela est dû à l'accumulation successive des résidus pendant plusieurs années. Ces modes de gestion peuvent être encore plus efficaces s'ils sont améliorés par des légumineuses et si le pâturage est réglementé. Mais ces modes d'utilisation qui produisent toujours un fort ruissellement doivent être associés à des structures antiérosives adaptées pour réduire la vitesse de ruissellement et diminuer les masses d'eau qui se concentrent en aval, et qui sont à l'origine de l'aggravation des ravines existantes et du départ de nouvelles ravines.

D'une façon générale, ces sols en pente, doivent être protégés par des techniques antiérosives et des assolements appropriés. Certaines pratiques nécessitent des améliorations, et d'autres, une reconversion. Mais dans le contexte socio-économique actuel, il est difficile de changer rapidement un mode de gestion des terres. La politique agricole de l'Algérie actuelle a tendance à réduire les surfaces céréalières peu productives à cause des conditions climatiques défavorables. Leur reconversion doit tenir compte des facteurs

écologiques et de l'intérêt des populations rurales afin d'arriver à une gestion durable du milieu naturel.

Érodibilité des sols

L'érodibilité des sols (K) exprime la résistance du sol à l'érosivité des pluies ; il est calculé à partir de l'équation de Wischmeier et Smith [7]. Sur les parcelles, il varie entre 0,002 et 0,020 (tableau VI), classant ainsi les sols de l'Ouest algérien parmi les sols très résistants à la battance des pluies, pas forcément résistants au ravinement. Nous n'avons pas constaté de relation stricte entre l'érodibilité et le type de sol : l'érodibilité dépend essentiellement de la texture, du taux de matières organiques, de la stabilité des agrégats et de la perméabilité de la couche superficielle des sols testés.

Par ailleurs, l'indice d'instabilité structurale (Is de Hénin) montre que les sols bruns vertiques, de texture argileuse sur marnes sont les plus résistants (Is < 1) et les moins érodibles (K = 0,002). Ils présentent une bonne stabilité structurale et l'infiltration est très élevée sur sol sec à cause de leur comportement hydrodynamique très particulier : les sols argileux étudiés possèdent plus de 30 % d'argile de type illite et interstratifiés illite montmorillonite. Il faut au moins 200 à 300 mm de pluie avant que ne se referment les fissures si caractéristiques de ces sols vertiques. À l'état humide, l'infiltrabilité des sols bruns calcaires vertiques peut atteindre des valeurs très faibles, de l'ordre de 5 mm/h [25] : à cette période, le ruissellement peut se déclencher facilement, même avec des pluies

Tableau VI. Érodibilité des principaux types de sols.

Types de sol	Ruissellement		Érosion (t/ha/an)	Indice d'instabilité	Érodibilité K USLE
	Kram %	Krmax %			
Vertisol	6,0	25	1,78	0,3-0,8	0,010-0,020
Brun calcaire érodé	5,4	29	3,32	1,0-6,0	0,005-0,010
Brun calcaire vertique	3,9	33	4,06	0,4-0,8	0,002
Brun calcaire colluvial	10,2	56	4,10	1,0-10,0	0,004-0,010
Sol fersialitique rouge	13,6	27	5,20	1,2-4,2	0,014-0,020
Brun calcaire limoneux	6,5	32	5,82	2,9-30,0	0,013

de faible hauteur (8 mm). Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus sur parcelles d'érosion et sous pluies simulées (1 m²). Les sols limoneux avec un taux élevé en limon, en sable fins et avec peu de matière organique dans l'horizon de surface paraissent les plus sensibles à la battance (1,2 < ls < 30).

La grande variabilité spatiale de l'érodibilité s'explique par la variation des paramètres tel que la profondeur du sol (10-100 cm), le taux de matière organique (0,7-4,0 %), le calcaire (6-40 %), la texture (sablo-limoneuse à argileuse), l'infiltration (> 500 mm sur sol humifère à 5 mm/h sur sol tassé) et l'indice d'instabilité structurale (0,3-30).

Elle présente aussi une variation au cours des saisons, due aux pratiques culturales et surtout à l'évolution de l'humidité, de la fissuration des vertisols et des états de surface.

Les corrélations entre l'indice d'instabilité structurale qui est un paramètre très fort de l'érodibilité et les paramètres de la susceptibilité des sols à l'érosion et au ruissellement (texture, matière organique, calcaire total et infiltration) montrent des relations significatives entre ls et le rapport argile/limon (r = 0,88).

L'analyse des résultats sur l'érosion et le ruissellement au niveau de la parcelle d'érosion nécessite la connaissance des facteurs les plus importants pour caractériser les états de surface du sol. L'humidité préalable des dix premiers centimètres du sol, les surfaces fermées (%), ouvertes (%), et couvertes (%), la rugosité, la pente et la capacité d'infiltration du sol sont les paramètres les plus déterminants.

Le ruissellement commence généralement après 22 à 30 mm de pluie, si le sol est sec, ou après 4 mm, si le sol est humide, encroûté ou compact. Ces seuils de hauteur limite et le volume ruisselé dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de la surface du sol et de son humidité préalable.

La fréquence du ruissellement sur les différents types de sol s'explique en grande partie par les paramètres des états de surface (tableau VII). Jusqu'à 20 ruissellements ont été enregistrés sur les sols fermés à plus de 60 %, alors que seulement deux ruissellements ont été observés sur les vertisols marneux fissurés, malgré un couvert végétal quasiment nul et des mottes sur plus de 50 % de la surface du sol.

L'évolution des états de surface montre que lors des orages de l'automne, le sol présente toutes les conditions favorables à l'érosion et au ruissellement :

- un taux élevé de surfaces fermées ;
- un faible taux de couverture du sol par la litière et les cultures ;
- une faible cohésion et une faible rugosité de la surface du sol.

Conclusion

Durant la décennie 1989-2000 et sur le réseau d'observation de l'érosion en nappe et du ruissellement portant sur 30 parcelles d'érosion installées sur les versants nord-ouest de l'Algérie dans des sites écologiques et bioclimatiques différents, l'ensemble des résultats a montré que les pertes en terre et en eau sont relativement faibles, même durant les années où les précipitations n'ont pas été déficitaires (Kram < 10 % et E < 6 t/ha/an).

Seuls quelques événements pluviométriques exceptionnels sont à l'origine de dégradations spectaculaires (ravines ou glissements de terrain) qui marquent souvent le paysage pour plusieurs années. Le ruissellement journalier peut dépasser 50 % sur sol nu et tassé, ce qui explique l'importance du ravinement et de l'ensablement des barrages. Les masses d'eau ravinantes proviennent, dans une large proportion, des versants (90 %). Tout aménagement de versants pentus doit viser l'étalement des eaux en nappe afin d'augmenter leur infiltration et de réduire leur capacité de dégradation (par dissipation de l'énergie du ruissellement sur la rugosité du sol et des cultures).

Les résultats des mesures sur parcelles montrent que l'érosion en nappe et le ruissellement restent généralement faibles : ils confirment les résultats obtenus par plusieurs auteurs en Afrique du Nord. Même si cette érosion demeure modérée, elle altère fortement la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol qui est la source essentielle de la fertilité. L'analyse des formes d'utilisation des terres a montré que l'exploitation continue et rationnelle des sols ne présente pas de grand risque érosif. Ce sont surtout les sols nus, épuisés et/ou abandonnés, les jachères surpâturées, ou les pistes, qui causent les dommages les plus importants lorsque le ruissellement se rassemble dans des ravines.

L'analyse morphologique de ces paysages jeunes de montagnes moyennes, profondément entaillées, confirme les résultats obtenus sur parcelles, à savoir que l'érosion linéaire est plus active que l'érosion en nappe en montagne méditerranéenne. Par ailleurs, l'érosion en nappe reste sélective des particules fines et du carbone.

Tableau VII. Évolution des états de surface du sol dans le bassin-versant de la Tafna (1989-1991).

Types de sol	Parcelles	États de surface d'octobre à avril				Nombre de ruissellements
		Cailloux (%)	Sol fermé (%)	Couvert végétal (%)	Mottes 5 cm (%)	
Brun calcaire vertique	Jachère nue	48	40-75	2-6	55-42	7
	Témoin régional	46	30-55	40-85	3	6
	Améliorée 1	44	35-50	52-88	5	6
	Améliorée 2	41	29-48	46-90	4	5
Brun calcaire vertique	Jachère nue	5	28-61	0-5	55-48	3
	Témoin régional	5	38-59	1-72	50-30	2
	Améliorée 1	4	35-56	2-80	48-28	3
	Améliorée 2	4	30-48	1-40	52-46	3
Fersialitique	Jachère nue	41	50-65	4-8	60-44	17
	Matorral dégradé	46	54-75	30-80	6	20
	Améliorée	42	60-82	28-82	4	20

La pente n'est pas toujours le facteur dominant du risque érosif. Malgré les versants très raides testés (10-45 %), les risques d'érosion en nappe ont été modestes. En revanche, la pente intervient significativement pour expliquer les pertes en terre par ravinement. Le fait à déjà été signalé par Naïmi *et al.* [26] et Kouri *et al.* [27] dans le Maghreb. Cette conclusion rejoint les travaux de Poesen [28], Lal [29], Hudson [30], Roose [6, 31] et De Noni et Viennot [32] qui montrent que l'érosion linéaire augmente avec l'énergie cinétique du ruissellement et l'emporte sur l'énergie des pluies (qui crée l'érosion en nappe) dès que la pente dépasse 15 % [6].

Dans le contexte des montagnes méditerranéennes semi-arides que nous analysons, d'autres facteurs interviennent dans la dégradation avancée des sols et du couvert végétal.

Les faibles valeurs du facteur de l'agressivité climatique [Rusa = 30 à 80] n'expliquent pas totalement le faible niveau d'érosion en nappe observé. Deux facteurs semblent jouer un rôle important : le déficit hydrique et les modes de gestion appliqués qui ne suivent plus l'évolution bioclimatique du milieu naturel. La faible pluviosité enregistrée ces deux dernières décennies a eu des conséquences négatives sur le stock d'eau dans le sol et sur la production de biomasse. Cela modifie la structure superficielle des sols, leurs états de surface et diminue leur taux de matière organique. Seule une gestion appropriée peut réduire le ruissellement qui vient des versants et compenser les pertes en fertilité et enrichir le sol (cas des jachères mises en défens). Ces dernières s'avèrent intéressantes pour la production de la biomasse et pour la séquestration du carbone dans le sol. Une telle utilisation pourrait assurer un équilibre durable entre la conservation de la fertilité et la productivité du sol. ■

Références

- Heddadj D. La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 168-75.
- Remini B. L'envasement des barrages. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 165-71.
- Hamoudi A, Morsli B. *Érosion et spécificité de l'agriculture de montagne : réflexion sur la conservation et la gestion de l'eau et du sol en milieu montagneux 2000*. Actes Séminaire Agro Tissemsilet Algérie, 13 p.
- Bennet HH. *Elements of soil conservation*. New York : McGraw-Hill, 1939 : 564 p.
- Ellison WD. Studies of raindrop erosion. *Agric Eng* 1944 ; 25 : 131-81.
- Roose E. Introduction à la GCES. *Bulletin des Sols FAO Rome* 1994 ; (70) : 420 p.
- Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses. A Guide to soil conservation planning*. Handbook 1978, N° 537 : Washington (DC) : USDA, 1978 ; 58 p.
- Roose E, Arabi M, Brahmia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
- Touaibia B, Gommer D, Aidaoui A. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'oued Mina, Algérie. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 478-84.
- Arabi M, Roose E. Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains. *7th ISCO Conference Proc* 3 1992 ; 3 : 341-7.
- Mazour M, Roose E. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du nord-ouest de l'Algérie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 320-30.
- Zekri N. *Analyse du facteur de l'agressivité climatique dans le Tafna, Nord ouest algérien*. Thèse de magister, université de Tlemcen, Algérie, 2003, 110 p.
- Roose E, Chebbani R, Bouragaa L. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 2000 ; 11 : 317-26.
- Mazour M. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin-versant de l'oued Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 300-13.
- Heusch B. L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *Ann de la Recherche Forestière du Maroc* 1970 ; 12 : 9-176.
- Morsli B., Meddi M. *Étude du ruissellement et du transport solide sur parcelles expérimentales. Utilisation de la simulation de pluies*. Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau, université Mascara, Algérie, 2002 : 80-8.
- Benchtrit M. *L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement de l'Algérie*. Paris : PUF, 1972 ; 216 p.
- Gomer D. *Écoulement et érosion dans des bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen*. Eschborn (Allemagne) : GTZ-ANRH, 1992 ; 207 p.
- Laouina A, Nafaa R, Coelho C, *et al.* Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 256-74.
- Mouffadal K. Les premiers résultats des parcelles de mesure des pertes en terre dans le bassin-versant de oued Nakhla dans le Rif occidental. *Bull Réseau Erosion* 2001 ; 21 : 244-54.
- Demmak A. *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie*. Thèse de docteur ingénieur, Paris VI, 1982, 323 p.
- Morsli B, Haliïm A. *Influence du mode de gestion sur l'érosion et le carbone dans le Nord-Ouest algérien : cas des Monts de Beni-Chougrane*. Résumés des actes du Colloque International « Gestion de la Biomasse, Érosion et Séquestration du Carbone », Montpellier, 2002 : 96.
- Meddi M, Morsli B. Étude de l'érosion et du ruissellement sur bassins-versants expérimentaux dans les Monts de Beni-Chougrane (Ouest d'Algérie). *Z Gemorph NF Allemagne* 2001 ; 45 : 443-52.
- Meddi M. *Pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mino Algérie*. Thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg France, 1992, 390 p.
- Morsli B. *Caractérisation, distribution et susceptibilité des sols à l'érosion. Cas des montagnes de Beni-Chougrane*. Thèse de magister INA, Alger, 1996, 170 p.
- Naimi M, Tayaa M, Ouzizi S, Choukr-Elah R, Kerby M. Rovinement dans le bassin du Nakhla. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 232-43.
- Kouri L, Vogt H, Gomer D. Analyse des processus d'érosion hydrique linéaire en terrain marneux. Bassin-versant de l'oued Mina, Tell Oranais, Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 64-73.
- Poesen J. The role of slope angle in surface seal formation. In : Gardner V, éd. *International Geomorphology II*. Actes de la conférence de Manchester, 1987 : 437-48.
- Lal R, éd. *Soil erosion research methods*. Ankeny (Iowa) ; Wageningen (Pays-Bas) : Soil and Water Conservation Society ; Soil Conservation and Environment Society of Soil Science, 1988 ; 244 p.
- Hudson NW. *Land Husbandry*. London : Bastford, 1992 ; 192 p.
- Roose E. *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Travaux et documents de l'Orstom. Paris : Orstom, 1981 ; 569 p.
- De Noni G, Viennot M. Étude des facteurs de l'érosion hydrique sur des versants volcaniques cultivés : une réponse à une demande de développement. *Bull Réseau Erosion* 1998 ; 18 : 437-49.

Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc)

Mohamed Sabir¹
Bernard Barthes²
Eric Roose²

¹ École nationale forestière des ingénieurs
(ENFI),
BP 511,
Salé,
Maroc

<sabireni@wanadoo.net.ma>

² Institut de recherche
pour le développement (IRD),
Laboratoire MOST,
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France
<roose@mpl.ird.fr>
<barthes@mpl.ird.fr>

Résumé

Dans les montagnes méditerranéennes du Maroc, les problèmes d'érosion sont variés et importants : décapage des horizons humifères par érosion en nappe (1 à 5 t/ha/an), érosion en rigoles (10 à 100 t/ha/an) et érosion aratoire lors du travail du sol (1 à 60 t/ha/an), ravinement des versants (100 à 300 t/ha/an), mouvements en masse, dégradation des berges des oueds, envasements des barrages, coulées boueuses, etc. Sur les fortes pentes des montagnes méditerranéennes, l'érosion linéaire est nettement plus importante que l'érosion en nappe, car l'énergie du ruissellement est plus forte que celle des pluies. Pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion on a donc cherché des indicateurs de la capacité du sol à se désagréger et à produire du ruissellement. C'est pourquoi, un simulateur de pluies simplifié (irrigateur à rampe) a été mis au point pour mesurer sur le terrain (1 m²), la pluie d'imbibition (Pi) et la vitesse d'infiltration finale (If) avec des pluies simulées de 50 mm de hauteur et des intensités de 80 mm/h. Soixante-quatre placettes, représentant les différents sols, pentes (15 à 40 %) et utilisations des terres (forêts, agroforêts, parcours, cultures) ont été testées. Des corrélations significatives (R = 0,95 à 0,70) ont été observées entre l'infiltration et i) certaines caractéristiques de l'horizon superficiel du sol (taux de matière organique, macro-agrégats stables à l'eau, cohésion, densité apparente) ; ii) les états de surface (surfaces couvertes et surfaces fermées par les croûtes, les cailloux et le tassement). Ces résultats permettent d'évaluer à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) le risque d'érosion en montagne en considérant les utilisations des terres, les sols, les pentes et certains indicateurs, tels que l'infiltration, la teneur en macro-agrégats stables, l'encroûtement et la compaction du sol en surface. Le surpâturage et la mise en culture des terres forestières réduisent la couverture végétale des terres ainsi que le taux de matière organique et compactent le sol. Les risques de ruissellement et d'érosion augmentent. Les reboisements restaurent la situation, mais soustraient une partie de leurs parcours aux paysans et sont peu acceptés. L'agroforesterie améliore les caractéristiques hydrodynamiques des sols et permet une agriculture de montagne durable et mieux acceptée.

Mots clés : Érosion hydrique ; Indicateurs ; Maroc.



Summary

Assessing runoff and erosion risk indicators on the main soils of the Mediterranean mountains of the Western Rif area (Morocco)

The Mediterranean mountains of Morocco are faced with numerous erosion problems: topsoil scouring through sheet (1 to 5 t/ha/year), rill (10 to 100 t/ha/year) and tillage erosion (1 to 60 t/ha/year), gully erosion on hill slopes (100 to 300 t/ha/year), landslide and embankment degradation around wadies, floods and reservoir siltation. Linear erosion being more important than sheet erosion on steep slopes, runoff energy is more important on the mountains than rainfall energy. Therefore, a simple irrigator was used to measure the pre-pounding rainfall (Pi) and the stable infiltration rate (If) after a simulated rainfall of 50 mm and an intensity 80 mm/h on a 1-m² surface with 64 plots representative of various soils and land uses (forests, agroforests, grazing and cropping lands) on 15 to 40% hill slopes. Significant correlations (R=0.95 to 0.70) were observed between stable infiltration rate (If) and i) topsoil characteristics (organic matter percentage, stable macro-aggregates, cohesion, bulk density; and ii) with soil surface features (surface covered and surface closed by stones, compacted and crusted). These results emphasize the possibility to include data on land uses, soils, slopes, and indicators such as prepounding rainfall, infiltration, water-stable macro-aggregates, sealing crusts and compaction of the topsoil in a Geographic Information System (GIS) dealing with runoff and erosion risks in mountainous areas. Intensive human activities (over-cultivation and over-grazing) have reduced the soil organic matter contents and increased the soil surface compaction and the risk of runoff and erosion. Reforestation can reverse this situation, but it is not easily accepted by farmers, because their rangeland surface would be reduced. Agroforestry, by improving topsoil organic matter stock and hydrodynamics features, allows a sustainable and acceptable steep-land agriculture.

Key words: Water Erosion; Indicators; Morocco.

Des problèmes aigus d'érosion en montagne méditerranéenne sont connus depuis plus de 50 ans au Maghreb : à cause de la croissance démographique, le surpâturage et les défrichements entraînent la dégradation du couvert végétal et du sol et par la suite, l'augmentation du ruissellement, le ravinement, le sapement des berges des oueds, les glissements des collines environnantes et la sédimentation accélérée dans les barrages. Les phénomènes d'érosion sont variés et importants : érosion en nappe (1 à 5 t/ha/an), en rigoles (10 à 100 t/ha/an), ravinement (100 à 300 t/ha/an), mouvements en masse et érosion aratoire (1 à 60 t/ha/an). Une simple observation sur l'encaissement des vallées et les fortes pentes montre que l'érosion linéaire est plus importante que l'érosion en nappe car l'énergie du ruissellement est supérieure à celle des pluies sur les pentes de plus de 20 % [1-3].

Plusieurs travaux ont été consacrés à la compréhension et la prévision des processus d'érosion hydrique dans les montagnes méditerranéennes [1-7]. Au Maroc, l'administration des Eaux et Forêts a lancé un programme ambitieux de modélisation des pertes en terre au niveau de 14 bassins-versants à aménager, sur la base du modèle empirique américain

RUSLE [8]. Plus d'une centaine de parcelles d'érosion (100 m²) ont été installées dans tout le pays pour couvrir la diversité des facteurs principaux de l'érosion. Cependant, 16 ans après, les résultats ne sont toujours pas disponibles. Le dispositif est très lourd pour acquérir des résultats fiables. Enfin, au Maroc, les processus d'érosion sont surtout liés à l'énergie du ruissellement et donc aux facteurs responsables de sa génération [1, 5, 7]. Plusieurs chercheurs ont essayé des modèles plus simples, fondés sur la réalisation de systèmes d'information géographique (SIG) et sur l'évaluation d'indicateurs facilement mesurables, pour la qualification du comportement hydrologique et de l'érodibilité des sols. Les auteurs ont montré que la stabilité des macro-agrégats est fortement liée à la teneur en matière organique des sols et peut être utilisée comme indicateur de sa sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique [5, 9-12]. D'autres ont montré que la production de ruissellement d'un sol est fortement liée aux caractéristiques physiques de son état de surface et à sa couverture végétale [13, 14].

L'objectif de cette étude est de contribuer à la connaissance des processus de ruissellement sur pentes fortes et d'apporter des indicateurs, facilement mesurables sur le terrain ou même au laboratoire, pour la

prévision des risques de ruissellement et d'érosion en montagnes méditerranéennes. Elle vise à déterminer les effets de diverses utilisations des terres sur la capacité du sol à infiltrer les eaux de pluies en fonction de leur état de surface et de leurs propriétés structurales.

Matériel et méthode

La zone d'étude est située entre Tétouan et Chaouen, dans le Rif occidental, région située au nord du Maroc. Le climat est méditerranéen subhumide (600 mm/an en saison froide). Des événements pluvieux rares peuvent atteindre 120 mm/24 h. L'été est chaud et très sec. La végétation naturelle est une ancienne suberaie (*Quercus suber*) évoluant en matorral surpâturé à cistes. La céréaliculture est dominante. La progression des champs de cannabis (*Cannabis sativa*) est la cause principale de la régression de la forêt sur substrats siliceux. Des reboisements de *Pinus radiata* ou *halepensis* et d'*Eucalyptus* protègent localement les pentes fortes. Le relief est montagneux et les pentes sont moyennes à fortes (15 à 60 %). Les sols sont essentiellement superficiels, caillouteux, décapés par l'érosion et peu évolués. Les paysans distinguent cinq types de sols :

Tableau 1. Effets de l'utilisation des terres (UT) sur l'état de surface et les caractéristiques des sols (0-10 cm) dans les montagnes méditerranéennes du Rif occidental, Maroc.

UT	MO %	s	MA %	s	SO %	s	CV %	s	PEN	s	lfmm/h	s	Pi mm	s
Forêt	4,7d	0,5	—	—	84,7a	17,9	82,8a	7,1	1,2ab	0,1	63,7c	4,8	4,3bc	0,6
Matorral	2,9ab	0,3	37,1bc	3,6	32,7c	12,2	59,8	9,6	2,0c	0,4	31,1a	3,3	2,4a	0,4
Céréales	2,3a	0,4	22,7a	2,9	63,7ab	9,1	57,7b	7,5	1,4ab	0,4	41,6b	2,5	3,2ab	0,3
Cannabis	2,1a	0,3	27,7ab	5,5	53,0b	11,3	32,7c	9,3	1,5b	0,2	32,7a	3,0	3,8bc	0,4
Agroforesterie	3,2bc	0,3	23,7a	4,8	72,7a	12,4	66,3ab	5,8	1,1a	0,1	53,5c	3,3	4,3c	0,4
Reboisement	4,4cd	0,5	48,5c	5,5	80,0a	17,3	78,8a	5,7	1,2ab	0,1	56,5c	4,8	4,3bc	0,6

MO = matière organique du sol (de 0 à 10 cm) ; MA = % de macro-aggrégats stables à l'eau ; SO % = surface ouverte (aggrégats, fissures, trous biologiques) ; CV % = surface du sol couverte par les cailloux, la litière et les adventices ; PEN = résistance (kg/cm²) à la pénétration de la surface du sol sec depuis plus de 5 jours ; lf = infiltration finale stabilisée (mm/h) ; Pi = pluie d'imbibition (mm) ; s = erreur standard. Pour chaque variable, les lettres minuscules signalent les différences significatives entre traitements (p < 0,05)

« ferrich », sols peu évolués d'érosion, dominants ; « ahmer », sols rouges sablo-argileux à tendance fersialitique ; « toïresse », sols noirs, peu évolués, à caractères vertiques ; « rmel », sols bruns fersialitiques sableux ; et « adouka », sols argileux bruns vertiques.

L'étude a été réalisée au niveau de terroirs villageois et comprend deux phases : une enquête rapide avec les paysans pour définir les systèmes de production et les problèmes d'érosion qui y sont liés, et ensuite des simulations de pluies (trois répétitions) sur chaque type de sols et les principaux usages du sol (forêt de chêne liège, plantation de pins, matorral pâturés, système agroforestier, céréale, cannabis) et des analyses de laboratoire des horizons 0-10 cm.

Les caractéristiques du sol observées sont la densité apparente (da, g/cm³) mesurée avec un cylindre de 500 cm³, la résistance à la pénétration (PEN, kg/cm²) par un pénétromètre de poche, la résistance au cisaillement (SS, kg/cm²) par un cisso-mètre (*vane shear tester*), la teneur en matière organique (MO %) et la texture (argile, limons et sables %). La stabilité des agrégats au tamisage sous l'eau (MA %) a été déterminée par une méthode IRL [12]

similaire à celle de Kemper et Rosenau [15]. Les états de surface ont été caractérisés par la méthode des points quadrats : sur 1 m², on observe tous les 2 centimètres, le long d'un décimètre, le pourcentage des surfaces couvertes au ras du sol (CV % = adventices + litière + cailloux) et le pourcentage des surfaces ouvertes (SO % = agrégats + fissures + trous faune) ou fermées (SF % = pellicule, croûtes, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol) [16].

Un simple irrigateur [16] a été utilisé pour mesurer, sur des placettes de 1 m², la pluie d'imbibition (Pi, mm) et l'infiltration à l'équilibre, dite infiltration finale (lf, mm/h), avec des pluies simulées de 50 mm de hauteur et des intensités de 80 mm/h (à 10 % près). Il s'agit d'une rampe d'arrosage de 50 cm de large reliée par un tuyau souple à une citerne de 60 litres située 1 m au-dessus du sommet de la parcelle. Un observateur arrose une parcelle (à l'état naturel) de 60 × 166 cm (1 m²) le plus régulièrement possible à la hauteur de 80 cm. Un autre observateur mesure le ruissellement au bas de la parcelle délimitée par deux petites digues de terre protégées par des fers cornières de 45 mm pour ne pas perturber l'état naturel

de la surface. L'intensité de la pluie (variable de 50 à 150 mm/h) est réglée par une vanne à la sortie de la citerne. Ce simulateur simplifié apporte peu d'énergie mais distribue régulièrement les gouttes (diamètre 3 mm) et permet de mesurer la dynamique de l'infiltration sur un sol non remanié et des pentes très fortes (jusqu'à 70 %). Soixante-quatre placettes, représentant les différents sols et utilisations, sur des pentes de 15 à 40 %, ont été étudiées. Les utilisations des terres testées sont la forêt naturelle (état de référence), le matorral pâturé, la céréaliculture (labour avec araire), la cannabiculture (labour + fumure organique et minérale), les terres agroforestières (terrasses couvertes d'arbres fruitiers et de cultures intensives) et le reboisement (*Pinus radiata* de 40 ans).

Résultats

Effets des utilisations des terres (UT) sur les caractéristiques des sols

Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans le *tableau 1* et les *figures 1* et *2*. On constate d'une manière générale que le mode d'utilisation des terres a un

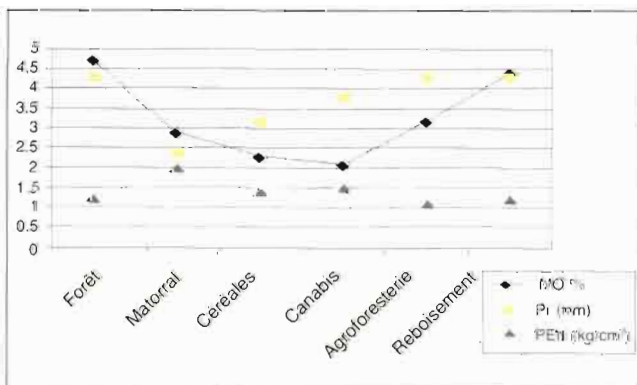


Figure 1. Effets de l'utilisation des terres sur la matière organique, la résistance à la pénétration et la pluie d'imbibition des sols (Rif, Maroc).

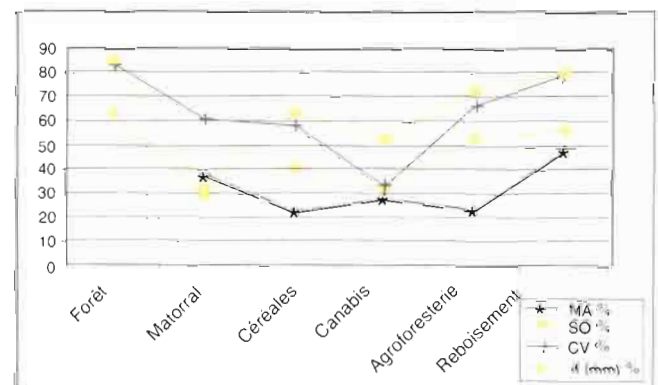


Figure 2. Effets de l'utilisation des terres sur l'état de surface du sol, la stabilité des macro-agrégats et l'infiltrabilité.

effet net sur la teneur en matière organique (MO %) du sol. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sous les couverts forestiers (> 4 %) et les valeurs faibles (< 2,4 %) dans les sols remaniés par le labour et plantés en céréales ou en cannabis. Les différences sont statistiquement significatives. Les sols sous forêts et agroforesterie présentent la plus forte proportion de surfaces ouvertes (> 70 %), ceux sous matorral la plus faible proportion (33 %), avec des valeurs intermédiaires sous cultures (50 à 60 %). Le matorral surpâturé présente des valeurs élevées de résistance à la pénétration (PEN = 2 kg/cm²) : les surfaces sont tassées et la densité apparente de la couche superficielle est importante (le piétinement animal provoque le tassement du sol). Ce résultat est conforme à ceux trouvés dans les parcours du Moyen-Atlas [14]. Les terres cultivées sont moins denses, mais elles se couvrent rapidement de pellicules de battance, de croûtes d'érosion et de sédimentation, d'où des ruissellements plus élevés en fin de pluie. Étant moins cohérentes, elles sont plus érodibles.

Ces modifications dans les états de surface au niveau du matorral et des terres de culture ont provoqué un changement dans les comportements hydrologiques des sols. Les capacités d'infiltration finales (If) les plus élevées ont été observées sous forêt et dans les parcelles agroforestières. Les pluies d'imbibition (Pi) sont plus importantes sous forêt, plantations forestières et agroforêts que sous terres mises en culture. Les surfaces qui produisent le plus rapidement et le plus abondamment le ruissellement sont le matorral surpâturé (tassé) et les terres de culture (appauvries en matières organiques et instables en surface).

Tableau II. Relations entre l'infiltration et les caractéristiques des horizons superficiels des quatre principaux sols.

Sol peu évolué d'érosion « Ferriche »		Sol peu évolué à tendance fersialitique « Ahmer »	
If = -8,47 + 0,86 SO	R = 0,97	If = -0,83 + 0,73 SO	R = 0,77
If = -16,61 + 0,98 CV	R = 0,95	If = 177,17 - 102,68 da	R = -0,92
If = 144,78 - 78,10 da	R = -0,73	If = 90,49 - 32,50 PEN	R = -0,75
If = 124,40 - 62,90 PEN	R = -0,84	MA = 17,26 + 5,87 MO	R = 0,77
Sol peu évolué argileux à caractère vertique « Toïresse »		Sol brun fersialitique « Rmel »	
If = -1,23 + 0,76 SO	R = 0,96	If = 57,22 - 8,01 PEN	R = -0,66
If = 179,27 - 97,21 PEN	R = -0,96	If = 30,58 + 4,51 MO	R = 0,69
Pi = -1,27 + 0,08 SO	R = 0,85	Pi = 1,72 + 0,57 MO	R = 0,69
Pi = 16,74 - 9,62 PEN	R = -0,82	MA = 8,13 + 12,52 MO	R = 0,72
Pi = -1,39 + 1,35 MO	R = 0,81		

Ces résultats montrent aussi que les parcelles forestières ont une bonne couverture du sol, un taux de MO élevé, une bonne stabilité des agrégats et une capacité d'infiltration élevée. Sous culture, les labours successifs réduisent la teneur en matière organique des horizons superficiels des sols, leur stabilité structurale et leur capacité d'infiltration. La conversion des terres forestières en cultures entraîne donc généralement une augmentation des risques de ruissellement et, sur ces pentes raides, des risques de ravinement.

Relations entre les caractéristiques des sols et leurs propriétés hydrodynamiques

Les études de corrélation entre les propriétés hydrologiques des sols (infiltration finale If, pluie d'imbibition Pi) et la stabilité des macro-agrégats (MA), d'une part, et les variables explicatives relatives à l'état

de surface (densité apparente da, résistance à la pénétration PEN, résistance au cisaillement SS, surface ouverte SO, surface ouverte CV, teneur en matière organique MO, humidité du sol H), d'autre part, ont montré que le comportement hydrologique du sol est déterminé par son état de surface (tableau II). Le taux d'infiltration finale If est généralement corrélé aux caractéristiques des états de surface et à la teneur en matière organique de l'horizon superficiel. En revanche, nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives entre le taux d'infiltration finale et la texture de surface (sable, argile, argile plus limon) [17], l'humidité initiale et la résistance au cisaillement, probablement parce que les variations sont trop faibles dans les cas étudiés. La pluie d'imbibition est liée aux états de surface (tassement) et à la teneur en matière organique. La stabilité des macro-agrégats est liée à la teneur en matière organique du sol.

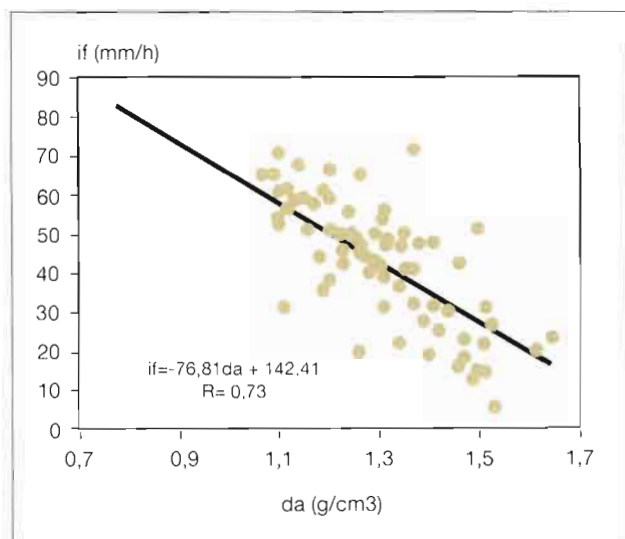


Figure 3. Relation entre l'infiltrabilité finale (If) et la densité apparente (da) de l'horizon superficiel du sol (0-10 cm).

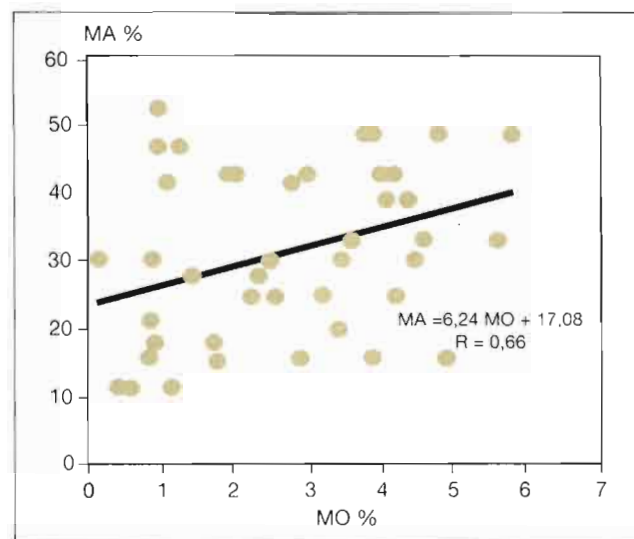


Figure 4. Relation entre la stabilité des macro-agrégats (MA %, y compris les sables grossiers) et la teneur en matières organiques (MO %) de la surface des sols (0-10 cm).

Pour l'ensemble de ces sols, la densité apparente est le paramètre de surface le plus lié à la capacité d'infiltration finale I_f (figure 3). La corrélation entre la densité apparente et l'infiltration est significative ($R = 0,73$) et la densité apparente peut être utilisée comme indicateur de l'infiltrabilité des sols, mais c'est une mesure difficile à faire sur le terrain, surtout en présence de cailloux.

La stabilité des agrégats est aussi liée à la teneur en matière organique des sols ($R = 0,66$) (figure 4), comme l'ont trouvé divers auteurs [11, 12, 17], mais d'autres facteurs (les cailloux) masquent ici l'impact des MO et de la stabilité des agrégats sur l'infiltrabilité et l'érodibilité des sols de montagne [18, 19].

Discussion

La mesure de l'érosion sur parcelles d'érosion et sur ravines, bien que coûteuse en temps [5 ans minimum] et main-d'œuvre, reste une référence incontournable, ne fût-ce que pour étudier les processus et valider les modèles. Mais en l'absence de ces mesures, les auteurs ont cherché à estimer les risques potentiels d'érosion à l'échelle de terroirs villageois montagnards en soumettant les divers sols et modes d'usage à une averse de fréquence 1/5 ans tombant sur un sol relativement sec (plus de 5 jours sans pluie, situation fréquente en zone semi-aride) : vu les pentes fortes des versants de ces montagnes, le taux d'infiltration finale nous a paru un bon indicateur du risque de ruissellement et de l'érosion linéaire qui domine. En effet, l'essentiel des transports solides a lieu au cours des gros orages d'intersaison [3]. Pour expliquer cet indicateur, on a eu recours à la mesure sur le terrain des états de surface (surface couverte et surface ouverte) et à l'analyse des caractères liés à l'hydrodynamique du sol de surface (da, MO, MA, PEN, texture, etc).

Il en ressort que cette approche de terrain avec un simulateur de pluies simplifié fournit des indications pertinentes sur les risques de ruissellement et d'érosion en fonction des modes d'utilisation des terres :

- les forêts naturelles ou plantées couvrent bien le sol, l'enrichissent en MO, améliorent l'agrégation et assurent une excellente infiltration, y compris lors des gros orages dévastateurs de fin d'été et de printemps ;

- le matorral surpâturé couvre beaucoup moins bien le sol qui, tassé par les sabots (pression de l'ordre de 3 kg/cm², autant que les pneus des tracteurs), donne beaucoup de ruissellement, mais peu de charge solide ;

- les terres de culture sont mal couvertes, rapidement appauvries en MO et devien-

nent d'autant plus vite instables que les sols sont sableux : vu leur instabilité, elles se couvrent de croûtes diverses [12, 17] et perdent rapidement leur capacité d'infiltration. Une fois dégradées, les terres exigent un travail du sol renouvelé : leur manque de cohésion favorise l'érosion ;

- les systèmes agroforestiers sont intermédiaires, plus riches en MO que les cultures en *openfield*, mais moins cohérentes que les sols sous forêt : leur infiltration est donc intermédiaire et fonction de la couverture du sol et des techniques de gestion des résidus organiques.

L'infiltration finale est liée aux états de surface, en particulier à la surface couverte (au ras du sol) et à la surface fermée par les croûtes et les zones compactées.

Elle est également liée à la stabilité des agrégats, elle-même fonction du taux de MO de l'horizon superficiel. Cependant, en montagne, le taux de cailloux, très important dans les lithosols, interfère avec l'agrégation pour déterminer l'érodibilité du sol face à l'agressivité des pluies et du ruissellement [18, 19].

Conclusions

En montagne, c'est le ruissellement concentré qui cause le plus de dégâts sur les versants raides. Les risques de ruissellement et d'érosion peuvent donc s'estimer en fonction de l'infiltrabilité des sols : celle-ci peut être mesurée sur le terrain par un simple irrigateur simulant des pluies de 50 mm de hauteur et de 80 mm/h d'intensité (averses de fréquence 1/5).

La comparaison entre différentes utilisations des terres montre que les terres forestières et agroforestières infiltrent mieux que le matorral pâturé (tassé) et les terres de culture (instables) : on pourrait donc utiliser ces indicateurs dans le cadre d'un SIG. L'infiltration finale est liée aux surfaces ouvertes, à la couverture de la surface, à la cohésion de la surface et à la stabilité des agrégats de l'horizon superficiel, elle-même généralement liée à sa teneur en matière organique. La densité apparente (porosité) et la teneur en matière organique peuvent être utilisées comme indicateurs secondaires des risques de ruissellement et d'érodibilité du sol, mais doivent être corrigés par la teneur en cailloux.

La forte pression démographique se manifestant par le surpâturage des terres forestières et leur mise en culture, entraîne une réduction importante du couvert végétal, de la matière organique, de la macroagrégation et une augmentation du tassement de la surface du sol et des risques de ruissellement et d'érosion. Le reboisement permet de restaurer la situation, mais il est rarement accepté par les paysans à qui on

soustrait une partie de leur surface de parcours. L'agroforesterie, en améliorant convenablement la teneur en matière organique et les caractéristiques hydrodynamiques des sols, permet une agriculture de montagne durable plus acceptable par les paysans.

Références

1. Heusch B. L'érosion du Pré-Rif. *Ann Rech Forestière ou Maroc* 1970 ; 12 : 9-176.
2. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES. *Cah Orstom Sér Pedol* 1993 ; 28 : 289-308.
3. Laouina A. Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull Réseau Erosion* 1998 ; 18 : 33-53.
4. Merzouk A. *Erodibility of nine Moroccan soils*. Thesis Dept. Soil Sc, Univ. Minnesota, 1985, 185 p.
5. Al Karkouri J, Roose E, Laouina A, Sabir M. État de surface, infiltration et risque d'érosion dans la vallée de Beni Boufrah. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 342-56.
6. Moufaddal K. Résultats des parcelles d'érosion dans le bassin-versant de l'oued Nakhla, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 244-54.
7. Naimi M, Tayaa M, Ouzizi S, Choukr-Llah R, Kerby M. Ravinement dans le BV du Nakhla, Rif occidental, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 232-43.
8. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agricultural handbook, 703. Washington (DC) : USDA, 1997 ; 125 p.
9. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water stable aggregation in soils. *J Soil Sci* 1982 ; 33 : 141-63.
10. Quirk JP, Murray RS. Towards a model for soil structural behavior. *Australian J Soil Res* 1991 ; 29 : 829-67.
11. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European J Soil Sci* 1996 ; 47 : 425-37.
12. Barthès B, Albrecht A, Asseline J, Denoni G, Roose E. Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Comm. Soil Sci Plant Anal* 1999 ; 30 : 1928-38.
13. Barnett AP, Rogers JS. Soil physical properties related to runoff and erosion from artificial rainfall. *Trans ASAE* 1966 ; 9 : 123-8.
14. Sabir M, Merzouk A, Berkat O, Roose E. Effet du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastoral aride (Aarid, Haute Moulouya, Maroc). XIII^e Congrès international du génie rural, 2-6 février 1998, ANAFID, Rabat. *Bull Réseau Erosion* 1994 ; 14 : 444-62.

15. Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In : Black CA, ed. *Methods of soil analysis, part 1*. Agronomy monograph n° 9. Madison (Wisconsin) : American Society of Agronomy (ASA), 1986 : 425-42.
16. Roose E. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 87-97.
17. Mrabet R, Lahoul S, Le Bissonnais Y, Duval O. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées. In : « Land use, erosion & carbon sequestration. Abstracts ». International Colloquium, Montpellier 23-28 novembre 2002, IRD, Montpellier : 113.
18. Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment, cover and position. *Catena* 1992 ; 19 : 451-74.
19. Blavet D, De Noni G, Roose E, Maillo L, Laurent JY, Asseline J. Effet des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 2004 ; 15 : 111-20.

Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France)

Didier Blavet¹
Georges De Noni¹
Éric Roose¹
Ludovic Maillou²
Jean-Yves Laurent¹
Jean Asseline¹

¹ Institut de recherche
pour le développement (IRD),
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France

<Didier.Blavet@mpl.ird.fr>
<Georges.DeNoni@mpl.ird.fr>
<Eric.Roose@mpl.ird.fr>

² Centre d'études et de recherches sur les
montagnes sèches et méditerranéennes
(CERMOSEM),
Le Pradel,
Domaine Olivier de Serres
07170 Mirabel,
France

Résumé

Dans le cadre des recherches sur la réduction des risques de ruissellement et d'érosion sous vigne, 36 pluies simulées ont été réalisées en Ardèche (France méridionale) pour tester six techniques culturales récemment mises en place sur un sol brun calcaire contenant 40 % de cailloux dans sa partie supérieure. Ces techniques sont : le désherbage chimique total ; un travail du sol par sarclage à 10 cm ; une couverture du sol par paillage ; un enherbement de graminées ; un sarclage avec dépierrage à 30 % de cailloux ; et un sarclage avec empierrage à 80 % de cailloux. Les données obtenues sur le ruissellement et les pertes en terre ont fait l'objet de classements multivariés, qui ont permis de regrouper les techniques culturales en trois groupes vis-à-vis de la réduction des risques : le paillage et le sarclo-empierrage sont apparus comme étant les techniques les plus favorables, à l'opposé des techniques de sarclo-dépierrage et de désherbage chimique total, tandis que les techniques de sarclage simple et d'enherbement ont fourni des réponses intermédiaires. Ces résultats ont été discutés lors de la recherche de facteurs explicatifs, et après analyse de leurs corrélations avec certaines caractéristiques de la surface et de la partie supérieure du sol. Cette analyse a montré que, durant les pluies, le ruissellement est significativement réduit par le taux d'ouverture de la porosité en surface du sol. Elle a montré aussi que la stabilité structurale, qui est liée au taux de matière organique, tend à réduire le ruissellement, par son rôle protecteur contre la désagrégation et le colmatage de la porosité. Enfin, elle indique que le taux de couverture du sol, dans lequel peuvent intervenir les cailloux posés à la surface du sol, réduit significativement le colmatage de la porosité et les pertes en terre. En définitive, cette étude met en avant l'intérêt des techniques de paillage et de sarclo-empierrage vis-à-vis de la réduction rapide des risques de ruissellement et de pertes en terre, tout en soulignant qu'il conviendrait d'effectuer un suivi à plus long terme du dispositif expérimental (en particulier pour l'enherbement), ainsi qu'une enquête sur l'acceptabilité par les viticulteurs des techniques culturales les plus efficaces.

Mots clés : Érosion hydrique ; Techniques culturales ; France.

Summary

Influence of cultural practices on the risks of runoff and interrill erosion under vineyard in Ardeche (France)

Within the framework of the research on how to reduce the risks of runoff and erosion in vineyards, 36 simulated rains were performed in Ardeche (Southern France), in order to test six farming techniques recently set up on a calcareous brown soil whose topsoil contains 40% of stones. These techniques are as follows: 1) full chemical

Fonds Documentaire IRD



010036116

weed control; 2) mechanical weeding in the upper 10 cm of the soil; 3) straw mulching; 4) graminaceous grass covering; 5) mechanical weeding with stone removal, leaving a topsoil with 30% of stones; and 6) mechanical weeding concentrating stones in the topsoil with 80% of the surface covered by stones. The data obtained on runoff and soil losses were subjected to multivariate classifications, allowing farming techniques to be broken down into three groups with regard to runoff and interrill erosion risk reduction: i) mulching and weeding & metalling techniques seemed to be the most favourable techniques, contrary to ii) weeding & stone removal techniques and to full chemical weed control; while iii) simple mechanical weeding and grass covering techniques provided intermediate answers. These results were discussed while searching for explanatory factors, and after analysing their correlations with certain characteristics of the soil surface and topsoil features. The analysis showed that, during the rains, runoff is significantly reduced by the soil surface porosity opening rate. It also showed that the aggregate stability, which is related to the organic matter rate, tends to reduce runoff owing to its protective role against slaking and porosity filling. Last, it indicates that the soil cover rate, where the stones layed out on the soil surface can intervene, significantly reduced porosity filling and soil losses. Ultimately, this study shows how mulching and weeding & metalling techniques can help quickly reduce runoff and soil loss risks, while stressing that it would be advisable to carry out a longer-term follow-up of the experimental devices (particularly for grass covering), as well as an analysis to find out how the most effective farming techniques are likely to be accepted by wine growers.

Key words: Water Erosion; Cultural Practices; France.

Les dégâts causés par le ruissellement et l'érosion dans le vignoble ardéchois, comme dans une grande partie du vignoble français, se sont aggravés au cours des trente dernières années [1-4]. Ce danger ne doit pas être sous-estimé, non seulement pour les conséquences touchant à la qualité des vins, mais aussi pour les conséquences sur l'évolution des paysages à l'échelle des bassins-versants. En effet, dans la nature, tous les mécanismes de circulation de l'eau et des sédiments sont liés, de telle sorte que ce qui se passe sur la parcelle viticole aura forcément des répercussions sur le régime des cours d'eau. Rappelons qu'en France et en zone méditerranéenne en général, les crues et les inondations représentent le risque naturel dominant [5], et qu'au cours des vingt dernières années, plusieurs catastrophes ont touché la partie méridionale du pays [6-8].

En Ardèche, dans le Bas-Vivarais, différents facteurs contribuent à accroître les risques d'érosion. En premier lieu, cet espace géographique étant situé aux confins des domaines méditerranéens et cévennols, les averses peuvent être abondantes (> 120 mm/j) et violentes, ce qui peut être à l'origine de forts ruissellements induisant l'érosion hydrique des sols. De plus, ceux-ci sont en général peu épais, pauvres en matière organique et développés sur des coteaux à forte pente qui ne résistent que faiblement à l'érosion lorsqu'ils sont cultivés. Par ailleurs, l'évolution de l'usage des sols et des techniques de culture fournit des arguments complé-

mentaires pour expliquer l'augmentation des effets de l'érosion. La vigne existe depuis plus de 2 000 ans en Ardèche, occupant les zones de plaine et de vallée. Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, les viticulteurs ont déplacé la vigne vers les terroirs de coteaux pour produire des vins de meilleure qualité. Aujourd'hui, si la vigne est devenue la principale ressource agricole de la région, tous les problèmes ne sont pas maîtrisés. Notamment, l'évolution des dernières décennies est à la source de l'accélération des risques de dégradation physique des sols : le désherbage chimique et la mécanisation réalisée dans le sens de la pente ont été adoptés par la plupart des viticulteurs, mais ils provoquent le tassement des sols, leur encreusement et la diminution de leur capacité d'infiltration [9].

Pour évaluer la possibilité de freiner cette dynamique érosive, une étude expérimentale a été menée par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'université de Grenoble sur le site du domaine « Olivier de Serre », au Pradel (figure 1). L'objectif est double :

- i) d'une part, évaluer le ruissellement et les pertes en terre associées sur un même type de sol soumis à différentes techniques de culture de la vigne afin d'identifier les techniques les plus favorables pour réduire l'effet de ces phénomènes ;
- ii) d'autre part, rechercher les facteurs principaux permettant d'expliquer l'efficacité de telle ou telle technique dans le but d'aider les viticulteurs à lutter contre l'érosion des sols.

Matériel et méthode

Site d'étude

L'étude a été réalisée en Ardèche, dans l'ancien « pays du Vivarais », région de transition constituée de paysages contrastés qui s'étendent depuis les basses terres de la vallée du Rhône (moins de 100 m d'altitude) jusqu'aux hautes terres du Massif central, à plus de 1 500 m d'altitude.

Au nord, on trouve le Haut-Vivarais, plateau cristallin entaillé par quelques vallées profondes. Au sud, s'étend le Bas-Vivarais qui se distingue par son relief plus diversifié, associant plateaux calcaires, épanchements volcaniques et petites dépressions périphériques où est localisé le site d'étude. Celui-ci est inclus dans le bassin-versant du Gazel dont le relief vallonné est compris entre 526 m d'altitude à l'amont, en bordure du Coiron volcanique, et 236 m d'altitude à l'aval, dans des terres marno-calcaires. Le site d'étude proprement dit (figure 1) correspond à une parcelle viticole de la ferme expérimentale du domaine Olivier de Serres, à Pradel (44° 35' N - 4° 30' E), à 285 mètres d'altitude [10].

Cette parcelle est localisée sur un lambeau de glaciais d'érosion de pente moyenne de 12 %. Le substrat marno-calcaire est recouvert par des colluvions à forte charge en cailloux basaltiques et calcaires (40 % à la surface du sol). Le sol est brun calcaire à texture limono-argileuse, d'épaisseur variant entre 0,4 et 1,2 mètre,

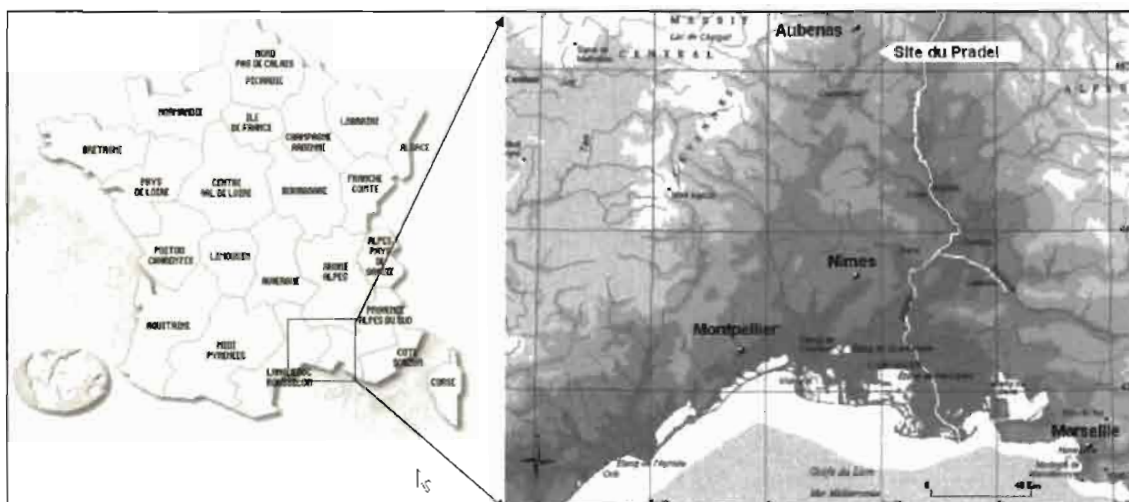


Figure 1. Localisation du site d'étude.

moyennement pourvu en matière organique (20 g.kg^{-1}) et en carbonates de calcium (320 g.kg^{-1}).

Les précipitations sont un des facteurs déterminants de la dynamique érosive de cette région. En effet, les événements sont en grande partie liés à un contexte climatique sous la double influence méditerranéenne et cévenole. Ainsi, les précipitations méditerranéennes concentrées essentiellement en automne et au printemps connaissent une exacerbation du fait de la proximité des Cévennes [7, 8]. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de $1\,000 \text{ mm/an}$, parmi lesquelles certaines pluies sont à l'origine d'intensités qui peuvent, chaque année, dépasser 40 mm/h , voire atteindre 100 mm/h [11].

Techniques culturales

La parcelle étudiée est une vigne palissée (cépage Syrah), âgée de 24 ans au moment de l'étude. Les ceps, distants les uns des autres de 1 mètre, sont encore en pleine production. Les inter-rangs, larges de 2,20 m, sont orientés dans le sens de la pente pour faciliter la mécanisation.

Quatre techniques de préparation des inter-rangs de vigne, parmi les plus usitées [12], ont été mises en place au printemps 1999 :

- désherbage chimique total (DCT) par herbicide systémique de pré-levée à la fin de l'hiver et herbicide systémique foliaire à la fin du printemps, qui correspond aux pratiques culturales actuellement mises en œuvre dans la région ;

- travail du sol par sarclage mécanique conventionnel à 10 cm, qui produit une surface désherbée avec 40 % de cailloux (SARC40), et correspond aux pratiques culturales utilisées antérieurement au désherbage chimique ;

- couverture du sol par paillage avec 25 t/ha de paille fraîche (PAIL) sur sol sarclé ;

- enherbement (ENHB) de graminées avec préparation du sol avant ensemencement, constitué de 30 % de « ray-grass anglais » (*Lolium perenne*) et de 70 % de fétuque rouge (*Festuca rubra*).

Deux variantes au sarclage ont été introduites sur des placettes expérimentales de 1 m^2 , afin d'étudier l'influence du taux de cailloux en surface :

- sarclage avec dépierrage manuel produisant une surface désherbée avec 30 % de cailloux (SARC30) qui s'apparente aux épierres traditionnellement effectués en milieu méditerranéen, d'une part ;

- sarclage avec empierage manuel produisant une surface désherbée avec 80 % de cailloux (SARC80) qui s'apparente aux mulchs de cailloux utilisés traditionnellement dans certains vignobles suisses, d'autre part [13].

Le calendrier de mise en place des expérimentations, incluant le fauchage de

l'herbe (FH) à partir de la situation initiale couverte par des adventices (AV), est rappelé dans le *tableau 1*.

Analyses sur placettes expérimentales

• Simulation de pluies

Pour chacune des six techniques culturales testées, des séquences de pluies simulées de 60 mm/h ont été réalisées dans les inter-rangs de vigne (juin 1999), sur des placettes de 1 m^2 . Afin de reproduire des pluies sur sol sec, puis sur sol humide, chaque séquence de pluies comportait une pluie de 30 minutes sur sol initialement sec, suivie d'une interruption de 15 minutes, puis une pluie de soixante minutes. Durant chaque pluie, le ruissellement a été mesuré toutes les minutes et l'eau de ruissellement a été prélevée toutes les 5 minutes, afin de déterminer la charge solide. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque technique culturale (soit 36 pluies au total). Ces pluies ont été réalisées à

Tableau 1. Calendrier de traitement des parcelles expérimentales.

Année	Date	Technique culturale			
		Rang 1 (DCT)	Rang 2 (ENHB)	Rang 3 (SAR)	Rang 4 (PAIL)
1998 (-1)	15/03	AV	AV	AV	AV
	30/03	FH	FH	FH	DCT
	14/05	SARC	SARC	-	SARC
	19/05	DCT	DCT	-	DCT
1999 (année de l'étude)	17/02	-	SARC	SARC	SARC
	18/02	DCT	-	-	PAIL
	23/02	-	ENHB	-	-
	15/06	-	Début des simulations de pluies		

AV : adventices ; FH : fauchage de l'herbe ; SARC : sarclage ; DCT : désherbage chimique total ; PAIL : paillage.

Tableau II. Modalités des caractéristiques globales de surface et éléments de surface correspondants.

Caractéristiques globales de surface		Éléments de surface
Type de couverture de la surface	Surface couverte Surface nue	Adventices vivantes ; canopée ; litière ; cailloux (reste) = sol directement touché par la pluie
Type d'ouverture de la surface	Surface fermée Surface ouverte	Cailloux inclus dans une croûte ; croûtes (sédimentaires ou tassement) (reste) = cailloux posés sur agrégats ; mottes ; fissures ; pores biologiques (faune ou racine).

l'oïde d'un mini-simulateur de type Orstom/IRD [14].

Les paramètres mesurés sont :

– les humidités pondérales initiales de la couche 0-10 cm du sol (au début de la première pluie et au début de la seconde pluie) ;

– plusieurs variables de ruissellement et de pertes en terre, qui se répartissent comme suit :

• Six variables de ruissellement :

Pi 1 et Pi 2 : pluies d'imbibition durant la 1^{ère} et la 2^e pluie (en mm) ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la 1^{ère} et la 2^e pluie (en % de la pluie) ; INF 1 et INF 2 : infiltration à la fin de la 1^{ère} et de la 2^e pluie (en mm/h).

• Quatre variables de pertes en terre :

TURBIM 1, TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de 1^{ère} et de 2^e pluie (en g/L) ; MES 1 et MES 2 : matière exportée en suspension lors de la 1^{ère} et de la 2^e pluie (en g/m²).

• Analyse des états de surface

Sur des placettes de 1 m² soumises aux simulations de pluies, les éléments de surface ont été observés avant et après les pluies, tous les 2 centimètres et le long de quatre transects espacés de 20 cm (soit un total de 196 points par placette). Ce comptage a permis, notamment, d'apprécier deux caractéristiques globales de la surface du sol : le taux de couverture qui intervient sur la protection de la surface du sol contre l'énergie des gouttes de pluies, et le taux d'ouverture qui intervient sur les possibilités d'infiltration de l'eau [15]. Les modalités de couverture, et d'ouverture/fermeture de la surface du sol, et les éléments de surface correspondants sont précisés dans le *tableau II*. On y distingue, en particulier, deux types de cailloux : les cailloux posés sur des agrégats de terre, qui constituent des surfaces ouvertes favorisant l'infiltration ; et les cailloux inclus dans une croûte, qui constituent des surfaces fermées réduisant l'infiltration [16, 17].

• Prélèvements de sol

Afin d'obtenir les humidités de la couche 0-10 cm du sol en début de chaque pluie simulée, un prélèvement de sol a été effectué en bordure immédiate de chaque pla-

cette de 1 m², dans la zone soumise directement à la pluie.

Par ailleurs, pour chaque type de technique culturale, trois prélèvements de sol ont été effectués dans la couche 0-5 cm du sol à proximité des placettes expérimentales, afin d'en déterminer la stabilité structurale, la texture et la teneur en matière organique.

Analyses en laboratoire

L'humidité du sol et la charge solide des eaux de ruissellement ont été évaluées par pesées après séchage à l'étuve.

La stabilité structurale a été estimée par une méthode produisant l'éclatement dans l'eau de la fraction [3 150-5 000 µm] du sol et la séparation des agrégats stables en plusieurs classes granulométriques de 0 à 5000 µm [18, 19]. Les indices de stabilité obtenus sont corrélables aux résultats de simulations de pluie sur sols calcaires nus [20] et ont été exprimés par le diamètre médian (MWD) des macroagrégats stables à l'eau [21].

Les analyses granulométriques (agrégats et texture de la fraction de sol 0-2 mm) ont été effectuées par diffraction laser et colonnes de sédimentation. La texture a été déterminée par cinq classes granulométriques : argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers, regroupés ultérieurement en trois classes : argiles, limons et sables.

La matière organique et les carbonates ont été dosés à l'aide du micro-analyseur Thermo Finnigan NA 2000. Les résultats du carbone organique du sol (SOC) ont été exprimés en g/kg de sol tamisé à 2 mm.

Traitement des données

Le calcul des valeurs de ruissellement et de pertes en terre a été effectué à partir des hydrogrammes et des turbidigrammes de chaque pluie.

Dans le cadre de la comparaison des techniques culturales, toutes les variables des secondes pluies ont été prises en compte (Pi 2, KR 2, INF 2, TURBIM 2 et MES 2). En revanche, pour les premières pluies, seuls la pluie d'imbibition (Pi 1) et le taux de ruissellement (KR 1) ont finalement été retenus dans la mesure où : i)

l'infiltration finale (INF 1) n'était pas stabilisée ; ii) la turbidité finale (TURBIM 1) ne pouvait être définie sous certaines techniques culturales en absence de ruissellement ; iii) au total, les matières exportées en suspension (MES 1) s'avéraient soit nulles, soit quantitativement faibles, avec une incertitude de mesure assez importante due au régime non stabilisé et à la faible durée du ruissellement par rapport à la périodicité des prélèvements d'eau.

Les analyses statistiques classiques (corrélations, comparaison de moyennes avec test de Newman-Keuls, classification ascendante hiérarchique) ont été effectuées à l'aide du logiciel Statistica v.6 (StatSoft™).

Un classement semi-automatique des techniques culturales a été obtenu par le calcul de notes d'appréciation, selon les étapes décrites ci-dessous.

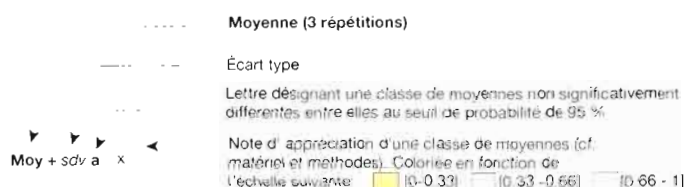
Dans une première étape, nous avons effectué un classement des valeurs moyennes obtenues pour chaque variable de ruissellement ou de pertes en terre (désignées ci-dessous par vari, avec i = nombre de variables) par comparaison de moyenne selon le test statistique de Newman-Keuls. Ce classement a fourni un nombre de classes statistiques (généralement distinguées les unes des autres par des lettres) au sein desquelles les moyennes ne sont pas significativement différentes. Les classes statistiques ont été transformées en autant de numéros de classes (nk_{vari}) que de nombre k_{vari} de classes. Le numéro de classe le plus faible ayant été fixé à 1 par convention, le numéro de classe le plus élevé a été affecté à la classe de valeurs la plus favorable, en posant que, pour les variables d'infiltration (Pi x et INF 2), la classe la plus favorable est celle qui présente les valeurs les plus élevées, tandis que pour les variables de ruissellement et de pertes en terre la classe la plus favorable est celle qui présente les valeurs les plus faibles. A partir de ces numéros de classe, une note d'appréciation standardisée (intitulée NStand_{vari,techj}) a été obtenue pour chaque variable de ruissellement ou de pertes en terre et chaque technique culturale (techniques intitulées techj, avec j = indice de technique culturale), de façon à ce que cette note se situe, par convention, sur une échelle de 0 à 1. Elle a

Tableau III. Données moyennes de ruissellement et de pertes en terre sous simulations de pluies avec regroupements statistiques des moyennes et classement semi-automatique des techniques culturales.

Variables de ruissellement et de pertes en terre	Techniques culturales											
	DCT	SARC30	ENHB	SARC40	SARC80	PAIL						
Pi 1 : pluie d'imbibition durant la 1 ^{ère} pluie (mm)	9,8 ± 3,1 c	0	19,8 ± 4,8 b	0,5	9,3 ± 4,2 c	0	23,8 ± 5,1 a	1	30 ± 0,5 a	1	30 ± 0,8 a	1
KR 1 : taux de ruissellement durant la 1 ^{ère} pluie (%)	27,5 ± 7,2 b	0	8,9 ± 7,3 a	1	17,9 ± 8,6 b	0	4,2 ± 5,8 a	1	0 ± 0 a	1	0 ± 0 a	1
Pi 2 : pluie d'imbibition durant la 2 ^e pluie (mm)	1,2 ± 0,4 b	0	1,1 ± 0,6 b	0	1,6 ± 0,2 b	0	4,8 ± 4,0 b	0	35,6 ± 23,1 a	1	22,7 ± 2,2 a	1
KR 2 : taux de ruissellement durant la 2 ^e pluie (%)	78,2 ± 5,1 c	0	61 ± 12,9 b	0,5	56,4 ± 9,8 b	0,5	24,5 ± 13,3 a	1	4,8 ± 4,6 a	1	12,2 ± 3,1 a	1
INF 2i : infiltration stabilisée à la fin de la 2 ^e pluie (mm/h)	8,3 ± 3,9 c	0	13,5 ± 8,1 c	0	18,5 ± 5,8 c	0	38,2 ± 8,1 b	0,5	55,3 ± 3,3 a	1	41,8 ± 9,3 b	0,5
TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de 2 ^e pluie (g/L)	2,2 ± 2,3 a	1	8 ± 0,3 c	0	2,1 ± 0,3 a	1	5,6 ± 1,7 b	0,5	5 ± 0,5 b	0,5	0,2 ± 0,3 a	1
MES 2 : matières expartées en suspension lors de la 2 ^e pluie (g/m ²)	105,3 ± 113,2 a	1	309,4 ± 67,8 b	0	71,6 ± 4,2 a	1	93 ± 76,0 a	1	12,2 ± 12,0 a	1	1,6 ± 1,9 a	1
↓ ↓												
Note moyenne de la technique culturale	0,29	0,29	0,36	0,71	0,93	0,93						

DCT : désherbage chimique total ; SARC : sarclage ; ENHB : enherbement ; PAIL : paillage.

Lecture du tableau :



été effectuée comme suit : note d'appréciation standardisée = (numéro de classe auquel appartient la technique culturale pour une variable donnée - 1) / (nombre de classes pour cette variable - 1), c'est-à-dire selon la formule $N_{Stand\ vari, techj} = (nk_{vari, techj} - 1) / (k_{vari} - 1)$. Finalement, une note globale NG_{techj} d'appréciation des techniques culturales a été obtenue en effectuant la moyenne des notes d'appréciations standardisées de chaque variable de ruissellement et de pertes en terre, c'est-à-dire selon la formule

$$NG_{techj} = \frac{\sum_i N_{Stand\ var\ i, techj}}{i}$$

Résultats et discussion

Comparaison des techniques culturales vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre

Le tableau III présente les moyennes et l'écart type des données de ruissellement et de pertes en terre sous simulations de pluies en fonction des six techniques culturales testées, ainsi que les comparaisons statistiques de moyennes effectuées selon le test de Newman-Keuls.

Ces données et leur regroupement statistique indiquent que durant la première

pluie, sur surface de sol relativement sèche (humidité pondérale moyenne entre 4 et 10 % pour la couche 0-5 cm), la pluie d'imbibition (variable Pi 1) est significativement plus élevée sous paillage (PAIL) et sous les techniques de sarclage (variables SARC80, SARC40, et SARC30 dans une moindre mesure) que sous les techniques de désherbage chimique et d'enherbement (variables DCT et ENH). En parallèle, durant cette première pluie, le taux de ruissellement est plus élevé sous ces deux dernières techniques.

Durant la seconde pluie, sur surface de sol humide (humidité pondérale moyenne entre 11 et 20 % pour la couche 0-5 cm), et quelle que soit la technique culturale, les taux de ruissellement sont significativement plus élevés que durant la première pluie (KR 1 = 0 à 27,5 % ; KR 2 = 4,8 à 78,2 %). Cependant, le paillage et le sarclo-empierrement se distinguent des autres techniques avec des pluies d'imbibition significativement plus élevées (Pi 2 = 22,7 et 35,6, respectivement, contre moins de 5 mm pour les autres techniques). Les taux de ruissellement sont minimaux, ainsi que le montre la figure 2a, sous ces deux techniques (KR 2 = 12,2 et 4,8, respectivement), tandis qu'à l'opposé, le taux de ruissellement sous désherbage chimique total est maximal (KR 2 = 78,2 %). En parallèle, l'infiltration stabilisée est maximale sous les deux techniques de paillage et de sarclo-

empierrement (INF 2 = 41,8 et 55,3 respectivement, contre moins de 39 mm/h pour les autres techniques).

En ce qui concerne les pertes en terre durant cette seconde pluie, la turbidité finale de l'eau de ruissellement s'avère significativement plus élevée sous les techniques culturales à base de sarclage (TURBIM 2 = 5 à 8 g/L), et plus particulièrement sous le sarclo-dépierrage (8 g/L) que sous les autres traitements (TURBIM 2 ≤ 2,2 g/L). Cependant, dans la mesure où les matières exportées en suspension dépendent à la fois du ruissellement et de la turbidité, les données obtenues (figure 2b) montrent qu'elles sont minimales sous paillage et sarclo-empierrement (MES 2 = 1,6 et 12,2 g/m², respectivement), et maximales sous désherbage chimique total et sarclo-dépierrage (MES 2 = 105,3 et 309,4 g/m², respectivement).

Le classement semi-automatique des techniques culturales permet d'apprécier globalement ces données et de hiérarchiser les techniques entre elles. D'après ce classement, avec une note d'appréciation globale de 0,93, le paillage et le sarclo-empierrement s'avèrent être les techniques les plus favorables. À l'opposé, le sarclo-dépierrage et le désherbage chimique total cumulent le plus d'inconvénients vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre (notes d'appréciation globales de 0,29). Enfin, et contrairement aux attentes initia-

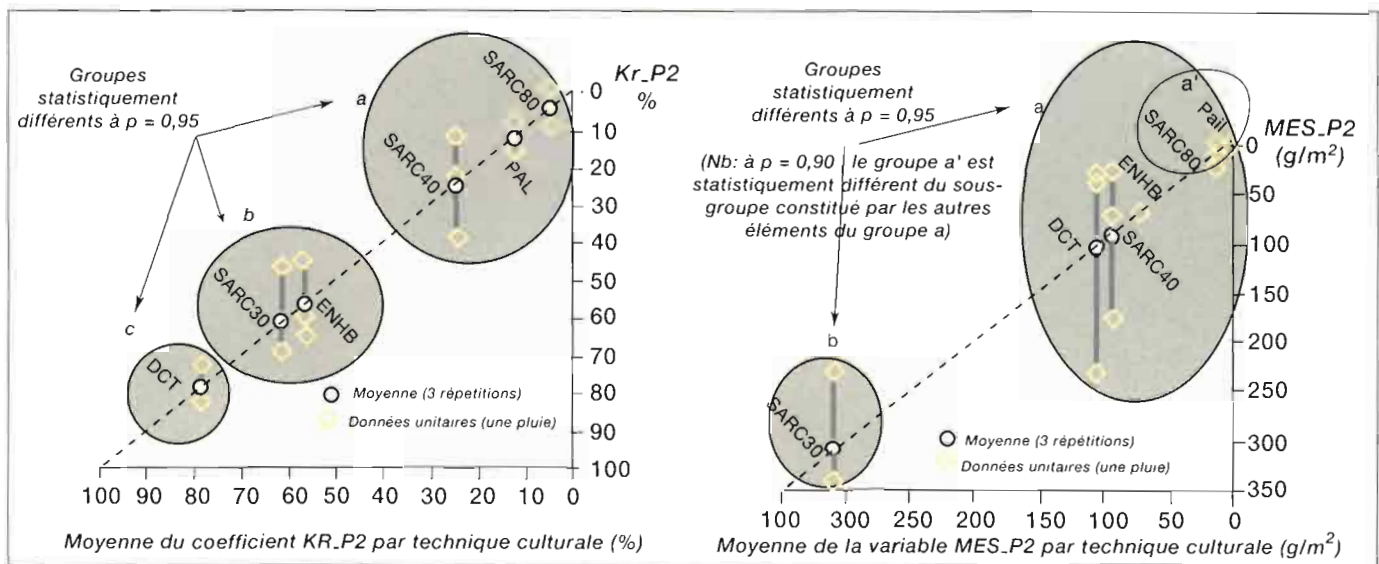


Figure 2. Taux de ruissellement et matières exportées en suspension durant la seconde pluie simulée, selon les différentes techniques culturales (données brutes et moyennes).

2.a. Taux de ruissellement, en % de la pluie (coefficient KR 2). 2.b. Matières exportées en suspension, en g/m² (variable MES 2).

les, on remarque que l'enherbement se classe relativement mal au sein de l'ensemble des techniques testées (note globale de 0,36 contre 0,71 pour le sarclage mécanique conventionnel). Ce fait est attribuable en grande partie à des caractéristiques de ruissellement défavorables (taux de ruissellement relativement élevé), qui peuvent, dans certains cas, se rencontrer sous enherbement [22, 23]. En l'occurrence, ces caractéristiques de ruissellement pourraient s'expliquer par un développement relativement faible de *Festuca rubra*, l'une des deux graminées semées trois mois auparavant [8].

Ce classement semi-automatique des techniques culturales, qui garde une certaine part de subjectivité, est confirmé, pour une large part, par une classification ascendante hiérarchique des six techniques culturales testées, qui inclut les trois répétitions de chaque technique culturale et qui repose sur les sept variables de ruissellement et de pertes en terre retenues (figure 3). En effet, mis à part le cas du sarclage mécanique conventionnel (SARC40), pour lequel il subsiste une assez forte variabilité entre les trois répétitions, cette classification agrège entre elles les répétitions d'une même technique culturale, et ordonne, sans leur affecter de jugement de valeur, les techniques culturales selon la séquence suivante : SARC30-DCT-ENHB-SARC80-PAIL.

Recherche de facteurs explicatifs des différences de ruissellement et de pertes en terre

Pour expliquer les différences de ruissellement et de pertes en terre observées entre

les techniques culturales, nous avons recherché l'existence éventuelle de relations entre les variables de ruissellement et de pertes en terre et deux ensembles de variables qui pourraient *a priori* les influencer [24-26] :

- d'une part, et à titre de contrôle, un ensemble de variables dont la variabilité, n'est, *a priori*, pas principalement dépendante des techniques culturales mais qui pourraient néanmoins influencer les variations de ruissellement et de pertes en terre observées. Notons que la pente, qui varie de 10 à 16 % selon les situations, a été écartée de ces variables, car elle n'intervient pratiquement pas à l'échelle du mètre

- carré dans cette fourchette de valeurs [27]. En définitive, les variables contrôlées ont été : i) la texture de la partie supérieure du sol, *a priori* liée à la variabilité du milieu, qui peut notamment jouer sur les propriétés d'infiltration et la stabilité structurale ; et ii) l'humidité des horizons de surface et de sub-surface qui pourrait jouer sur la conductivité hydraulique et la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer avant que le ruissellement ne se déclenche ;
- d'autre part, à titre d'hypothèse, un ensemble de variables dont la variabilité est, *a priori*, principalement dépendante des techniques culturales, et qui pourraient influencer les variations de ruissellement et

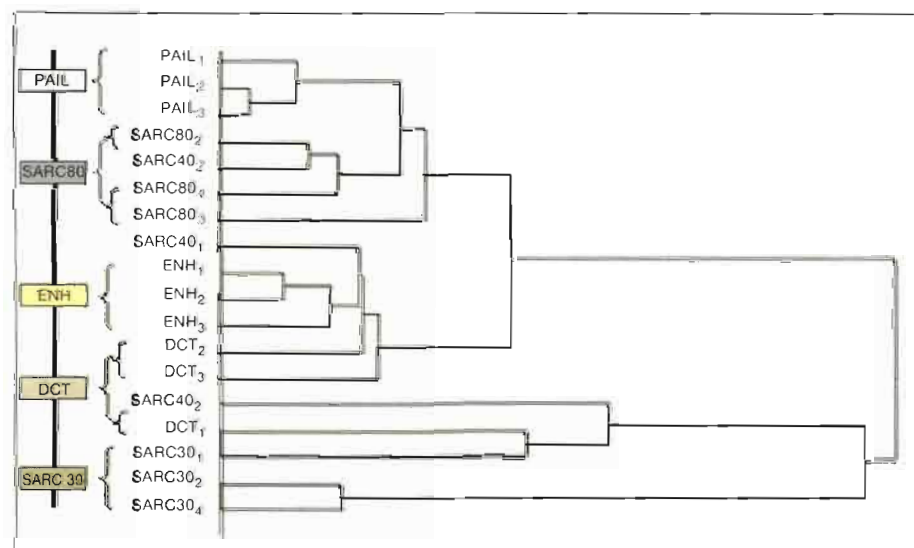


Figure 3. Classification ascendante hiérarchique des placettes étudiées selon les données de ruissellement et de pertes en terre.

Tableau IV. Facteurs potentiels des différences de ruissellement et de pertes en terre selon les techniques culturales.

Facteurs potentiels de ruissellement et de pertes en terre pris en compte				Techniques culturales						
				n	DCT	ENHB	SARC30	SARC40	SARC80	PAIL
Facteurs potentiels ne dépendant pas principalement, <i>a priori</i> , des techniques culturales (facteurs contrôlés)	Texture	ARGILE	0-5 cm	1(*)	34,62	–	34,59	34,59	34,59	33,03
		LIMONS	0-5 cm	1(*)	39,85	–	42,30	42,30	42,30	41,92
		SABLES	0-5 cm	1(*)	25,53	–	23,11	23,11	23,11	25,05
	Humidité du sol (g/kg de sol)	Début 1 ^{ère} pluie	0-5 cm	3	5 ± 0,9	4 ± 0,8	10 ± 4,1	7 ± 1,3	11 ± 4,3	6 ± 2,0
			0-10 cm	3	7 ± 0,9	4 ± 0,9	12 ± 5,2	9 ± 1,6	13 ± 5,4	8 ± 2,5
		Début 2 ^e pluie	0-5 cm	3	12 ± 2,1	11 ± 1,9	17 ± 5,9	15 ± 1,6	20 ± 5,7	12 ± 0,6
			0-10 cm	3	11 ± 0,9	11 ± 1,9	16 ± 5,8	14 ± 1,6	19 ± 5,6	12 ± 0,6
Facteurs potentiels dépendant principalement, <i>a priori</i> , des techniques culturales	Stabilité structurale (MWD µm)	0-5 cm	1(*)	130	–	197	197	197	280	
	SOC g/kg de sol 0-2 mm	0-5 cm	1(*)	12,4	–	16,7	16,7	16,7	17,3	
	Couverture de la surface du sol	Cailloux %	[2,4]	49	26	27	38	83	0	
		Litière %	[2,4]	11	6	0	6	0	100	
		Adventices au graminées %	[2,4]	1	61	0	0	0	0	
		Taux de couverture du sol %	[2,4]	61	93	28	44	83	100	
	Fermeture de la surface du sol	Taux de surfaces fermées en début de 1 ^{ère} pluie %	[2,4]	70	43	8	7	34	–	
		Taux de surfaces fermées en fin de 2 ^e pluie %	[2,4]	100	87	93	78	63	–	

(*) moyenne de 3 répétitions ; DCT : désherbage chimique total ; ENHB : enherbement ; SARC : sarclage ; PAIL : paillage.

de pertes en terre observées. Il s'agit i) de la stabilité structurale des horizons de surface, qui pourrait notamment jouer, durant les pluies, sur la détachabilité des particules de terre et sur la formation plus ou moins importante de réorganisations superficielles peu perméables ; et ii) de caractéristiques de la surface du sol : son taux de couverture qui pourrait avoir un rôle de protection contre l'érosion, et son taux de fermeture qui pourrait influencer l'infiltration.

L'ensemble des données correspondant à ces variables est récapitulé au *tableau IV*.

- Facteurs contrôlés, *a priori* non principalement liés aux techniques culturales

Texture

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les teneurs en argile et en sable d'une part, et les variables de ruissellement et de pertes en terre, d'autre part, ce qui s'explique probablement par le fait que les valeurs de texture sont très similaires pour les différentes techniques culturales (*tableau IV*).

Humidité

Il n'apparaît aucune corrélation linéaire significative entre l'humidité en début de pluie (couches 0-5 cm et 0-10 cm) et les variables de ruissellement et de pertes en terre. L'étude des diagrammes de dispersion ne montre également pas de relation curvilinéaire évidente. Cette absence de corrélation peut probablement s'expliquer par une variation relativement faible d'humidité initiale entre les traitements

(*tableau IV*). Elle conduit à examiner plus avant les autres facteurs explicatifs potentiels.

- Facteurs explicatifs potentiels principalement liés aux techniques culturales

Stabilité structurale et facteur de stabilité des horizons de surface

Ainsi que le montre le *tableau V*, il existe des corrélations assez significatives ($p = 90\%$) entre, d'une part, l'augmentation de la stabilité structurale (MWD, ainsi que sa forme logarithmique $\ln(\text{MWD} + 1)$ qui permet d'obtenir des corrélations sensiblement plus élevées) et, d'autre part, l'augmentation de la pluie d'imbibition et la diminution du taux de ruissellement, lors de la première pluie. Pour la seconde pluie, on observe également les tendances suivantes avec l'augmentation de la stabilité structurale : augmentation de la pluie d'imbibition, diminution du taux de ruissellement, augmentation du coefficient d'infiltration stabilisé. L'ensemble de ces observations rejoint les résultats d'autres études sur sol calcaire [20] ou sur d'autres types de sol dans le midi de la France [28].

Dans le cas de cette expérimentation, l'absence de fortes corrélations pourrait s'expliquer par le fait que les variations de stabilité des agrégats entre les différentes techniques culturales restent relativement faibles en raison du caractère récent de leur mise en place (*tableau IV*).

Malgré les faibles différences de taux de carbone organique (SOC) selon les techniques culturales (*tableau IV*) qui peuvent aussi s'expliquer par le caractère récent

de l'expérimentation, il existe également des corrélations de même signe et de même ordre de grandeur que celles obtenues avec le MWD avec les variables de ruissellement. Cette observation s'explique très vraisemblablement par l'existence, pour ce type de sol, d'une relation étroite entre le taux de matière organique et la stabilité structurale [20]. En effet, dans le cas de cette expérimentation où les taux de matière organique restent inférieurs à 18 g/kg, cette relation peut être approchée par un modèle linéaire, avec $r = 0,81$ et $0,89$ pour $n = 5$ pour les relations SOC/MWD et $\text{SOC}/\ln(\text{MWD} + 1)$, respectivement.)

États de surface du sol

Outre les corrélations avec la stabilité structurale de la partie supérieure du sol, plusieurs relations apparaissent entre les variables de couverture et les variables de pertes en terre, d'une part, et entre les variables de fermeture/ouverture du sol et les variables de ruissellement, d'autre part. En premier lieu (*tableau VI, ligne 1*), de fortes corrélations inverses apparaissent pour toutes les techniques culturales confondues entre le taux de couverture du sol et les variables de pertes en terre (TURBIM 2 et MES 2). On peut assez facilement expliquer ces corrélations par l'effet protecteur de la couverture du sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie [23, 26]. Ainsi, pour ce qui concerne les techniques culturales testées, cet effet serait maximal sous paillage (plus fort taux de couverture du sol, plus faibles pertes en terre) et minimal sous surface sarclage

Tableau V. Corrélations linéaires entre i) indice/facteur de stabilité structurale du sol (MWD et carbone organique du sol) et ii) paramètres des simulations de pluies.

Stabilité structurale du sol (MWD) et facteur de stabilité (SOC)	n	Variables de ruissellement				Variables de pertes en terre		
		Première pluie		Seconde pluie		Seconde pluie		
		Pi 1	KR 1	Pi 2	KR 2	INF 2	TURBIM 2	MES 2
MWD μm (0-5 cm)	5	0,82* p = 91,1	-0,81* p = 90,3	0,49 p = 59,3	-0,71 p = 81,8	0,57 68,3	-0,31 38,3	-0,33 40,8
Lag(MWD + 1) (0-5 cm)	5	0,87* p = 94,3	-0,88 p = 94,9	0,50 p = 60,5	-0,75 p = 85,2	0,61 p = 72,8	-0,17 p = 22,1	-0,27 p = 34,2
SOC g/kg (0-5 cm)	5	0,88** p = 95,4	-0,96*** p = 99	0,46 p = 56,1	-0,76 p = 86,4	0,66 p = 77,5	0,27 p = 33,6	-0,06 p = 7,7

Les corrélations sont effectuées avec les moyennes par technique culturale des données de ruissellement et de pertes en terre. Pi 1 et Pi 2 : pluies d'inhibition durant la première et la seconde pluie ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la première et la seconde pluie ; INF 2 : infiltration à la fin de la seconde pluie ; TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de seconde pluie ; MES 2 : matière exportée en suspension lors de la seconde pluie.

dépierrée (plus faible taux de couverture du sol, plus fortes pertes en terre). Par ailleurs, en considérant toujours toutes les techniques culturales dans leur ensemble, il n'apparaît pas de corrélation significative entre le taux de couverture du sol et les variables de ruissellement, ce qui s'explique probablement par le fait que cette couverture est très différente selon les techniques culturales, et que la surface du sol peut être plus ou moins ouverte sous un même taux de couverture. En revanche (tableau VI, ligne 2), en considérant un même type d'état de surface avec des taux de couverture différents, une relation entre le taux de couverture et le ruissellement peut apparaître : en effet, en ne comparant que des surfaces sarclées, les résultats suggèrent que le taux de couverture, constituée dans ce cas uniquement de cailloux, retarde de manière significative le ruissellement (variable Pi 1) et favorise l'infiltration (variable INF 2). Cette remarque, qui est en faveur de la technique de sarclage-empierrement (SARC80), rejoint différentes études sur le rôle des cailloux à la surface du sol [16, 17, 29]. Elle suggère que les cailloux posés sur les agrégats se comportent comme un mulch qui protège ces agrégats

contre la désagrégation et maintient la porosité préalablement ouverte dans la couche superficielle. Elle permet aussi de penser que la variabilité de réponse obtenue sous sarclage simple (SARC40) par la classification hiérarchique ascendante peut être liée, en grande partie, à la variabilité naturelle de la teneur en cailloux de la surface du sol. L'effet de la fermeture de la surface du sol est mis en évidence dans les lignes 3 et 4 du tableau VI. En effet, le taux de fermeture initial du sol est étroitement corrélé au ruissellement durant la première pluie : celui-ci semble diminuer significativement la quantité d'eau nécessaire avant le déclenchement du ruissellement (corrélation négative avec la variable Pi 1) et augmenter le taux moyen de ruissellement durant cette première pluie (corrélation positive avec la variable KR 1). Ce taux de fermeture initial est peu corrélé aux variables de la seconde pluie, ce qui peut être attribué à une évolution non négligeable du taux de fermeture durant les pluies (figure 4). En revanche, le taux de fermeture final de la surface du sol s'avère particulièrement bien corrélé à toutes les variables de ruissellement.

Enfin, on doit remarquer qu'il existe une liaison entre la couverture et la fermeture du sol. En effet, l'évolution de la fermeture du sol durant la pluie est d'autant plus faible que le taux de couverture est élevé, puisqu'il existe une corrélation négative et significative à plus de 99 % entre le taux de couverture initial du sol et l'augmentation du taux de fermeture de la surface du sol durant les pluies ($r = -0,754$ pour $n = 13$ en considérant l'augmentation absolue du taux de surface fermées, $r = -0,812$ en considérant l'augmentation relative de ce taux). En définitive, si l'on considère à la fois le classement des techniques culturales que nous avons obtenu et certains facteurs explicatifs pouvant se dégager de l'étude des corrélations, il semble que dans les conditions de cette expérimentation récemment mise en place, l'état de la surface du sol (couverture et taux de fermeture/ouverture) joue un rôle prépondérant sur le ruissellement et les pertes en terre. Ainsi, i) le taux de couverture serait plus particulièrement susceptible de régir les pertes en terre par son effet protecteur contre le détachement des particules. Il interviendrait également sur la réduction du ruissel-

Tableau VI. Corrélations linéaires entre i) taux de couverture, taux de fermeture de la surface du sol et ii) variables de ruissellement et de pertes en terre.

Variables d'états de surface	Variables de ruissellement				Variables de pertes en terre		
	Première pluie		Seconde pluie		Seconde pluie		
	Pi 1	KR 1	Pi 2	KR 2	INF 2	TURBIM 2	MES 2
1. Taux de couverture (toutes situations) n = 17	0,13 ns	-0,13 ns	0,43 ns	-0,40 ns	0,40 ns	-0,77**	-0,75**
2. Taux de couverture (situations sarclées avec couverture de cailloux) n = 9	0,82**	-0,67**	0,63 ns	-0,72**	0,78**	-0,70**	-0,82**
3. Taux de fermeture initial (début de la première pluie) n = 14	-0,55**	0,66**	-0,13 ns	0,43 ns	-0,32 ns	-0,68**	-0,30 ns
4. Taux de fermeture final (fin de la seconde pluie) n = 14	-0,79**	0,79**	-0,74**	0,97***	-0,94**	-0,22 ns	0,44 ns

(corrélations significatives marquées à $p > 95\%$).

Pi 1 et Pi 2 : pluies d'inhibition durant la première et la seconde pluie ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la première et la seconde pluie ; INF 2 : infiltration à la fin de la seconde pluie ; TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de seconde pluie ; MES 2 : matière exportée en suspension lors de la seconde pluie.

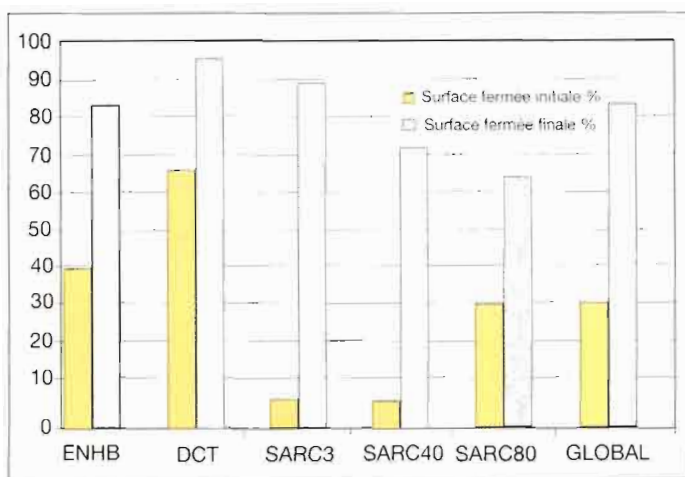


Figure 4. Évolution du taux de fermeture de la surface durant les pluies.

lement en protégeant le sol contre la fermeture de sa porosité ; ii) le taux d'ouverture/fermeture jouerait plus particulièrement un rôle sur le ruissellement par les possibilités d'infiltration qu'il induit. Il apparaît aussi, d'après ces résultats, que l'augmentation de la stabilité structurale, liée au taux de matière organique, peut déjà influencer la réduction du ruissellement sur sol sec. Bien entendu, une étude complémentaire des mécanismes mis en jeu et des relations de cause à effet pourrait permettre d'affiner ces constats.

Au vu de ces résultats, couvrir le sol et associer cette technique à un travail classique du sol, à 10-15 cm de profondeur, semble donc être une mesure efficace pour protéger le vignoble contre le ruissellement et les pertes en terre associés, ce qui rejoint les conclusions d'autres auteurs [22, 26]. À ce titre, les techniques de paillage et de sarclo-empierreage semblent plus efficaces que les techniques de désherbage chimique et de sarclo-dépierreage.

L'effet de l'enherbement reste discutable dans les conditions de notre expérimentation. D'une part, cet enherbement récent a été réalisé à l'aide de graminées qui mettent un certain temps à couvrir le sol, alors que celui-ci a été antérieurement soumis à des herbicides [8]. D'autre part, des relations significatives entre taux d'enherbement et augmentation de l'infiltrabilité ont pu être mises en évidence sous vigne [30, 31]. Enfin, il est prévisible que la stabilité structurale augmente sensiblement, sur ce type de sol, au-dessus d'un certain seuil de matière organique [20]. Il est donc possible que cet enherbement permette, à l'avenir, de réduire le ruissellement et les pertes en terre plus sensiblement que dans cet essai.

Conclusion

Cette étude montre que le paillage à 100 % et le sarclo-empierreage à 80 % des inter-rangs de vigne, peuvent réduire significativement les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne, grâce à leur rôle de protection de la surface contre la désagrégation et la fermeture de la porosité du sol. En revanche, les techniques les moins efficaces s'avèrent être le sarclo-dépierreage et le désherbage chimique, ce dernier étant la technique la plus utilisée actuellement. L'enherbement permettrait de réduire rapidement les pertes en terre, mais des observations complémentaires seraient nécessaires pour évaluer son comportement vis-à-vis du ruissellement en expérimentant sur une plus longue durée l'effet de différentes espèces végétales et de différents modes de préparation du sol [32].

Plus généralement, les résultats obtenus soulignent aussi la nécessité d'effectuer un suivi à plus long terme du dispositif expérimental pour quantifier l'impact des techniques culturales testées sur les propriétés du sol (stabilité structurale et stock organique notamment), lesquelles peuvent modifier le comportement de ces techniques vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre. En outre, les pluies simulées ont été effectuées trois mois après l'installation des techniques culturales, ce qui avantage manifestement les techniques de couverture comme le paillage et le sarclo-empierreage alors qu'on n'appréhende pas la dégradation probable de leurs propriétés de protection du sol avec le temps.

Enfin, il apparaît nécessaire d'effectuer une enquête sur l'acceptabilité pratique des techniques culturales les plus efficaces, et en particulier des techniques de paillage et de sarclo-empierreage, en terme de coût

et de pénibilité du travail pour les viticulteurs.

Références

- Schwing JF. Les manifestations graves et les événements catastrophiques d'érosion des sols dans le vignoble alsacien. *Recherches Géographiques à Strasbourg* 1978 ; 9 : 29-46.
- Mesmer T. Soil erosion measurements on experimental plots in Alsace vineyards (France). In : De Boodt M, Gabriels G, eds. *Assesment of Erosion* Chichester (Great Britain) : John Wiley, 1980 : 455-62.
- Ballif JL. Erosion dans le vignoble champenois. Influence des techniques culturales. *Cah Orstom Sér Pédol* 1989 ; 25 : 151-6.
- Lelong F, Roose E, Darthout R, Trevisan D. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluie simulée. *Science du Sol* 1993 ; 31 : 251-79.
- Poesen JW, Hooke JM. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 1997 ; 21 : 157-99.
- Davy L. Une catastrophe naturelle : l'averse nîmoise du 3 octobre 1988 et ses conséquences hydrologiques. *Hydrologie Continentale (FRA)* 1989 ; 4 : 75-92.
- Maillo L. Influence des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion sur les coteaux viticoles du Bas-Vivarais (Ardèche). Thèse de doctorat de géographie. Grenoble : Université Joseph Fourier, 1989 ; 173 p. + annexes.
- Léonard M. L'érosion hydrique des sols cultivés : Analyse systématique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale. Thèse de doctorat de géographie. Grenoble : Université Joseph Fourier, 2003 ; 545 p. + annexes.
- Guibourdenche H. L'évolution récente de la viticulture ardéchoise. *Revue du Vivarais* 2001 ; n° spécial : 137-74.
- Bozon P. *L'Ardèche : la terre et les hommes du Vivarais*. Coll. Les hommes et les lettres. Lyon : Hermès, 1978 ; 249 p.
- Météo-France. *Variabilité des précipitations en Ardèche, analyse factorielle en composantes principales*. Aubenas : Comité Météorologique Départemental, Conseil Général de l'Ardèche, 1993 ; 36 p.
- Litzler C. *Maîtrise de l'érosion en vignoble de coteaux. Aspects agronomiques*. Mâcon : Ministère de l'Environnement et de l'Agriculture ; Institut technique de la vigne et du vin (ITVV) ; Chambre d'agriculture, Saône et Loire, 1988 : 54 p.
- Nachtergaele J, Poesen J, Van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil & Tillage Research* 1998 ; 46 : 51-9.
- Asseline J, Valentin C. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1978 ; 15 : 321-49.
- Roose E. Méthodes d'estimation des états de surface en relation avec le ruissellement et l'érosion en nappe. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 87-97.
- Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mûcher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as

affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes And Landforms* 1990 ; 15 : 653-71.

17. Poesen J, Torri D, Bunte K. Effect of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale : a review. *Catena* 1994 ; 23 : 141-66.

18. Le Bissonais Y, Le Souder C. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols* 1995 ; 2 : 43-56.

19. Le Bissonais Y. Aggregate stability and assessment of crustability : 1. theory and methodology. *European J Soil Sci* 1996 ; 47 : 425-37.

20. De Noni G, Blavet D, Laurent JY, Le Bissonais Y, Asseline J. Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution. « Confronting new realities in the 21st century », 17th World Congress of Soil Science, August 2002 Symposium 05. Bangkok, 2002, Paper 1783, 13 p.

21. Yoder RE. a direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J Am Soc Agronomy* 1936 ; 28 : 337-51.

22. Gril JJ. L'érosion dans le vignoble du Beaujolais : étude comparative des techniques culturales sur la commune de Pammiers. *Cemagref* 1984 ; 317 : 47-52.

23. Arshad MA, Asseline J, Blavet D, De Noni G, Laurent JY, Leprun JC. Soil properties as affected by different land use practices in the Languedoc region of southern France. In : Bech J, ed. *Sixth international meeting on soils with Mediterranean type of climate*. Barcelone : Université de Barcelone, 1999 : 618-21.

24. Boiffin J. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de doctorat ingénieur. Paris : Ina-Paris-Grignon, 1984 ; 320 p. + annexes.

25. Roose E. *Érosion et ruissellement en Afrique de l'ouest : Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Coll. Travaux et documents n°78. Paris : Orstom éditions, 1977 ; 108 p.

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

27. Roose E, Cavalié F. *New strategy of water management and soil conservation : application in deve-*

loped and developping countries. ISCO V Land conservation for future generation, Bangkok, 1988 : 913-23.

28. Barthès B, Albrecht A, Asseline J, De Noni G, Roose E, Viennot M. Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Comarès (Aveyron). *Etude et Gestion des sols* 1998 ; 5 : 157-70.

29. Poesen J, Lavee H. Rock fragments in topsoils : significance and processes. *Catena* 1994 ; 23 : 1-28.

30. Viguier JM. *Mesure et modélisation de l'érosion pluviale. Application au vignoble de Vidauban (Var)*. Thèse de doctorat. Grenoble : Université Joseph Fourier, 1993 ; 335 p.

31. Andrieux P, Léonard J. Variabilité spatiale de l'infiltrabilité sur parcelles de vigne en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 276-9.

32. De Noni G, Viennot M, Asseline J, Trujillo G. *Terres d'altitude, terres de risque : la lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes*. Coll. Latitudes n° 23. Paris : IRD, 2001 ; 219 p.

Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives

Éric Roose
Georges De Noni

Institut de recherche pour le développement (IRD),
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France
<roose@mpl.ird.fr>
<denoni@mpl.ird.fr>

Résumé

Les problèmes posés par l'érosion sont connus depuis plusieurs siècles, dans le bassin méditerranéen en particulier, mais les recherches ne se sont développées que depuis 50 ans en Afrique. Elles concernent avant tout l'érosion en nappe et rigoles qui décape l'horizon humifère en une génération. Or l'Afrique a connu une croissance impressionnante de la population ce dernier siècle (celle-ci a été multipliée par 5 en 100 ans) et aussi des besoins en biens de consommation : d'où l'accélération de l'érosion et de la dégradation des terres et l'importance des recherches sur la protection et la restauration de la productivité des terres. L'analyse des résultats à l'aide de l'équation USLE (*Universal Soil Loss Equation*), a permis de constater que les pluies tropicales sont très agressives, que les sols tropicaux sont heureusement assez stables et assez résistants à la battance, que la gestion du couvert végétal (et minéral) est très efficace, que le facteur topographique est beaucoup plus complexe que prévu et que les techniques culturales antiérosives sont peu efficaces sur des pentes de plus de 20 %. En montagne, le ravinement et les différentes formes de mouvements de masse, rapides ou lents, sont beaucoup plus importants que l'érosion en nappe mais ils sont peu étudiés. La spatialisation des mesures localisées pose encore des problèmes que l'on tend à résoudre par l'usage d'indicateurs (états de surface, stabilité structurale, radio-isotopes) combinés à des systèmes d'information géographique (SIG). Les techniques de mesures évoluent vers des techniques soit très sophistiquées (mais coûteuses) soit au contraire très simples, permettant de nombreuses estimations dans l'espace et le temps. Enfin, la lutte antiérosive (LAE), longtemps fondée sur des grands travaux de terrassement, coûteux et peu efficaces, évolue vers des approches participatives reposant sur l'adaptation des systèmes de culture et la mise au point de techniques biologiques combinées avec des compléments de fertilisation pour mieux valoriser la terre et le travail.

Mots clés : Érosion hydrique ; Recherche ; Afrique.

Summary

The Research on water erosion in Africa. Review and perspectives

An all-time problem the world over, erosion and its control has been studied and documented for centuries, especially around the Mediterranean, but as far as Africa is concerned, research started developing but about 50 years ago, dealing mainly with sheet and rill erosion which scoured the humiferous topsoil in the span of a generation. Africa has had an impressive population growth rate (its population has increased fivefold over the last hundred years); meanwhile, the needs for food, medicines, consumable goods, etc. increased accordingly, thereby accelerating soil degradation through erosion and, in turn, the urgent need for research on soil protection, water and nutrients management, soil productivity restoration, etc. More than 1,000 data on sheet erosion from runoff plots in various ecological conditions are now being collected yearly. The analysis of this data using the USLE (Universal Soil Loss Equation), showed that tropical rains are very aggressive, ten times more so in fact than temperate rains. Fortunately, however, it appears that most tropical soils are rather resistant to drop energy (though not necessarily to runoff energy) and biomass control is quite efficient to reduce water, nutrients, and erosion losses.



Topographical factors are much more complex than previously suspected: topographical positions being sometimes more important than slope steepness. Slope length becomes important when runoff is collected in rills and gullies, but in the case of sheet runoff rainfall energy is dispersed on the topsoil roughness. Line ploughing and ridging is useful on smooth slopes only but not on slopes exceeding 20%. There are numerous interactions between a number of factors that are not accounted for in either the USLE or others models. In mountainous steep lands, gullies and landslides, or tillage erosion are much more important than sheet erosion, but they are less studied and more difficult to control. The spatialisation of locally accurate measurements is difficult to extend to large watersheds and the trend is now to resort to indicators such as surface features, aggregate stability, or radioisotopes like Cesium 137) and combine them into a GIS. Measurements techniques are evolving towards either more sophisticated systems (smart but most of the time very costly) or very simple tools allowing measurements to be repeated very often (erosion typology, land uses, surface features). Finally, erosion control (SWC), formerly based on earthworks and embankments, which have proved to be very expensive, time-consuming and rather poorly efficient, is now turning over to participative approaches based on the adaptation of farming systems and the development of biological or cultural practices combined with complementary fertilisation with a view to best use both soil and labour.

Key words: Water Erosion; Research; Africa.

Les premiers explorateurs qui débarquèrent en Afrique tropicale, en voyant l'abondance de la végétation sous forêt, pensèrent que les sols devaient y être particulièrement riches. Mais ils déchantèrent rapidement, car une fois la terre défrichée, les rendements des cultures baissèrent en quelques années. Dans son livre *Afrique, terre qui meurt*, Harroy [1] avait déjà décrit les deux causes de la dégradation rapide de la fertilité des sols africains : la minéralisation rapide de l'humus sous les climats chauds et humides et l'érosion des sols dénudés soumis aux pluies diluviennes. L'érosion a donc été observée très tôt, mais les recherches ne commencèrent vraiment que vers les années 1950.

Depuis lors, les travaux sur l'érosion en Afrique ont fleuri abondamment à mesure que la mise en valeur mécanisée de ces terres fragiles soumises aux orages tropicaux a développé des phénomènes spectaculaires d'érosion. Aussi est-il impossible de citer tous les chercheurs (plus de 500 rien que dans le Réseau Érosion et à l'*International Soil Conservation Organization*, ISCO) qui ont exploré les divers thèmes liés à des processus d'érosion très variables en fonction de la diversité des écosystèmes, des climats, du relief, des cultures et de la densité des populations. Cette tentative de synthèse ne peut être exhaustive : elle s'attachera dès lors à souligner l'évolution historique des recherches effectuées par les principales équipes au Maghreb, en Afrique occidentale, en Afrique centrale et à Madagascar, les principaux résultats et quelques orientations pour l'avenir.

La période coloniale (1940-1960) : phase d'exploration des risques

Dans l'ancien Congo belge, les agronomes de l'Institut national d'études agronomiques du Congo (INEAC) avaient déjà constaté les effets dégradants des techniques culturales laissant les sols dénudés : ils avaient développé des plantes de couverture associées à des cultures pérennes, des rotations et des systèmes de cultures en couloir entre des haies vives. De façon plus globale, ces problèmes donnèrent lieu à une politique de mise en réserve de larges zones protégées et à la création de parcs nationaux [1].

En Afrique francophone, sous l'impulsion de Fournier [2], s'est mis en place un réseau de parcelles d'érosion dans une dizaine de pays francophones pour quantifier les dangers de ruissellement et d'érosion sous les divers systèmes de culture régionaux [3-5]. À Madagascar, Tricart [6] a distingué l'érosion naturelle de l'érosion accélérée par la gestion maladroite des ressources en sol par une population croissante ; il a souligné le caractère non linéaire des processus d'érosion. D'autres géographes physiciens ont étudié l'érosion en Afrique : Rougerie en Côte d'Ivoire, Sautter au Congo, Michel au Sénégal [7-9]. Pour leur part, les chercheurs du Centre technique forestier tropical (CTFT) ont comparé les risques d'érosion sous divers couverts naturels ou cultivés à Madagascar, au Niger et au Burkina [10]. En Rhodésie (Zimbabwe), Hudson [11, 12] a développé une série impressionnante de dispositifs de mesure de l'érosion sous pluies naturelles ou simulées, à la fois

pour démontrer l'importance de l'énergie des pluies, mais aussi du couvert végétal, de la pente, des sols et du mode de gestion. En prouvant que si le sol est bien couvert on peut réduire l'érosion par cent et le ruissellement par dix, il a montré que l'intensification de l'agriculture n'entraîne pas forcément l'accélération de la dégradation des sols. Parti de l'héritage de Bennet sur la lutte antiérosive mécanique (terrasses), Hudson s'est finalement orienté vers une approche plus biologique de la gestion durable de l'eau et des sols [13].

Recherche de données pour valider des modèles

Après une phase de description des processus, commence une période de quantification de l'érosion à diverses échelles, de la parcelle d'une centaine de m² à des micro-bassins de quelques hectares et à de grands bassins-versants de milliers de km².

Érosion en nappe

Un réseau de parcelles de tailles et de modes d'exploitation standardisés a été mis en place en Afrique pour estimer les paramètres des modèles empiriques disponibles [14-24]. Parmi ceux-ci, le modèle USLE (*Universal Soil Loss Equation*) de Wischmeier et Smith est le plus largement utilisé : l'érosion est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies que multiplie la résistance du milieu (érodibilité, facteur topographique, couvert végétal et pratiques culturales, pratiques antiérosives) [25].

Pour accélérer l'étude des facteurs du ruissellement et de l'érosion dans les grands espaces africains, une série de simulateurs de pluies ont été développés. Dumas, Cormary et Masson [26, 27] ont tenté de quantifier les paramètres de l'USLE en Tunisie. Kalman [28] a étudié le facteur climatique modifiant l'érosion en nappe et rigoles sur les principaux sols cultivés du Maroc. Ensuite, une douzaine de pédologues et hydrologues Orstom ont consacré leurs travaux à l'étude du ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées : influence des sols et des techniques culturales en Afrique de l'Ouest [29-33].

- Érosivité des pluies ($r = 50$ à $> 1\ 000$)

Très vite, il fut admis que l'érosion en nappe dépend de la hauteur, de l'intensité, de l'énergie cinétique et de la répartition des pluies : divers indices d'agressivité des pluies furent proposés, plus ou moins adaptés localement :

- indice d'érosivité de Hudson : $KE > 25$ mm/h. Il ne tient compte que de l'énergie des pluies intenses de plus de 25 mm/h, seuil d'intensité au-delà duquel se déclenche le ruissellement sur les Oxisols très stables de Rhodésie. Sur cette base, Stocking et Elwell [19] établirent une carte d'agressivité climatique de Rhodésie ;

- indice d'érosivité des pluies de Wischmeier : $R = E \cdot I_{30}$, qui tient compte du produit de l'énergie cinétique par l'intensité maximale pendant 30 minutes, ce qui est en relation étroite avec le volume du ruissellement ;

- en calculant cet indice sur une vingtaine de postes météo sur plus de dix années, Roose [14, 29] a constaté qu'en Afrique occidentale, l'indice d'érosivité de Wischmeier annuel moyen (Ram en unités américaines) est lié directement à la pluviosité annuelle moyenne (Ham en mm) de cette région : $Ram = Ham \times a$ où « a » s'établit à 0,50 en plaine, à 0,60 près de l'océan, à 0,25-0,30 en montagne tropicale (Cameroun et Rwanda-Burundi) et à 0,10 en montagne algérienne. Contrairement à l'opinion générale, les pluies tropicales sont nettement plus agressives que celles qui tombent en montagne, autour du Bassin méditerranéen et en régions tempérées. En région tropicale, l'agressivité des pluies varie de 100 à 200 au Sahel, de 400 à 600 en savane et atteint plus de 1 000 en zone de forêts équatoriales ; en milieu tropical humide, l'agressivité des pluies est 10 à 20 fois supérieure à celle des régions tempérées [25] ;

- Lal, au Nigeria, a trouvé de meilleures corrélations entre l'érosion et l'indice d'érosivité des pluies en tenant compte de l'intensité en 7 minutes et de l'énergie apportée par le vent. Cependant, il est rare de disposer de ces informations [18].

- Érodibilité des sols (facteur $K = 0,40$ à $0,01$)

Contrairement à l'opinion générale, les sols tropicaux sont souvent moins fragiles que les sols tempérés : si on observe tant d'érosion en Afrique, c'est surtout à cause des pluies très agressives [14]. L'érodibilité des sols n'est pas homogène dans l'espace et elle évolue dans le temps : elle augmente au cours de la saison des pluies et varie en fonction des caractéristiques des sols, de l'âge du défrichement et des techniques culturales [15]. La première année après défrichement, les sols sont généralement très stables ($K < 0,1$), mais ensuite l'érodibilité varie en fonction de la minéralisation des matières organiques et des remontées d'éléments provenant du sous-sol, plus riche en argile, en $CaCO_3$, en cailloux et en hydroxydes de fer et d'alumine libres.

Bien que les classifications pédologiques ne reposent pas sur les facteurs de l'érodibilité des sols, on remarque certaines constantes :

- les sols ferrallitiques sont généralement assez résistants : K varie de 0,01 à 0,20, si on passe de roches à altérites argileuses (basaltes) à des roches à altérites argilo-sableuses (granites) ou à un schiste libérant des limons ;

- les sols ferrugineux tropicaux sont plus fragiles après deux années de culture ($K = 0,20$ à $0,30$) ;

- les sols gravillonnaires et lithosols sont très résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,01$ à $0,04$) ;

- les Vertisols calciques sont très résistants ($K = 0,001$ à $0,01$), alors que les Vertisols sodiques seraient très fragiles ($K > 0,40$) ;

- les sols bruns calcaires méditerranéens sont d'autant plus résistants qu'ils ont une charge importante en cailloux et des fortes teneurs en argile saturée en calcium ($K = 0,10$ à $0,01$) ;

- les sols rouges fersiallitiques méditerranéens lessivés sont généralement assez fragiles ($K = 0,20$).

L'amélioration de la résistance d'un sol à l'érosion pluviale est difficile car l'augmentation de 1 % du taux de matière organique (MO) du sol exige beaucoup d'apports organiques pour compenser la minéralisation rapide en milieu chaud et ne réduit que de 15 % les risques d'érosion sur des sols sablo-argileux. L'épierreage des champs augmente leur sensibilité à la battance et au ravinement ; en revanche, l'épandage des cailloux en surface permet de maintenir une bonne infiltration [34]. Un compromis acceptable par les paysans consiste à garder sur place les petites pierres pour protéger les sols de la battance et à rassembler les grosses pierres (qui gênent le labour et le semis) sur des lignes de défense (cordons de pierres)

pour ralentir le ruissellement et réduire la pente. Le défonçage profond peut améliorer l'infiltration sur un sol encroûté (calcaire ou ferrugineux), mais n'a qu'une influence passagère sur les sols instables.

- Couvert végétal (facteur $C = 1$ à $0,001$)

Par rapport à une parcelle nue, le couvert des principales cultures d'Afrique réduit l'érosion de 20 à 60 %, en fonction de l'intensité du couvert et des techniques culturales : le facteur C diminue jusqu'à 0,01 sous cultures pérennes avec plantes de couverture ou prairie et à 0,001 sous forêt et cultures paillées. Le couvert végétal est donc le paramètre le plus important à notre disposition pour réduire les risques d'érosion : la lutte antiérosive biologique va donc proposer de planter tôt, à forte densité, des cultures associées ou se succédant dans le temps, de façon à absorber le plus complètement possible l'énergie cinétique des pluies et du ruissellement [14, 25].

Hudson a montré qu'une simple toile moustiquaire tendue à 15 cm du sol est aussi efficace qu'une pelouse pour réduire l'érosion d'au moins 99 % et le ruissellement sur sol nu de 90 % : le taux de couverture par la canopée basse semble donc plus important que le type de végétal et même que l'enracinement (efficace contre le ravinement). Hudson a encore montré qu'en doublant la densité du maïs, on réduit par trois la perte en terre par kg de maïs produit : l'intensification des cultures peut donc réduire les risques d'érosion [11]. Elwell et Stocking ont ensuite développé un indice de couvert végétal : en Rhodésie, tant que la culture ne laisse pas plus de 30 % du sol dénudé, il ne se développe pas d'érosion dangereuse, bien que le ruissellement reste important [20].

Au Maroc, Laouina [35] a observé que lorsque le sol est couvert de matorral dense, d'herbes rases, de cystes ou de rocaille, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an, mais que dès que le sol est labouré pour une culture sarclée, l'érosion peut s'élever à plus de 20 t/ha/an sur des pentes de 20 % en année à fortes pluies. Sur jachère, les sédiments sont souvent piégés dans les touffes d'herbes, mais le ruissellement est abondant entre les touffes. La différence entre la forêt naturelle et les zones de parcours réside surtout dans le ruissellement abondant là où les sabots du bétail ont tassé la surface du sol : le pâturage excessif entraîne souvent le ravinement des zones en aval [36].

- Topographie (facteur $SL = 0,1$ à 20)

Dans le modèle USLE, n'interviennent que l'inclinaison de la pente (entre 2 et 25 %) et secondairement la longueur de pente ($L^{0,5}$). Or il existe de multiples interactions entre l'influence de la pente, la forme

concave ou convexe, l'état de la surface du sol et la position topographique : c'est donc un paramètre qui pose des problèmes.

D'abord, il est apparu que le ruissellement sur les pentes de plus de 2 % diminue sur des sols ferrallitiques [11, 14, 16] alors qu'en général l'érosion augmente de façon exponentielle sur des parcelles mal couvertes. Sur sol paillé, en revanche, l'énergie des pluies et celle du ruissellement sont dissipées par le frottement avec les résidus : les pertes en terre restent donc très modestes, même sur fortes pentes [25]. En Algérie, non seulement le ruissellement, mais aussi l'érosion, ne croissent pas systématiquement avec la pente [37]. Dans les collines du Rwanda et Burundi, il semble que le ruissellement est modéré et que les pertes en terre se stabilisent au-dessus de 25 % de pente ; au-delà, les sols sont moins épais, plus argileux ou caillouteux et les processus en cause changent : de l'érosion en nappe, on passe aux rigoles et à des mouvements lents de la couche superficielle du sol (*creeping*) [38-40].

L'effet de la longueur de pente n'est pas évident non plus : seules les parcelles soumises à l'érosion linéaire (rigoles) perdent d'autant plus de terre qu'elles sont plus longues et donc plus grandes. Mais, dans le cas du ruissellement en nappe dont l'énergie est dissipée par la présence d'une litière ou par la rugosité du sol, l'influence de la longueur de pente devient négligeable [25]. Sur les glacis sablonneux du Nord-Cameroun, l'augmentation de la longueur (de 20 à 60 m) et de la surface des parcelles (100 à 1 000 m²) sur un versant de 2 % n'a augmenté ni le ruissellement, ni l'érosion [41].

En revanche, on a observé que la position topographique est parfois plus importante que la pente elle-même. Un cas a été signalé par Heusch [16] sur une colline marneuse du Maroc où les eaux s'infiltrèrent sur les versants par les fissures des Vertisols, se concentrent en bas de pente et créent des ravines remontantes. De même, en Côte d'Ivoire, Valentin *et al.* [42] ont montré que les sommets des collines sont couverts de sols ferrallitiques gravillonnaires rouges très stables, tandis que sur les versants ferrugineux tropicaux plus fragiles naissent des ravines discontinues, et que dans les bas-fonds hydromorphes se développent de grosses ravines remontantes.

Pour lutter contre l'érosion, on connaît les multiples formes de terrasses, cordons de pierres, haies vives qui modifient à la fois l'inclinaison et la longueur de pente. L'expérience montre que ces systèmes sont coûteux en travail à l'installation mais aussi à l'entretien. De plus, une fois ces structures en place, il faut encore faire

l'essentiel, c'est-à-dire fertiliser et aménager l'espace entre ces structures spectaculaires souvent indispensables, mais insuffisantes pour gérer efficacement les eaux des versants [25, 43].

- Techniques antiérosives (facteur P = 1 à 0,1)

L'influence des techniques culturales n'est pas négligeable sur les longs glacis de pentes inférieures à 3 % : le labour et surtout le billonnage cloisonné en courbes de niveau améliorent le stock d'eau du sol et les rendements des cultures. Mais, en montagne, sur des pentes de 25 à plus de 60 %, le ruissellement diminue tandis que les pertes en terre augmentent : on passe d'une érosion en nappe et rigoles à une érosion linéaire, voire au *creeping*. La même tendance a été observée en Équateur et en Martinique [44].

Sur les sols sableux des zones soudanohéliennes, Charreau et Nicou [45, 46] ont montré que le labour permet un meilleur enracinement et, temporairement, une meilleure infiltration. Par ailleurs, Lal [18], dans une zone plus humide du Nigeria a noté qu'à la longue, le labour détruit l'agrégation de sols ferrallitiques, tandis que le semis direct sous litière permet une production plus durable, avec moins d'érosion et des activités biologiques (vers de terre) améliorant l'infiltration et l'agrégation.

Boli *et al.* [23] au Nord-Cameroun et Diallo [24] au Sud-Mali dans une zone soudanienne, sur des sols ferrugineux sableux à argilo-sableux, ont observé sur le semis direct dédié à une rotation coton/maïs intensive, une réduction notable de l'érosion (y compris de la charge en suspension) et du ruissellement. Mais au bout de cinq ans, le taux de matière organique du sol sur 10 cm était toujours aussi faible. En revanche, deux années de jachère arbustive (*Cassia siamea* mélangé à *Andropogon*) a permis d'augmenter l'activité des vers de terre, de réduire le ruissellement et l'érosion et de doubler le taux de carbone du sol [47].

Au total, plus de mille résultats annuels de parcelles d'érosion ont été obtenus en Afrique, mais les données sont si dispersées qu'il est difficile de les utiliser pour tester la validité des modèles.

On ne peut conclure cette revue des informations disponibles sans rappeler les limites du modèle empirique USLE qui ne s'applique qu'à l'érosion en nappe, 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.

Bien qu'il ait été souvent utilisé hors de son domaine, si l'on dispose d'un minimum de mesures représentatives de la région, on peut caler des paramètres adaptés localement pour évaluer les pertes en terre au niveau des champs, mais non au niveau des bassins-versants.

D'autres modèles empiriques ont été proposés, qu'il s'agisse de RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) où on a tenté d'affiner les paramètres pour les principaux sols et couverts végétaux du Maroc, de MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) où l'énergie des pluies a été remplacée par celle du ruissellement, ou de SLEMSA (*Soil Loss Equation for Southern Africa*) pour l'Afrique du Sud où les interactions sont regroupées différemment [17, 20, 48].

Ravinement

Les recherches pour quantifier 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 [42].

Signalons les études de Stocking [49] sur la vitesse d'avancement des ravines au Zimbabwe sur des alluvions salées très fragiles. Il constate que, quel que soit le type de ravine observé, l'érosion dépend du volume des pluies (P en mm), de la surface du bassin (S en km²) et de la hauteur de chute en tête de ravine (H en m). L'équation s'écrit :

$$\text{Érosion en ravine} = 6,87 \times 10^{-3} P^{1,34} \times S \times H^{0,52}$$

En Algérie, le volume en creux d'un réseau de ravines a été suivi pendant trois ans : le transport solide varie de 90 à 300 t/ha/an en fonction du sol et du substrat, de la pente et de la distance au réseau de drainage, des pluies et de leur répartition en fonction de l'humidité du sol [25, 50, 51]. En zone méditerranéenne, le ravinement commence généralement à une certaine distance du sommet de la colline, dans les concavités du versant où les rigoles réunissent suffisamment de ruissellement. Cependant, beaucoup de ravines commencent à mi-pente, à l'endroit où le ruissellement hypodermique débouche à l'extérieur du sol, ou même en bas de pente du fait du creusement du réseau de drainage : par effet de chute, les têtes de ravine remontent ensuite la pente en profitant des chenaux souterrains de drainage et/ou de la dissolution du gypse ou autres sels solubles inclus dans la roche [52].

L'importance des divers processus d'érosion varie beaucoup dans les principaux

Tableau 1. Importance de divers processus d'érosion (t/ha/an) en fonction de trois paysages en Afrique [57].

Paysages	Pente	Érosion en nappe	Érosion aratoire	Érosion en ravine
Basses montagnes méditerranéennes	10 à 40 %	0,1 à 20	10 à 50	90 à 300
Longs glacis soudano-sahéliens	1 à 3 %	0,1 à 35	2 à 5	20 à 100
Collines convexes tropicales humides	4 à 30 %	0,1 à 700	10 à 50	100 à 500

paysages d'Afrique. Elle dépend de la répartition de l'énergie des pluies au cours de l'année agricole, du type de pente, de la résistance des sols à la battance et au cisaillement par le ruissellement, de la cohésion du sol et des roches.

En zone méditerranéenne, l'érosion en nappe est modeste, quelle que soit la pente, vu la stabilité des sols, le taux de cailloux et celui d'argile saturée en calcium [37]. Au Maroc, il a été démontré sur divers petits bassins que l'érosion en ravine est beaucoup plus active que l'érosion en nappe [16, 53, 54]. En Tunisie, Collinet et Zante [52] ont montré l'importance du ruissellement hypodermique (*piping*) sur le ravinement des marnes gypseuses.

Dans la zone soudano-sahélienne (tableau 1), les pentes sont douces, mais les sols encroûtés, d'où une érosion en nappe peu agressive. Le ravinement est en revanche très actif, même sur des pentes de 1 %, car les versants des glacis sont très longs et le ruissellement très abondant. Enfin, dans les collines en demi-orange des régions tropicales humides, l'érosion en nappe peut atteindre 700 t/ha/an sur le bas des versants convexes, mais elle n'augmente plus guère avec la pente. Le ravinement peut être très mordant après dénudation du sol (urbanisation, piste à bétail) [38, 55].

En zone tropicale semi-aride de Tanzanie, Rapp *et al.* [56] ont montré l'importance des orages exceptionnels pour le développement des ravines, alors qu'elles progressent peu en temps ordinaire.

Cartographie et effets d'échelle

Si les méthodes expérimentales et paramétriques décrites antérieurement, permettent de mesurer l'intensité des processus d'érosion, seule la cartographie fournit des indications sur l'ampleur spatiale des phénomènes. L'apport de la cartographie dans l'étude de l'érosion s'est concrétisé par l'utilisation de trois types principaux de cartographie : i) la cartographie à grande échelle (de 1/50 000 à 1/200 000) ; ii) la cartographie à petite échelle (de 1/500 000 à 1/10 000 000) ; et iii) l'utilisation des SIG et des indicateurs, sans échelles vraiment déterminées. A chaque type correspond une période bien définie.

- *La première période* couvre l'époque coloniale jusqu'au milieu des années 1970. 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 [58], 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 [59-65].

Sur ces cartes, sont figurées les unités morpho-pédologiques et des informations complémentaires où l'on retrouve systématiquement des indications sur les manifestations principales de l'érosion. En outre, lorsque ces cartes servent à leur tour de support pour élaborer des cartes d'aptitude des terres, apparaissent de nouvelles informations relatives à l'érosion. Dans ce cas, la légende indique les potentialités érosives ou les risques d'extension des processus d'érosion qui sont fonction à la fois de la vulnérabilité des sols à l'érosion au moment de la cartographie et des pressions à venir, le plus souvent d'origine anthropique, modifiant la vulnérabilité de départ.

- *La deuxième période* débute dans les années 1975-1980 et 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 (PNUE). 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*) [66]. En 1990, la carte de l'état actuel de dégradation dans le monde fut terminée, à l'échelle de 1/10 000 000. Une superficie de l'ordre de 19,6 millions de km² (soit 16 % des terres exploitables dans le monde) est touchée par des phénomènes de dégradation. L'érosion par l'eau est le phénomène le plus répandu (55 % des terres dégradées), suivie de l'érosion par le vent (28 %), la dégradation chimique par perte de nutriments (7 %), la salinisation (4 %) et la dégradation physique (3 %). Rappelons cependant, que Fournier, en pionnier, avait ouvert cette voie vingt ans plus tôt, en 1960, en réalisant une carte mondiale des dangers d'érosion fondée sur des indices climatiques et topographiques à l'échelle des grands bassins-versants [67].

Pour élaborer de tels documents à l'échelle mondiale, lorsque les données de base n'existent pas, ce qui est très souvent le cas en Afrique, le recours à la télédétection est impératif pour combler les manques. Cet outil a donc été très largement utilisé à cette époque et testé pour identifier les manifestations de l'érosion. Néanmoins, malgré les avantages incontestables apportés par cette technique, cette dernière n'a pu résoudre que partiellement les problèmes majeurs et il subsiste toujours des contraintes essentielles fortes pour les pays tropicaux : i) cette technique est coûteuse et nécessite du personnel très qualifié ; ii) si la qualité du point de résolution, ou pixel, s'est considérablement améliorée, l'échelle reste néanmoins encore insuffisante pour pouvoir apprécier l'érosion à l'échelle du bassin-versant, de sorte que les observations locales des processus d'érosion, et les mesures qui en dérivent, continuent de poser des problèmes d'échelles impossibles à identifier sur les images : entre les parcelles des sommets de pentes, les ravines des versants, le transport solide des fleuves, on peut imaginer toute une série de piègeages, colluvionnements et alluvionnements, mais aussi ravinement et érosion remontante selon la position topographique [42] ; et iii) la couverture végétale dense en Afrique humide constitue un écran naturel qui empêche l'interprétation correcte des images.

D'ailleurs face à ces contraintes difficiles à éliminer pour la télédétection, se développent des techniques de télédétection rapprochée qui permettent de capter des images de haute résolution et d'échelle décimétrique. L'Institut de recherche pour le développement (IRD) a conçu un drone [68] qui sert de relais entre l'image satellitaire et le terrain.

- *La troisième période* est marquée par l'introduction du concept d'indicateurs

dans les méthodes de suivi de l'érosion. À partir des années 1990, 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* [69-71]. La notion d'indicateur sera très utilisée jusqu'à présent. Pour les indicateurs spatialisables, le succès est amplifié par le développement, en parallèle, des systèmes d'information géographique (SIG). Ces derniers constituent, en effet, des outils puissants et pertinents pour stocker, croiser et comparer les indicateurs, ainsi que pour calculer leurs superficies d'application respectives [72]. Certains, comme Le Landais et Fabre [73], ont appliqué avec succès le modèle USLE dans un SIG afin d'identifier les zones les plus fragiles qui menacent d'envasement le barrage du bassin du Ouergha au Maroc. D'autres ont utilisé cet outil afin de relier les risques de ruissellement et d'érosion avec des indicateurs tels que les constituants du sol et les états de surface [74, 75]. Enfin, un petit groupe s'est intéressé aux possibilités offertes par le Césium 137 qui s'est réparti au hasard sur les paysages, il y a 30 ans, à la suite des essais nucléaires dans l'atmosphère. L'étude du Césium radioactif dans les sols permet ainsi d'évaluer les pertes et les gains de sédiments marqués dans les diverses zones d'un bassin-versant [76]. Cette évaluation est réalisée et validée sur place, en espérant que le Césium 137 a été réparti de façon homogène, quels que soient le couvert végétal et la topographie, ce qui pose un problème de méthode non résolu pour l'instant.

Pour sa part, Brabant [77] a exploité plus à fond encore les avantages offerts par les SIG et la méthode des indicateurs, jusqu'à introduire le concept d'indice d'état qui permet de combiner entre eux différents indicateurs. Par exemple, pour évaluer l'état d'érosion, sont suggérés 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 pour former un indice synthétique permettant de qualifier l'état érodé du site étudié.

Cette évolution récente étant rappelée, ne perdons pas de vue que le recours aux SIG et aux indicateurs nécessite la numérisation de toutes les données cartographiques disponibles, notamment des cartes topographiques qui servent de support au repérage géographique dans cette base. Ce type d'outil ne semble pas encore bien adapté à tous les pays africains car le travail de numérisation est long et coûteux et la couverture cartographique reste très incomplète.

Érosion, pertes de nutriments et séquestration du carbone

L'érosion n'est pas seulement considérée pour le décapage des profils pédologique, ou le transport de sédiments, mais aussi pour la perte d'eau et de nutriments qu'elle entraîne. Très rapidement, on a remarqué que l'érodibilité des sols est en relation avec le taux de MO des horizons superficiels des sols : plus le sol est riche en humus et en argile, mieux il est structuré, plus ses agrégats sont résistants à la battance des pluies, et plus le taux d'infiltration est élevé et stable [78-80].

Par ailleurs, on a observé que les sédiments qui sortent des parcelles érodées sont plus riches en argile et limons fins, en matières organiques et en nutriments associés, en particulier en carbone, azote et cations : l'érosion en nappe est un moteur de l'appauvrissement en particules fines et nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols africains sablo-argileux [25].

Pertes en nutriments

Des bilans des pertes par érosion et ruissellement ont été calculés sur des parcelles tout au long d'une séquence allant de la forêt subéquatoriale d'Abidjan jusqu'aux savanes arborées des environs de Ouagadougou au Burkina [15, 25, 81]. Ils montrent que les pertes en nutriments reflètent assez fidèlement les teneurs dans les dix premiers centimètres du sol et dépendent essentiellement de l'abondance du ruissellement et de l'érosion, à l'exception des champs où l'apport d'engrais solubles augmente fortement les exportations. Ainsi, d'une forêt perdant 50 kg/ha/an de terre à un champ de maïs fertilisé (N 120, P 20, K 36), dont l'érosion atteint 90 000 kg/ha/an, les pertes de nutriments passent de 14 à 1 866 kg/ha/an de carbone, de 1,5 à 185 kg d'azote, de 0,1 à 33 kg de phosphore, de 0,8 à 70 kg de calcium, de 0,3 à 35 kg de magnésium et de 0,6 à 54 kg/ha/an de potassium. Il ressort de ces indications que l'érosion en nappe appauvrit sérieusement les champs labourés.

Stocking [82], au Zimbabwe, considérant seulement les pertes en carbone, en azote et en phosphore des parcelles d'érosion pour les principales utilisations des terres du pays, a évalué les pertes en nutriments pour cet État comme équivalant à 1,5 billion de dollars US par an. Sur les champs cultivés, 20 à 50 dollars d'azote et de phosphore sont perdus par érosion, plus que les engrais qu'on y met.

Il ressort de ces évaluations que l'érosion, à côté du drainage, peut jouer un rôle important dans l'appauvrissement en nutriments des sols tropicaux. C'est un motif

supplémentaire pour proposer de lutter contre elle ; cependant, là où les pluies sont abondantes, la réduction du ruissellement peut augmenter le drainage ainsi que les pertes en nutriments solubles comme l'azote. Ce fut le cas au Nord-Cameroun, dans la zone soudanienne de Mbissiri, où le semis direct sous litière d'une rotation coton-maïs a réduit l'érosion de 25 à moins de 5 t/ha/an et le ruissellement de 25 à 10 %, mais a augmenté le lessivage de l'azote au point d'exiger un apport complémentaire de 20 unités d'azote pour redresser la carence des cultures [41].

Pertes en carbone à l'échelle de la parcelle et des versants

De nombreuses données ont été présentées au 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. Par rapport à la production de biomasse (1 à 20 t/ha/an), les pertes de carbone particulière 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 de l'horizon 10 cm). Là où les rigoles se développent, les pertes en carbone sont dépendantes du volume érodé et des teneurs des dix premiers centimètres du sol. Par rapport à la capacité de séquestration du carbone par les sols (0,1 à 2,5 t/ha/an), les pertes par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur. Par conséquent, le paysan a tout intérêt à développer des systèmes de cultures bien couvrants pour réduire les pertes par érosion en MO et nutriments, améliorer la stabilité des agrégats et augmenter progressivement le stock de carbone dans l'horizon de surface.

Au niveau du versant, le carbone érodé rencontre de nombreux pièges (végétation dense, pentes concaves, 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 concaves. Il s'agit d'un déplacement localisé plus que d'une séquestration du carbone, à moins que cet humus enfoui ne soit plus durable du fait de la diminution de l'aération par les labours [83]. 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 parcage. 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 [84]. Dans les grands fleuves, l'essentiel du carbone provient des eaux de drainage et de l'altération des roches carbonatées au 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 carbone soluble de l'océan et l'oxyde de carbone de l'atmosphère. Les autres puits de carbone (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).

Conclusions et perspectives

La modélisation

On dispose de plus de 1 000 données annuelles de mesure de l'érosion en nappe et rigoles, couvrant une grande diversité de situations agroécologiques de ce vaste continent qu'est l'Afrique. Mais ces données sont dispersées et insuffisamment reliées entre elles et il manque un modélisateur africain, sorte de « Wischmeier local », pour tester et valider les divers modèles proposés [14, 15, 25].

La technologie des mesures de l'érosion : plus complexe ou plus simple ?

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 finan-

ciers disponibles. Ainsi, en Afrique, on est passé de l'interprétation de repères (clous, racines dénudées, pierres) à des mesures fines du ruissellement, des sédiments grossiers qui seront vite piégés, des matières en suspension (MES) et des nutriments qui risquent d'atteindre la rivière et l'océan, sur des parcelles de 100 m², bien adaptées à la variabilité des caractéristiques des terres cultivées et à la disponibilité en personnel technique. Les chercheurs ont fait appel ensuite à des simulations de pluies sur 100 puis 1 m², valables pour définir la dynamique de l'eau, tester la stabilité des agrégats à la battance et comparer le flux de perte en MES. L'étude des ravines, de la circulation des flux d'eau et de sédiments, de leur piégeage sur les versants, reste à développer. Les hydrologues ont observé par ailleurs les flux de sédiments fins sur de nombreux bassins, sans qu'on puisse toujours totalement expliquer les effets d'échelle et les facteurs de risque d'érosion. La cartographie des risques d'érosion tente aujourd'hui de croiser, dans le cadre de bassins spatialisés, divers indicateurs d'état de surface et de stabilité des macro-agrégats validés à l'échelle des parcelles d'érosion [24]. Enfin, divers isotopes permettent de distinguer l'origine des sédiments, les zones d'arrachage, de transport et de dépôt et leur transfert dans les bassins-versants [85].

Les processus d'érosion

La majorité des mesures ayant été faites sur des parcelles plantées chaque année, on dispose aujourd'hui en Afrique de plus de mille résultats annuels d'érosion en nappe (*interrill*) en fonction des sols, des cultures, des pentes les plus courantes et des techniques culturales.

En revanche, on dispose de trop peu de mesures d'érosion linéaire, d'importance majeure en montagne où, sur les versants très pentus, les flux liquides et solides empruntent des chenaux de circulation souvent bloqués par des pierres ou des touffes végétales. 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 relaie l'érosion en nappe en montagne.

Validation des méthodes de lutte : des méthodes mécaniques aux approches biologiques

Depuis un demi-siècle, les conservateurs des sols proposent des techniques de lutte anti-érosives mécaniques dont la validation scientifique n'a jamais été faite. On connaît maintenant des exemples de l'échec de ces techniques de terrassement grandes consom-

matrices de main-d'œuvre imposées partout sans vérification de leur efficacité, de leur acceptabilité et de leur rentabilité [86, 87]. Diverses techniques biologiques de LAE ont été testées avec succès sur parcelles (de 100 à 2 000 m²). De ces études, il ressort une grande efficacité pour lutter contre l'érosion et une moindre efficacité, pour lutter contre le ruissellement, qu'il s'agisse de paillage, de fumure organique, de plantes de couverture, de haies vives [39, 40], de semi direct sous litière, surtout où la biomasse est en quantité suffisante pour couvrir au moins 30 % du sol, malgré la place donnée à l'élevage [23, 41]. Mais la conservation des sols pauvres ne suffit pas à améliorer substantiellement la productivité des terres [39, 88]. La fumure organique est très utile, mais souvent carencée en azote et phosphore et surtout pas assez abondante.

Dorénavant, on s'oriente vers des approches biologiques croisées avec la gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments du sol auxquels on ajoute un complément minéral (surtout P et N) pour faire face aux besoins en nutriments des cultures et non pour corriger les carences du sol (pratique qui serait trop chère et trop risquée, car nombre de sols tropicaux retiennent peu les engrais). Même si les méthodes de LAE sont techniquement efficaces, encore faut-il qu'elles soient acceptables pour les petits fermiers bénéficiaires : c'est pourquoi il est important d'étudier les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols, d'appréhender leur répartition dans l'espace écologique et de rechercher l'amélioration de leur efficacité (fertilisation complémentaire, affinage des doses d'irrigation, introduction des activités biologiques permettant la restauration des sols dégradés).

Références

1. Harroy JP. *Afrique terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation*. Bruxelles : Éditions Marcel Hayez, 1944 ; 557 p.
2. Fournier F. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 1967 ; 12 : 5-53.
3. Fauck R, Dugain F. *Érosion et ruissellement en moyenne Guinée. Relations avec les cultures*. Dabala, C.R. II^e Conférence Interafricaine des Sols, 1959.
4. Caintepas JP. *Premiers résultats des mesures de l'érosion en Moyenne Casamance, Sénégal*. C.R. VI^e Congrès AISS, 1956, Paris, tome D : 569-76.
5. Dabin B, Leneuf N. *Étude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire*. Abidjan : Orstom, 1958 ; 20 p.
6. Tricart J. Érosion naturelle et érosion anthropique à Madagascar. *Revue Géol Dynamique Paris* 1953 ; 5 : 225-30.

7. Rougerie G. *Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière*. Dakar : IFAN, 1960 ; 542 p.
8. Sautter G. *Essai sur les formes d'érosion en cirque dans la région de Brazzaville*. Paris : CNRS, 1970 ; Vol. 9, 170 p.
9. Michel P. La dynamique actuelle de la géomorphologie dans le domaine soudanien de l'Ouest africain : exemple du Mali occidental et Sénégal oriental. *Géo-Eco-Trop* 1978 ; 1 : 1-20.
10. Centre technique forestier tropical (CTFT). *Conservation des sols au Sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération, 1979 ; 295 p.
11. Hudson N. *Runoff & soil loss from arable land in Southern Rhodesia*. International Union For the Conservation of Nature, 7th Technical Session, theme 1C, Athens, 1958, 12 p.
12. Hudson N. *Soil conservation*. London : Batsford, 1971 ; 324 p.
13. Hudson N. *Land husbandry*. London : Batsford, 1992 ; 192 p.
14. Roose E. *Vingt années de mesure de l'érosion en petites parcelles en Afrique de l'Ouest*. Travaux et documents Orstom, n° 78. Paris : Éditions Orstom, 1977 ; 108 p.
15. Roose E, Sarraïlh JM. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah Orstom Sér Pédol* 1985 ; 25 : 7-30.
16. Heusch B. L'érosion du pré-Rif (Maroc). *Ann Rech Forestières Maroc* 1970 ; 12 : 1-176.
17. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised RUSLE*. Agricultural Handbook, n° 703. Washington (DC) : USDA, 1997 ; 123 p.
18. Lal R. Soil erosion problems on alfisols Western Nigeria. *Geoderma* 1981 ; 25 : 215-30.
19. Elwell H, Stocking M. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. *Geoderma* 1976 ; 15 : 61-70.
20. Elwell H. Modelling soil losses in Southern Africa : SLEMSA. *J Agric Eng Res* 1978 ; 23 : 117-27.
21. Arabi M, Roose E. Influences des systèmes de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1989 ; 9 : 39-51.
22. Hurni H. *Guidelines for development agents on soil conservation in Ethiopia*. Ministère de l'Agriculture ; CFSCDD, Addis Abeba, Soil Conservation Project, 1986, 100 p.
23. Boli Z, Roose E, Bep a Ziem B, Sanon K, Waechter F. Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux au Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 309-26.
24. Diallo D. *Érosion des sols en zone soudanienne du Sud Mali (BV de Djitiko)*. Thèse doctorat, université de Grenoble I, Géographie physique, 1992, 202 p.
25. Roose E. Introduction à la GCES. *Bull Sols FAO* (Rome) 1994 ; 70 : 420 p.
26. Dumas J. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1965 ; 3 : 307-33.
27. Cormary Y, Mosson JM. Étude de CES au Centre de recherche du génie rural en Tunisie. *Cah Orstom Sér Pédol* 1964 ; 2 : 3-26.
28. Kalman R. *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou, Maroc*. Projet Sebou, 1967, 32 p.
29. Roose E, Asseline J. Mesure de l'érosion sous pluies simulées aux casés d'érosion d'Adiopo-doumé II. Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et sous ananas. *Cah Orstom Sér Pédol* 1978 ; 16 : 43-72.
30. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris : Éditions Orstom, 1989 ; 229 p.
31. Lafforgue A, Naah E. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1976 ; 13 : 195-237.
32. Collinet J, Valentin C. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1979 ; 17 : 283-328.
33. Pontanier R, Moukouri Kuoh H, Sayol R, Seiny-Boukar L, Thèbe B. *Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun*. Yaoundé : Orstom-Ira, 1984 ; 76 p.
34. Blavet D, De Noni G, Roose E, Maïllo L, Laurent JY, Asseline J. Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 2004 ; 15 : 111-20.
35. Laouina A. Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 292-9.
36. Sabir M, Merzouk A, Berkat O. Impact du pâturage sur les propriétés hydriques du sol dans un milieu pastoral aride : Aarid, Haute Moulouya (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 1994 ; 14 : 444-62.
37. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole (GCES). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
38. Duchaufour H, Lebreton M, Bizimana M, Lecuyer J. Aménagement de la ravine de Sagara, Burundi. *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 84-111.
39. Roose E, Ndayizigiyé F. Agroforestry, GCES in Rwanda. *Soil Technol* 1996 ; 11 : 109-19.
40. König D. *Conservation et amélioration des sols dans les systèmes agro-forestiers du Rwanda*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 : 56.
41. Boli Z. *Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord Cameroun*. Thèse université de Dijon, Sciences de la terre, 1996, 343 p.
42. Valentin C, Fritsch, Planchon O. *Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane*. In : « Land development management of acid soils », IBSRAM, Proceeding 4, Bangkok, 1987 : 67-81.
43. Roose E, Sabir M. Stratégies traditionnelles de GCES dans le bassin méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 33-44.
44. Khamsouk B, De Noni G, Roose E. *New data concerning erosion processes and soil management on Andosols from Ecuador and Martinique*. Proceedings ISCO XII, Beijing (China), 2002 ; 2 : 73-9.
45. Charreau C. Influence des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion en Casamance. *Agron Trop* 1969 ; 24, 9 : 836-42.
46. Charreau C, Nicou R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine. *Agron Trop* 1971 ; 26, 9 : 903-78.
47. Diallo D, Barthes B, Orange D, Roose E. Stabilité des agrégats et des mottes comparée aux risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 57-64.
48. Stocking M, Elwell H. Rainfall erosivity over Rhodesia. *Transactions New Series* 1974 ; 1 : 231-46.
49. Stocking M. Examination of the factors controlling gully growth. In : De Boodt M, Gabriels D, eds. *Assessment of erosion*. Chichester (GB) : John Wiley, 1980 : 505-21.
50. Kouri L, Vogt H, Gomer D. Analyse des processus d'érosion linéaire en terrain marneux, bassin de l'oued Mina, Tell oranais, Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 64-73.
51. Chebbani R, Belaidi S. Étude de la dynamique du ravinement sur deux couples de ravines expérimentales près de Tlemcen. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 152-60.
52. Collinet J, Zante P. Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 301-19.
53. Naimi M, Tayaa M, Ouzizi S, Choukr-Lah R, Kerby M. Estimation du ravinement dans le BV du Nakhla, Rif, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 232-43.
54. Moufaddal K. Premiers résultats des parcelles d'érosion dans le BV de Nakhla, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 244-54.
55. Tchotsua M. Dynamique et érosion de l'espace urbain de Yaoundé (Cameroun). *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 131-42.
56. Rapp A, Berry L, Temple P. Conclusions from the DUSER soil erosion project in Tanzania. *Geografiska Annaler* 1972 ; 54 a : 377-9.
57. Roose E, Chebbani R, Bourougaa L. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 2000 ; 11 : 317-26.
58. Avenard JM, Roose E. *Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire*. Congrès International de Géographie (Canada), Orstom, 1972, 25 p.
59. Aubert G, Ségalen P. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1966 ; 4 : 97-112.
60. Bourgeat F, Petit M. Les lavakas de Madagascar : un agent naturel d'évolution des versants. *Bull Assoc Geogr Fr* 1965 : 29-33.
61. Combeau A. *Érosion et conservation des sols*. Paris : Éditions Orstom, 1977 ; 85 p.
62. Chatelin Y. *Les sols ferrallitiques*. Initiations-Documents n° 20. Paris : Éditions Orstom 1972 ; 225 p.

63. Maignien R. *Étude de quelques bassins-versants en vue de définir un programme de conservation de conservation des sols. Soudan-Haute-Volta-Dahomey*. Paris : Éditions Orstom, 1959 ; 32 p.
64. Segal P. Les sals et la géomorphologie au Cameroun. *Cah Orstom Sér Pédol* 1967 ; 152 : 137-47.
65. Willaime P. *Études pédologiques de Boukombe*. Cotonou : Orstom, 1962 ; 76 p.
66. Global Assessment of soil degradation (GLASOD). *World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory map*. Wageningen (Pays-Bas) : ISRIC, 1990.
67. Fournier F. *Climat et érosion*. Paris : Presses Universitaires de France, 1960 ; 201 p.
68. Asseline J, De Noni G, Chaume R. Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée. *Revue Photo-interprétation* 1999 ; 2 : 3-9.
69. Pieri Ch. *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération du développement ; Cirad, 1989 : 444 p.
70. Brabant P. *La dégradation des terres en Afrique. Afrique contemporaine*, 161. Paris : Documentation française, 1992 : 90-103.
71. Glémarec Y. *Définition d'indicateurs d'environnement pour le développement des hautes terres tropicales*. Thèse de doctorat, Paris 7, 2000.
72. Pouget M. *Étude agro-pédologique de la région d'Ouzera*. Alger : Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), 1974 ; 72 p.
73. Le Landais F, Fabre G. Plan d'aménagement anti-érosif d'un bassin-versant (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 439-43.
74. Al Karkouri J, Laouina A, Roose E, Sabir M. Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah – Rif Central (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 342-56.
75. Sabir M, Maddi M, Naouri A, Barthès B, Roose E. *Runoff and erosion risks indicators on the main soils of the mediterranean mountains of occidental Rif (Marocco)*. Proceedings ISCO XII, Beijing (China), 2002 ; 2 : 370-5.
76. Mouchkane M. Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin-versant du Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 255-80.
77. Brabant P, Darracq S, Egué K, Simmoneaux V. *Togo – État de dégradation des terres résultant des activités humaines*. Collection notice explicative de carte, n° 112. Paris : Orstom Éditions, 1996.
78. Combeau A, Quantin P. *Érosion et stabilité structurale du sol*. Paris : Association internationale des sciences hydrologiques (AIHS), 1962 ; 59 p.
79. Diallo D, Roose E, Barthès B. Comparaison d'un test d'érodibilité des sols et de mesures sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko, Sud-Mali. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 168-75.
80. Roose E, Barthès B. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa : a contribution from French speaking research. *Nutrient Cycling in Agrosystems* 2001 ; 61 : 159-70.
81. Mietton M. Dynamique de l'interface litho-atmosphère : érosion en zone de savane au Burkina Faso. Thèse d'État de géographie, Grenoble, 1988, 511 p.
82. Stocking M. *Quantifying the on-site impact of soil erosion. Land conservation for future generations*. Proceedings Isco V, Bangkok (Thailand), Rimwanich S, éd., 1988 ; 1 : 137-61.
83. Wassmer P. *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Étude de l'érosion des sols et de ses conséquences dans la préfecture de Kibuye*. Université de Strasbourg, UER de géographie, 1981, 156 p.
84. Allbergel J, Toufik M, Zante P, Ben Mamou A, Abdeljaoued S. *Matière organique dans les sédiments des barrages collinaires en zone méditerranéenne semi-aride*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 (abstracts) : 41.
85. Huon S, Valentin C. *Isotopic approach of soil organic carbon erosion on two cultivated catchments with steep slopes (Venezuela, Laos)*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 (abstracts) : 25.
86. Roose E. *Érosion et conservation des sols. Place de la recherche française en régions tempérées et tropicales. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES*. Paris : Association française pour l'étude des sols (AFES), 1984 ; 321-34.
87. Roose E. Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone semi-aride méditerranéenne de Tunisie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 130-54.
88. Zougmore R, Ouattara K, Mando A, Ouattara B. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de CES au Burkina Faso. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 41-8.

CONSEILS AUX AUTEURS

Science et changements planétaires/Sécheresse est destinée à toutes les personnes qui œuvrent dans la lutte contre la sécheresse et ses conséquences physiques, humaines, économiques et sociales. Elle a pour ambition de concentrer les informations utiles, dans les nombreux secteurs d'activité concernés, et d'en favoriser la diffusion auprès des agents de terrain et des décideurs, quelle que soit leur localisation géographique.

Les connaissances et les concepts dans les sciences de l'ingénieur, en physique et en biologie évoluent très rapidement, parfois au prix de l'apparition d'un jargon propre qu'il sera fondamental de maintenir accessible à tous les lecteurs : la revue a notamment

pour objectif de souligner les acquisitions récentes, d'attirer l'attention sur les progrès en cours et sur les coopérations possibles, et de faire l'inventaire des problèmes qui restent à résoudre.

Science et changements planétaires/Sécheresse publie en français des éditoriaux, des articles de synthèse, des notes originales, des nouvelles, des analyses d'ouvrages, des informations sur l'activité internationale dans ce secteur.

Pour donner à la revue l'homogénéité nécessaire, **nous demandons, aux auteurs de bien vouloir respecter les impératifs de rédaction et de présentation des articles**, qui doivent satisfaire des lecteurs d'horizons et de cultures très divers.

Articles

Les manuscrits seront présentés de la façon suivante : 15 pages dactylographiées maximum, double interligne, 60 signes par ligne, 25 lignes par page, au recto seulement.

Chaque article doit comporter un résumé français et un résumé anglais de 20 lignes maximum, une liste de trois mots clés et la mention de la discipline à laquelle se rattache l'article.

La bibliographie ne doit pas être exhaustive, mais plutôt sélective. La traduction anglaise du titre doit figurer sur le manuscrit.

Les intertitres doivent être courts.

Il est recommandé de concevoir les articles sous une forme rédactionnelle en limitant les classifications (chapitre et sous-chapitre).

Notes originales

Elles doivent présenter des résultats non publiés, sous forme de synthèse brève (techniques, résultats, discussion) de 6 pages dactylographiées maximum ainsi qu'un résumé anglais.

Références bibliographiques

Les références bibliographiques seront classées dans leur ordre d'apparition dans le texte (appelées dans le texte par leur numéro placé entre crochets).

Indiquer tous les auteurs lorsqu'il y en a 6 ou moins. Lorsqu'il y en a 7 ou plus, indiquer les trois premiers suivis de *et al.* Les références doivent indiquer, dans l'ordre :

• Pour les articles de revues

Nom des auteurs suivis des initiales de leurs prénoms. Titre de l'article (dans la langue d'origine). Nom de la revue en italiques (pas de ponctuation après les abréviations) année ; volume : première et dernière page de l'article.

Exemples

1. Bouchet P. Les mils et sorghos dans la République du Mali. *Agron trop* 1963 ; 1 : 107-85.

2. Dancette C, Poulain JF. Influence de *Acacia albida* sur les facteurs pédoclimatiques et les rendements des cultures. *African soils* 1968 ; 3 : 197-239.

• Pour les livres

Même présentation des auteurs. Titre du livre en italiques. Ville : nom de l'éditeur, année de publication ; nombre de pages.

Exemples

1. Giri J. *Le Sahel demain : catastrophe ou renaissance*. Paris : Karthala, 1963 ; 233 p.

2. Vandes Planck JE. *Plant disease : epidemic and control*. Londres : Academic Press, 1963 ; 67 p.

• Pour les articles de livres

Même présentation des auteurs de l'article. Titre de l'article. In : Nom des auteurs du livre, eds. Titre du livre en italiques. Ville : nom de l'éditeur, année : première et dernière page de l'article. Exemple

1. Tal M. Selection for stress tolerance. In : Evans DA, Shap NR, Ammirato PV, eds. *Handbook for plant cell culture*. New York : Macmillan, 1983 : 461-88.

Instructions

Les manuscrits soumis devront être envoyés en trois exemplaires, accompagnés d'une copie sur disquette 3 pouces 1/2, PC compatible ou Macintosh, avec indication du logiciel utilisé.

Illustrations

Les illustrations (6 maximum) seront accompagnées de légendes. Tous les documents placés dans le texte seront numérotés en chiffres arabes (*figure 2, photo 3*) et les tableaux en chiffres romains (*tableau I*) ; leur place d'insertion doit être indiquée dans le texte.

Manuscrits

Les manuscrits doivent être adressés à l'adresse suivante :

Éditions John Libbey Eurotext,
à l'attention de André Kergreis
127, avenue de la République, 92120 Montrouge, France.
Tél. : (+33) 1 46 73 06 60.
Fax : (+33) 1 40 84 09 99.
Mél : chantal.delooz@jle.com

Le Comité de Rédaction