

UNIVERSITÉS
FRANCOPHONES

BILAN HYDRIQUE AGRICOLE ET SÉCHERESSE EN AFRIQUE TROPICALE

Vers une gestion
des flux hydriques
par le système
de culture

Éditeurs scientifiques
François-Noël Reyniers
Laomaibao Netoyo



COLLOQUES ET CONGRÉS
SCIENCE ET CHANGEMENTS
PLANÉTAIRES/SÉCHERESSE

BILAN HYDRIQUE AGRICOLE ET SÉCHERESSE EN AFRIQUE TROPICALE

Vers une gestion des flux hydriques
par le système de cultures

British Library Cataloguing in Publication Data

A catalogue record for this book is available from British Library.

ISBN 27420-0022-4

Editions John Libbey Eurotext

6 rue Blanche, 92120 Montrouge,

France

Tél. : (1) 47 35 85 52

John Libbey & Company Ltd

13 Smith Yard Summerley Street

London SW18 4HR, England

Tél. : (01) 947.27.77

John Libbey CIC

Via L. Spallanzani, 11,

00161 Rome, Italy

Tél. : (06) 862.289

© John Libbey Eurotext, 1994, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage - loi du 11 mars 1957 - sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris.

BILAN HYDRIQUE AGRICOLE ET SÉCHERESSE EN AFRIQUE TROPICALE

Vers une gestion des flux hydriques
par le système de cultures

Séminaire international,
Bamako, 9-13 décembre 1991

Coordination

François-Noël Reyniers
Laomaibao Netoyo

Une nouvelle série « *Colloques et Congrès : Science et changements planétaires/Sécheresse* »

L'Université des Réseaux d'Expression Française (UREF) et les Editions John Libbey Eurotext, après avoir il y a quatre ans lancé la revue trimestrielle « *Science et changements planétaires/Sécheresse* », initient une nouvelle série « Colloques et congrès : Science et changements planétaires/Sécheresse » .

Le présent ouvrage « *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale* », actes d'un séminaire international organisé par le réseau R3S (Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse) du 9 au 13 décembre 1991 à Bamako, a le privilège d'inaugurer la série.

Se situant dans le droit fil de la revue « *Sécheresse* » et doté des mêmes comités de lecture et scientifique, cette nouvelle série a pour objectif d'assurer le contact entre les partenaires de la francophonie et de favoriser la communication entre les chercheurs, développeurs, enseignants, décideurs politiques... qui, de par le monde, sont concernés par les problèmes de désertification et de changements climatiques.

Cette collection ouverte à tous peut servir de support à toute institution, organisme, association, envisageant de publier les actes de manifestation (colloques, congrès, séminaires, ateliers...) en relation avec les thèmes généraux de la collection.

Cette nouvelle série vient compléter harmonieusement celles déjà éditées par l'UREF et John Libbey Eurotext *Actualités scientifiques* et *Sciences en marche* dans la collection « *Universités francophones* ».

Professeur Michel GUILLOU
Délégué général de l'AUELF
Recteur de l'UREF

Sommaire

Liste des participants	IX
Remerciements	XIII
Préface	XV

Session I. Evaluation des risques agroclimatiques. Animateur : J. Charoy (CIRAD)

1. Contribution à l'exploitation de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. F. Forest, A. Clopes (CIRAD, France)	3
2. Analyse des risques de déficit hydrique au cours des différentes phases phénologiques du mil précoce au Niger. Conséquences agronomiques. M. Eldin (IRSTOM, France)	17
3. Réduction de l'impact du climat sur le calendrier agricole au Sahel. B. Diarra, K. Konaré (Mali)	31
4. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre. J.L. Chopart (IDESSA, Côte d'Ivoire et CIRAD, France), D. Koné (CIRAD, France)	39
5. Assessment of climatic resources for the cropping potential in Northern Ghana. C.N. Kasei, H. Rudat (NAES, Ghana)	49
6. Rainfall analysis for agricultural production in the nigerian savanna. J.J. Owonubi (IRA, Nigeria)	57
7. Crop yield estimation and forecasting in Niger using NOAA AVHRR Data. C. Conese, F. Maselli, A. Di Vecchia, B. Senni, G. Maracchi (IATA-CNR, Italy)	67

Session II. Les facteurs du milieu et l'alimentation hydrique. Animateur : G. Raymond (IRCT-CIRAD, France). Rapporteur : A. Brétaudeau (IPR, Mali)

8. Esquisse d'hydrosystème céréalier soudano-sahélien valorisant les précipitations. F.N. Reyniers (CIRAD-CA, France)	79
--	----

9. Effets des techniques culturales sur l'alimentation hydrique du sorgho et le bilan minéral du sol dans le plateau central du Burkina-Faso.	
B. Ouattara, M.P. Sedogo, F. Lompo, K. Ouattara (INERA, Burkina Faso)	91
10. Interaction between water and nutrient supply under semi-arid conditions.	
D. Vetterlein, H. Marschner (IPN, Germany)	103

Session III. Facteurs variétaux de l'amélioration de l'alimentation hydrique.
Animateur : Dr Niangado (IER, Mali). Rapporteur : M. Diagne.

11. Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil. Cas de la zone de Bankass.	
M. Vaksman, S. Traoré (IER/CIRAD, Mali)	113
12. Contribution à l'utilisation des paramètres morphophysiologiques et agronomiques pour la sélection de variétés de sorgho résistantes à la sécheresse.	
A. Brétaudeau, B.M. Traoré, S. Traoré, O.S. Traoré, M. Keita (IPR, Mali)	125
13. Approche physiologique de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées pour l'amélioration de la production en zones sèches.	
D. Annerose (CERAAS, Sénégal), B. Cornaire (SRPH, Bénin)	137
14. Premiers acquis du CERAAS sur la génétique et la sélection de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées. Cas de l'étude des paramètres du système racinaire.	
J.L.B. Khalfaoui (IER/CIRAD, Sénégal)	151
15. Identification and characterization of winter cereal cultivars tolerant to the stress conditions of the mediterranean climate.	
B. Borghi (IEC, Italy)	161
16. Effects of water stress on pearl millet.	
G. Maracchi, M. Martini, L. Bacci (IATA-CNR, Italy), M. Boulama, M. Dauda (Météo. nat., Niger), G. Popov (FAO, Italy)	167

Session IV. Facteurs agronomiques de l'alimentation hydrique du système de culture.
Animateur : M. Moussa Dossolo Oussa. Rapporteur : J.J. Owonubi.

17. Maize production in Zimbabwe. Coping with drought stress in the marginal agroecological zones.	
N.M. Manyowa (ACFD, Zimbabwe)	181
18. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique.	
F. Affholder (CIRAD, France)	191
19. Influence des techniques culturales sur le développement racinaire du cotonnier. Conséquences sur l'alimentation hydrique et minérale.	
B. Djoulet, R. Fortier (IRCT-CIRAD, Tchad)	205

20. Contraintes et possibilités de valorisation des ressources naturelles dans le sud du bassin arachidier (Siné Saloum, Sénégal). M. Séné (ISRA, Sénégal), P. Pérez (CIRAD, France)	217
21. Modelling effects of water conservation tillage in the semi-arid tropics. L. Stroosjnider, W.B. Hoogmoed (Wageningen Agricultural University, The Netherlands), J.A.A. Berkhout (University of Amsterdam, The Netherlands)	235
22. Conditionnement des sols sableux par la matière organique en riziculture pluviale. Y. Dembélé (INERA, Burkina Faso)	253
23. L'amendement organique des sols sableux : une assurance contre les préjudices de la sécheresse. Cas de Thilmakha (isohyète 300 mm). F. Ganry (CIRAD, France), L. Cissé (ISRA/CNRA, Sénégal)	263

Session V. Gestion agricole des précipitations sur le bassin versant. Animateur : L. Sarr. Rapporteur : N. Aho.

24. Influence des cordons pierreux sur la relation entre le bilan hydrique et le rendement du mil dans le bassin versant de Oualaga à Namsiguia au Burkina Faso. H.J.W. Van Duijn, W.F. Van Driel (CIEH, Burkina Faso), O. Kaboré (IDR, Burkina Faso)	275
25. Amélioration de la fertilité des rizières de Basse Casamance en relation avec la gestion des eaux de ruissellement d'un bassin versant : premiers résultats et perspectives. A. Dobos, F. Mankeur (ISRA, Sénégal), J.P. Montoroi (ORSTOM, Sénégal)	289
26. Apports de la télédétection pour la caractérisation des bas-fonds et de leur bassin versant au Sahel. A. Nonguierma, A.I. Mokadem, S. Dautrebande (Faculté des sciences agronomiques, Belgique)	303
27. Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle (Saria, Burkina Faso, 1990). S. Guillobez, R. Zougmore (INERA, Burkina Faso)	319
28. Fonctionnement hydrique des sols ferrugineux du nord du Cameroun. Tentatives d'amélioration de leur régime hydrique. G. Vallée, L. Seiny Boukar, M. M'Biandoun, J.P. Olin (IRA, Cameroun)	331

Session VI. Risques économiques et climatiques aux échelles régionales et du système de production. Animateur : J.M. Boussard (INRA, France). Rapporteur : A. Kéré.

29. Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision des rendements en mil en zone sahélienne. B. Cortier (AGRHMET/CIRAD, Niger)	349
--	-----

30. The use of remote sensing in grain crop production forecasting in Kenya.	
R.R. Sinange (Dept. RSRS, Kenya)	363
31. Exploitation d'un réseau d'irrigation pendant l'hivernage et efficience des pluies : cas d'un périmètre de polyculture dans la région de Tillabéry (Niger).	
S. Marlet, B. Lidon (IRAT/CIRAD, Niger ; IRAT/CIRAD, France)	375
32. Stratégies anti-risques en agriculture. Exemple du modèle Target-MOTAD.	
E. Ngounio-Gabia (SOCADA/RCA)	387
33. Rainfall and agricultural risk : results from India's semi-arid tropics.	
E.J. Bakker (Projet PPS, Mali)	399

Liste des participants

Affholder F. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Aho N. Centre béninois de la recherche scientifique et technique (CBRST), BP 03-1665, Cotonou, Bénin.

Amadou M. Institut national de la recherche agronomique du Niger, DRE/INRAN, BP 429, Niamey, Niger.

Annerose D. CERAAS-ISRA, BP 59, Bambey, Sénégal.

Avosse S. Projet PNUD/OMM/BEN 87-010, BP 379, Division agrométéorologique, Cotonou, Bénin.

Bakker E.J. Projet PPS, BP 22, Niono, Mali.

Barbosa J. INIA, BP 84, San Jorge-Praia, Cap Vert.

Bemba A. ORSTOM/Bioclimatologie, BP 181, Brazzaville, Congo.

Borghi B. Istituto Sperimentale Cerealicoltura, 20079 S. Angelo Ladigiano, Milano, Italy.

Boussard J.M. INRA/ENGREF, 19 avenue du Maine, 75015 Paris, France.

Brétaudeau A. IPR/Katibougou, BP 06, Koulikoro, Mali.

Charoy J. CIRAD, BP 1813, Bamako, Mali.

Chopart J.L. IDESSA/CIRAD, 02 BP 635, Bouaké 01, Côte d'Ivoire.

Coly J. MDRA, CP 71, Dépa, Guinée Bissau.

Cornaire B. Direction de la Recherche agronomique, Station de recherche sur le palmier à huile, BP 884, Cotonou, Bénin.

Cortier B. AGRHYMET/ENM, BP 11011, Niamey, Niger.

Dembélé Y. INERA, BP 910, Bobo Dioulasso, Farako-Ba, Burkina Faso.

Diagne M. CNRA/ISRA, BP 51, Bambey, Sénégal.

Diallo A. Projet production soudano-sahélienne, Station du Sahel, BP 22, Niono, Mali.

Djoulet B. IRCT/CIRAD, Station de Bebedjia, BP 31, Moundou, Tchad.

Eldin M. ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France.

Fall M. World Vision International, BP 325, Louga, Sénégal.

Fall M. ISRA/ORSTOM, ISRA-CRA Djibelor, BP 34, Ziguinchor, Sénégal.

Forest F. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Gandah M. INRAN, BP 429, Niamey, Niger.

Ganry F. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Groot R. Projet production soudano-sahélienne, Station du Sahel, BP 22, Niono, Mali.

Guillobez S. CIRAD, BP 596, Ouagadougou 01, Burkina Faso.

Hermann L. ICRISAT, BP 12404, Niamey, Niger.

Huibers F. CABO, Bornesteeg 65, BP 14, 6700 AA Wageningen, The Netherlands.

Jallow T. INSAH, BP 1530, Bamako, Mali.

Kasei C. Nyankpala Agric. Expt. Station, P.O. Box 52, Tamale, Ghana.

Kéré A. INSAH, BP 1530, Bamako, Mali.

Koné D. IDESSA, 02 BP 635, Bouaké 01, Côte d'Ivoire.

Khalfaoui J.L. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Lawson Body L. Direction de la Météorologie nationale, BP 1505, Lomé, Togo.

Lewis C. ACIDI, BP 98, Bamako, Mali.

Lopez J.M. INIA, BP 84, San Jorge-Praia, Cap Vert.

Manyowa N. ACFD, P.O. Box A 469, Avondale, Harare, Zimbabwe.

Marlet S. CIRAD-CA, BP 150, Niamey, Niger.

Mars G. Université agronomique de Wageningen, Projet agrégation des sols, BP 28, Koutiala, Mali.

M'Biandoum M. IRA, BP 415, Garoua, Cameroun.

Moussa K. UICN, Youvarou, Mali.

Moussa Dossolo Traoré IER, BP 438, Bamako, Mali.

N'Diaye M.K. IER/SRCVO/R3S PF2, BP 438, Bamako, Mali.

Netoyo L. INSAH, BP 1530, Bamako, Mali.

Niangado O. IER, BP 438, Bamako, Mali.

Ngounio-Gabia E. Département de recherche/SOCADA, BP 997, Bangui, RCA.

Nonguierma A. Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Lab. de télédétection, UER/Hydraulique agricole, 2 passage des Deportes, B-5030 Gembloux, Belgique.

Ouattara B. INERA, 03 BP 7192, Ouagadougou 03, Burkina Faso.

Owonubi J. Head of Department, PMB 1044, Zaria, Nigeria.

Perez P. ISRA/CIRAD, BP 199, Kaolack, Sénégal.

Raymond G. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Retout C. Médiascience, 83 rue du Pré des Agneaux, 1160 Bruxelles, Belgique.

Reyniers F.N. CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France.

Salez P. ICRISAT, Centre régional sorgho, BP 320, Bamako, Mali.

Sarr L. BNVA, BP 10428, Dakar, Sénégal.

Schweigman G. Université de Groningen, Dept Econometrics Postbus 800, 9700 Groningen, The Netherlands.

Seiny Boukar L. IRA, BP 33, Maroua, Cameroun.

Séné M. ISRA, BP 199, Kaolack, Sénégal.

Sinange R.K. Dept of Resource Surveys and Remote Sensing, P.O. Box 47146, Nairobi, Kenya.

Sinsin B. Université Libre de Bruxelles, avenue Paul Héger, B-1050, Bruxelles, Belgique.

Some L. INERA, 03 BP 7192, Ouagadougou 03, Burkina Faso.

Togola D. IPR, BP 6, Koulikoro, Mali.

Traore S. IER, BP 438, Sico Sotuba, Mali.

Vaksmann M. CIRAD-CA, BP 1813, Bamako, Mali.

Vallée G. CIRAD-CA, BP 1146, Garoua, Cameroun.

Van Duijn H.V.W. CIEH/UAW, 01 BP 369, Ouagadougou, Burkina Faso.

Vetterlein D. Postfach 70 05 62, 7 000 Stuttgart 70, Germany.

Vielhager K. Université de Gottingen, Institute of Agronomy in the Tropics (IAT), Grisebachstr. 6, D-3400 Gottingen, Germany.

Worou S. Institut national des sols, BP 1026, Lomé, Togo.

Remerciements

Nous remercions les organismes suivants pour leur contribution à l'édition de cet ouvrage :

ACDI : Agence de coopération pour le développement international (Canada)

CCE - DGXII : Commission de la Communauté européenne - Direction générale XII

CILSS / INSAH : Comité permanent inter-états de lutte contre la sécheresse dans le Sahel / Institut du Sahel

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CORAF - R3S : Conférence des responsables de recherche agronomique africains
- Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse

CTA : Centre technique de coopération agricole et rurale

Le Centre technique de coopération agricole et rurale est installé depuis 1983 à Ede/Wageningen au titre de la Convention de Lomé entre les Etats membres de la Communauté européenne et les Etats du groupe ACP.

Le CTA est à la disposition des Etats ACP pour leur permettre un meilleur accès à l'information, à la recherche, à la formation ainsi qu'aux innovations dans les secteurs du développement agricole et rural et de la vulgarisation.

Siège : "De Rietkampen", Galvanistraat 9, Ede, Pays-Bas.

Nous remercions tout particulièrement le Service central d'information scientifique et technique du CIRAD sans qui cet ouvrage n'aurait pu être réalisé.

Préface

Les productions agricoles en Afrique sont conditionnées en grande partie par l'usage de l'eau. Dans ce domaine, la crise économique actuelle contraint les partenaires du développement agricole et de la recherche agronomique à mettre en œuvre des projets innovants et adaptés aux réalités.

Le colloque “ Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelles recherches pour le moyen terme ? ” organisé par le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et l'Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA) en 1984 à Dakar (Sénégal) avait fait le constat de la relation forte entre la production agricole en zone soudano-sahélienne et l'approvisionnement en eau. Les recommandations orientaient alors les recherches vers l'identification et la quantification des ressources en eau, notamment des pluies, et l'amélioration de leur utilisation par les cultures.

En continuité avec ces objectifs, le séminaire sur la “ gestion agroclimatique des précipitations ” s'est tenu à Bamako (Mali) en décembre 1991. Il était organisé à l'initiative du CIRAD et de l'Institut du Sahel (INSAH) avec la collaboration du Réseau de recherches sur la résistance à la sécheresse (R3S), de la Conférence des responsables de la recherche agronomique africaine (CORAF), du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA) et de la Communauté européenne (CEE). Agronomes et économistes d'Afrique et d'Europe se sont réunis pour évaluer les progrès réalisés. Ils ont cherché à identifier des techniques pouvant réduire l'écart entre la productivité potentielle et les rendements obtenus par les agriculteurs. Ces techniques doivent être adaptées aux diverses conditions économiques et aux contraintes des exploitations agricoles. Les disciplines représentées à ce séminaire étaient nombreuses : agrométéorologie, modélisation, écophysiologie, systèmes de culture, amélioration des plantes, aménagement. Chaque contribution, en analysant une étape du cycle de l'eau, explique les interactions entre la gestion de l'eau, les itinéraires techniques pratiqués et l'écosystème tropical.

Ce volume rassemble les communications présentées à ce séminaire. Les conclusions sont un message d'espoir, puisqu'elles permettent d'envisager, pour les agriculteurs africains, de nouveaux modes d'exploitation et de protection de leurs terroirs.

H. Carsalade
Directeur général du CIRAD

M.S. Sompo-Ceesay
Directeur général de l'INSAH

SESSION I

Evaluation des risques agroclimatiques

Animateur : J. Charoy (CIRAD, France)

1

Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré

F. FOREST¹, A. CLOPES²

1. IRAT/CIRAD BP 5035, 34032 Montpellier, France

2. Gauthier SA, France

Introduction

La nécessité de promouvoir avec succès des actions de développement agricole dans les régions semi-arides d'Afrique pour répondre aux besoins alimentaires des populations fait désormais l'unanimité au sein de la communauté économique, financière et politique internationale.

Les économistes recommandent de doubler, voire de tripler la productivité des cultures vivrières dont il faut souligner l'extrême faiblesse actuelle. Les rendements moyens en zone soudano-sahélienne ont ainsi varié de 1988 à 1990 entre 400 et 500 kg/ha [1], alors que les conditions de pluviosité étaient relativement favorables si l'on se réfère aux séries observées depuis 1968, année d'apparition soudaine d'un processus de réduction de la ressource pluviométrique.

La recherche agronomique, à l'aide de zonages agroclimatiques, a mis en évidence un décalage systématique entre le rendement agronomiquement possible [2] et celui

effectivement atteint par des agriculteurs faisant face à de multiples contraintes : financières, disponibilités en main-d'œuvre et intrants. Des zonages du rendement espéré en conditions de maîtrise agronomique [3,4] ont été proposés pour les principales cultures vivrières au Burkina-Faso et au Mali. Pour la filière maïs, une quantification régionale des potentialités [5] a confirmé que le décalage entre la réalité socio-économique et la potentialité agronomique s'accroît lorsque le flux pluviométrique augmente.

Des hypothèses novatrices pour la recherche agronomique

Le bilan des travaux menés, dans un premier temps en conditions de station, et celui, plus récent, des interventions en milieu paysan ont conduit les bioclimatologistes à actualiser leurs objectifs et à reconsidérer la démarche expérimentale.

Ils ont été ainsi amenés à :

- écarter définitivement l'hypothèse par trop simplificatrice tendant à considérer la pluviosité comme un facteur explicatif direct du rendement ;
- développer les connaissances sur les indicateurs de rendement espéré IRESP1 et IRESP2 basés respectivement sur l'indice de satisfaction ETR/ETM ou sur la combinaison ETR et ETR/ETM ;
- poser le problème des relations cultures-environnement en définissant un schéma d'analyse plus global et fonctionnel, à savoir l'hydrosystème agricole tel que défini dans le plan à cinq ans du réseau R3S [6] ;
- analyser les flux hydriques et énergétiques, et quantifier le bilan hydrique du système sol-plante-atmosphère dans tous ses termes ;
- considérer ce bilan hydrique comme un facteur de production susceptible d'avoir un effet positif ou négatif sur la croissance et le développement du couvert végétal selon que le rapport entre les principaux flux est orienté vers l'évapotranspiration réelle ou vers l'excès d'eau, et plus particulièrement, dans la majorité des situations pédologiques, vers le drainage en profondeur.

Contribution à la compréhension du risque agricole

Des travaux plus récents, menés en particulier dans le cadre des projets des réseaux R3S et Espace¹, ont abouti à des résultats agronomiques convergents laissant augurer de la pertinence de ces hypothèses de travail ; ainsi, la fluctuation régionale du rendement moyen vivrier en zone sahélo-soudanienne peut être expliquée avec une précision

1. Evaluation et suivi de la production agricole en relation avec le climat et l'environnement.

acceptable [7] par l'appréciation d'un indicateur agroclimatique simple qui est le produit des indices de satisfaction des besoins en eau de la culture au cours du cycle et au moment de la phase de grande sensibilité :

$$\begin{aligned} \text{IRESPI} &= \text{ETR/ETM cycle} \times \text{ETR/ETMpc} \\ \text{Rdt (moyen)} &= 10 \times \text{ETR/ETM cycle} \times \text{ETR/ETM pc} \\ R &= 0,77 \end{aligned}$$

pc : phase critique.

Ce résultat obtenu en utilisant le modèle de bilan hydrique de base du CIRAD-CA [8-10] n'est applicable qu'à des situations agricoles traditionnelles extensives. La fonction de nature statistique utilise le référentiel bioclimatique développé en conditions de station, en particulier pour la détermination de l'ETR et de l'ETM.

Pour les situations agronomiques caractérisées par des techniques culturales diversifiées en station de recherche ou en parcelle de case, il a été observé *in situ* une variation importante du régime d'évapotranspiration réelle de la culture, impossible à prendre en compte avec ce type de modèle de bilan hydrique simplifié [11,12].

Au Sénégal, les ETRM cycle d'une culture de mil varient de 210 à 420 mm lorsque l'on prend en compte l'effet de la fumure vulgarisée (Dancette, non publié).

Au Niger, il a été nécessaire de pondérer l'ETR cycle par un coefficient 0,7 pour caler le bilan hydrique sur le bilan d'énergie [13].

Au Mali, il a été montré que le ruissellement au début de l'hivernage modifiait le régime ETR de la jeune plantule et accroissait par suite le risque d'échec du semis (Vaksman et Traoré, à paraître).

Une analyse agronomique plus poussée [14] a mis en évidence un effet de l'apport de matière organique sur le régime ETR, ce qui confirmait les hypothèses avancées par d'autres chercheurs [15]. L'apport de matière organique provoque une accélération du régime ETR en début de cycle, traduisant ainsi un fonctionnement énergétique et photosynthétique supérieur. Cette augmentation du flux d'évapotranspiration se fait, à pluviosité égale, au détriment de la recharge du sol. La comparaison de parcelles fumées à des témoins non fertilisés a montré que ce processus d'intensification introduisait, par son effet sur le régime hydrique du sol, un facteur de risque supplémentaire d'apparition d'un stress hydrique au moment des phases sensibles au cas où les pluies viendraient à s'interrompre.

Précédemment, en Côte-d'Ivoire, à la station de Bouaké [16], les effets pervers de modes de gestion modernisés (préparation du sol, engrais) sur le régime ETR et, par suite, sur le rendement, ont été mis en évidence.

Dans les zones dites humides, considérées au premier abord comme favorables, ont été observés des états de sécheresse. Leur origine est liée soit à la mauvaise application d'une technique de labour [17], soit au dysfonctionnement du système racinaire [6] provoqué par des mécanismes inhibiteurs déclenchés par l'excès d'eau, le lessivage et leurs conséquences sur le pH du sol, et la toxicité de l'alumine (figure 1).

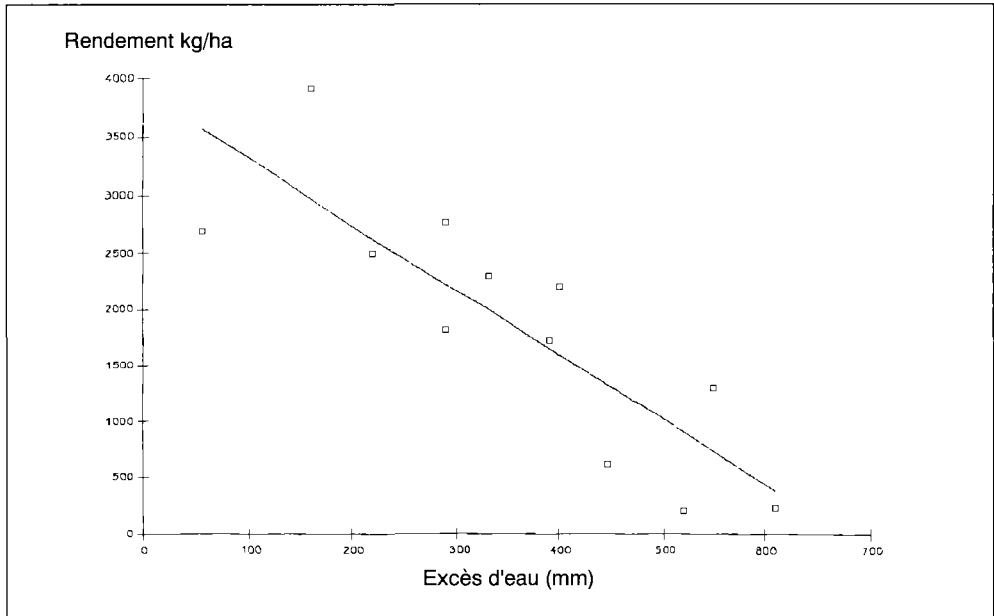


Figure 1. Effet de l'excès de l'eau à Séfa sur le rendement (traitement F_1 T_1).

Bases conceptuelles du modèle SARRA

Cette revue rapide nous amène à écarter les approches traditionnelles qui visent à réduire les interactions plante-climat, à la seule considération de données climatologiques en un site plus ou moins représentatif de l'environnement de la culture.

Elle nous conduit en effet à accorder la plus grande attention à la quantification des flux hydriques dans le continuum sol-plante-atmosphère, considéré comme un élément dynamique du fonctionnement de l'hydrosystème agronomique constitué par la parcelle cultivée de l'agriculteur.

C'est dans ce contexte que le CIRAD-CA, associé à ses partenaires des recherches agronomiques nationales africaines, a développé un second indicateur fonctionnel d'estimation du flux hydrique productif, l'IRESP2 [18] et engagé une réflexion méthodologique pluridisciplinaire visant à concevoir un modèle de bilan hydrique permettant de comprendre les effets de l'intensification des cultures sur les termes de la fonction suivante :

$$\text{IRESP2} = a \times \text{ETR}_{\text{cycle}} \times \text{ETR}/\text{ETM}_{\text{pc}}$$

Une première étude des potentialités de rendement de la maïsiculture en Afrique [5] a montré qu'il était possible d'expliquer le rendement de la culture du maïs en sélectionnant et en regroupant les situations par niveau identique d'intensification. Elle a montré par

ailleurs tout l'intérêt de ce nouvel indicateur IRESP2 par rapport à celui validé en zone plus aride.

Le schéma conceptuel du modèle SARRA (Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) repose sur l'identification des facteurs influençant la redistribution des termes du bilan hydrique induite par l'introduction de techniques culturales modifiant le fonctionnement de l'hydrosystème caractérisé, dans un premier temps par la fonction IRESP2 (tableau I).

Tableau I. Termes facteurs de l'hydrosystème et modes de gestion agronomiques.

ETR	Humidité du profil Rayonnement Net	Pluviométrie utile ETM	Etat de surface Texture Climat, Rg Advection	Préparation du sol Date de semis Densité
ETM	RN Advection régionale (H)	Coefficient cultural	LAI Hauteur Aridité Vent	Irrigation de complément et maîtrise agronomique
RuR	Réserve utile Racinaire	Vitesse racinaire	Texture Humectation Fertilité	Travail du sol Densité Fertilisation
ETR/ETM _{pc}	Croît avec le stock d'eau au cours de la phase sensible, décroît avec l'ETM. D'autant plus dépendant des pluies que ETM est fort (risque d'effet pervers)			A optimiser pour chaque situation

RN : Rayonnement net.

Rg : Rayonnement global.

LAI : Surface foliaire.

RuR : Réserve utile racinaire.

En terme analytique, le modèle SARRA aura à prendre en compte l'ensemble des facteurs conditionnant la redistribution des flux hydriques et à proposer des lois simples destinées à calibration.

Les facteurs primaires, d'ordre climatique, sont constitués principalement de la demande évaporative (ETP régionale) et de la pluviométrie journalière. Les facteurs thermiques et advectifs devraient à terme être pris en compte lorsque l'on disposera d'une quantité suffisante de stations de mesure automatique. Les facteurs de calage variétal (date de semis et durée de cycle) sont à classer dans ce premier groupe.

Les facteurs secondaires sont de nature agrotechniques. Ils intègrent les pratiques culturales ayant un effet physique sur le comportement hydrique de la surface du sol et les propriétés hydrodynamiques du profil destiné à être colonisé par le système racinaire. C'est ainsi que la qualité de l'état de surface caractérisé par des méthodes éprouvées [19] a une influence déterminante sur l'efficacité des pluies [16, 20].

Les facteurs tertiaires de nature biologique et chimique sont constitués de variables d'état et de fonctionnement permettant de quantifier les flux hydriques transitant au sein du continuum sol-racine-plante-atmosphère. Dans la première phase d'élaboration du modèle, le choix est limité à trois facteurs déterminants : l'indice foliaire, l'activité hydrique racinaire (vitesse de colonisation et d'accès à l'eau), et la réserve utile racinaire (variable résultant de l'interaction : type de sol, humectation, fertilisation).

Disposant de cette première approche conceptuelle, un schéma logique et une première ébauche informatique [21] ont été élaborés pour faire l'objet de quelques tests préliminaires. On analysera ainsi les performances de ce type de modèle lorsqu'il est appliqué à des essais de longue durée mettant en jeu plusieurs niveaux d'intensification.

Application à l'essai amélioration foncière Nioro du Rip (Sénégal). Cas de la culture du maïs

Entre 1971 et 1982, le CIRAD-CA et l'ISRA (Institut sénégalais de recherche agronomique) ont conduit des essais multilocaux dans cinq régions du Sénégal. Ces essais permettent de mieux apprécier l'effet des techniques et des milieux sur la productivité et la régularité du rendement [22].

Présentation de l'essai maïs de Nioro du Rip

Ce dispositif, qui a fait l'objet d'une première étude agroclimatique détaillée par Cortier, Pochier *et al* [9], porte sur la variété Blanche de Séfa, qui est un hybride double complexe (maïs).

Le dispositif est constitué de neuf traitements combinant trois niveaux de fumure (F) et trois niveaux de traitement du sol (T).

T0 dents à 5 cm	F0 pas d'apport
T1 labour à 12-15 cm	F1 200 kg NPK (8.14.8) et 200 kg urée
T2 labour à 18-20 cm	F2 300 kg NPK (8.14.8) et 300 kg urée

Le sol, de type ferrugineux tropical, est caractérisé par une réserve utile équivalant à 120 mm par mètre de sol, la profondeur d'enracinement peut être limitée à 50 cm en raison de la compacité.

Effet des traitements agronomiques

L'effet le plus intéressant est obtenu avec le traitement T1. Le surplus de rendement obtenu par T2 ne semble pas justifier le surcoût nécessaire lié à l'acquisition de l'engrais et à l'utilisation du matériel de travail du sol (tableau II).

Tableau II. Performances moyennes des techniques d'intensification. Culture de maïs en kg de grain par hectare. Site de Nioro du Rip (1974-1982).

Traitements	F0	F1	F2
T0	450	1 700	1 800
T1	1 000	2 700	3 400
T2	1 000	3 200	3 300

La fertilisation moyenne (F1) apparaît comme la plus performante et correspond à un seuil d'optimisation dont il serait intéressant de connaître la cause.

Effet des conditions pédoclimatiques sur le rendement

La date de semis optimale est centrée sur le 10 juillet aussi bien pour la combinaison F0 T0 que pour F2 T2. Cette similitude confirme la nature bioclimatique du calage de la culture. Cortier *et al* ont par ailleurs montré pour le traitement témoin un effet négatif sur le rendement des dates de semis comprises entre le 1-07 et le 5-07; un tel constat mériterait explication.

L'indice IRESP1 calculé pour les trois combinaisons T0 F0, T1 F1, T2 F2 à l'aide du modèle CIRAD-CA BIP, permet d'obtenir trois réponses différenciées (figure 2) mettant en évidence, d'une part la stabilité du rendement F0 T0 quelle que soit la ressource bioclimatique, et, d'autre part, la relative efficacité des traitements d'intensification :

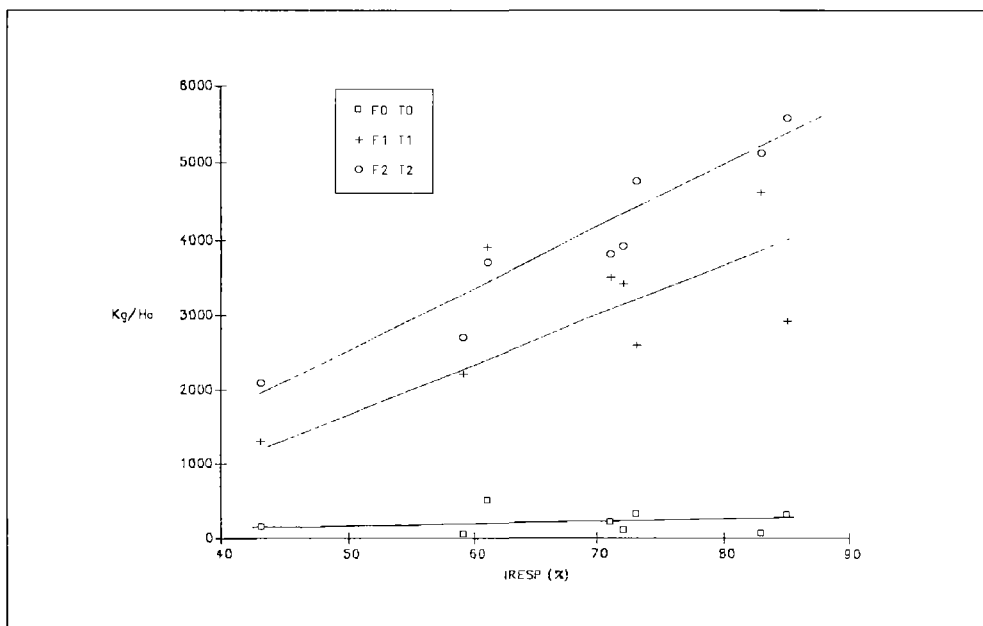


Figure 2. Réponse du maïs à l'eau à Nioro du Rip. Simulation effectuée par le modèle BIP.

Cortier *et al* ont mis en évidence une relation linéaire étroite pour le traitement F2 T2 :

$$\text{Rendement espéré} = 77 \text{ IRESP1} - 1\,200$$

$$r = 0,90$$

Ce résultat nous montre que la sensibilité à l'IRESP1 du maïs à Nioro du Rip est pratiquement 7 fois l'efficacité moyenne constatée pour les cultures de mil sorgho en région soudano-sahélienne (projet Espace).

Par analyse de la relation excès d'eau/rendement, appliquée au traitement F1 T1, Cortier *et al* ont montré l'effet négatif du drainage en profondeur sur la productivité :

$$\text{Rendement (kg/ha)} = 4689 - 7,81 \text{ Exc (mm)}$$

$$r = 0,70.$$

Limites de l'indicateur IRESP1

Sans dénigrer l'intérêt des résultats obtenus, qui nous permettent pour la situation considérée de comparer, par analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique BIP, les scénarios de productivité à 5, 10 ans attendus de chaque "paquet technique", il faut bien admettre que la nature mi-statistique mi-déterministe du modèle n'est pas satisfaisante. Elle ne permet pas de se resituer dans une approche globale prenant en compte les véritables effets des facteurs sur le bilan hydrique.

Tentative de synthèse : modélisation SARRA

Considérant l'approche conceptuelle définie plus haut, il a été proposé, à titre exploratoire, de tester les effets des paquets techniques sur les lois et algorithmes de base existants ; et, si utile, d'en introduire de nouveaux pourvu que le bénéfice tiré n'entraîne pas une complication excessive de l'exploitation du modèle.

Les paquets techniques portent sur les activités travail du sol et fertilisation. Ils s'appliquent (à titre préliminaire) sur des sols définis par des organisations texturales différentes (tableau III).

Tableau III.

Texture du sol	Fertilisation
A Argileux	F0 Pas d'apport, monoculture
AS Argilo-sableux	F1 Fumure vulgarisée
SA Sablo-argileux	F2 Fumure "type station"
Travail du sol	Protection du sol (en préparation)
W0 Manuel	CM Couverture morte
W1 Superficiel + Sarclage	CV Couverture vivante
W2 Profond + Maîtrise	ASS Association

En se référant au tableau d'identification des facteurs et de leur effet sur le fonctionnement de l'hydrosystème parcelle, il a été proposé de tester les paramétrages suivants au cas de l'essai maïs de Nioro du Rip, et d'en analyser les effets d'amélioration sur la loi de variation de l'indicateur IRESP2 (tableau IV).

Tableau IV. Présentation des paramètres intervenant dans les fonctions d'estimation de l'indicateur IRESP2.

Coefficient cultural en fonction de la fertilité : $KC(f) = f^* KC$				
	F0	F1	F2	
f	0,70	0,85	1,00	
Vitesse racinaire en fonction de la fertilité et de la texture du sol : $VRac = t^* f(cm/j)$				
	A	AS	SA	S
t	0,50	1,00	2,00	2,50
Correction de la vitesse racinaire en fonction du travail du sol : $VRac (W) = w^* VRac (cm/j)$				
	W0	W1	W2	
w	0,50	1,50	2,50	
Réserve utile en fonction de la texture (mm/cm)				
	A	AS	SA	S
CR	1,50	1,00	0,80	0,60
Etat de surface et pluie utile en fonction de la texture et du travail du sol				
	W0	W1	W2	W3
A	(3)	2	2	1
AS	2	2	1	0
SA	2	1	0	0
S	1	0	0	0

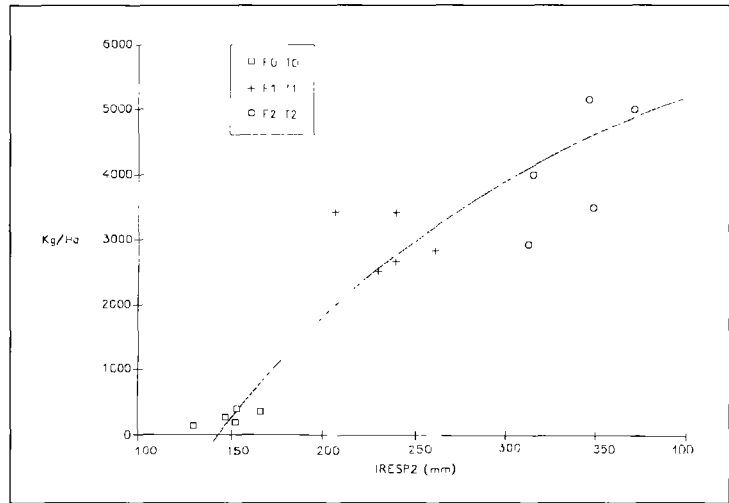
(3) Etat de surface très dégradé, sensibilité maximale au ruissellement.

Relation rendement/intensification du maïs à Nioro du Rip

En ayant appliqué les règles présentées dans les tableaux de correspondance, le logiciel SARRA a calculé les termes du bilan hydrique et autorisé une première analyse de la loi de variation dans le temps des couples IRESP2-rendement propres à chaque traitement. En rassemblant les points sur un même repère (figure 3), on constate qu'une seule courbe peut être obtenue.

Ce résultat confirme bien les hypothèses de base tendant à considérer qu'il existe des lois générales de redistribution des flux d'énergie et d'eau qui conditionnent le fonctionnement biologique de la culture. On notera ainsi que la fonction ETRM est bien déterminée par le

Figure 3. Réponse du maïs à l'eau à Nioro du Rip. Simulation effectuée par le modèle SARRA.

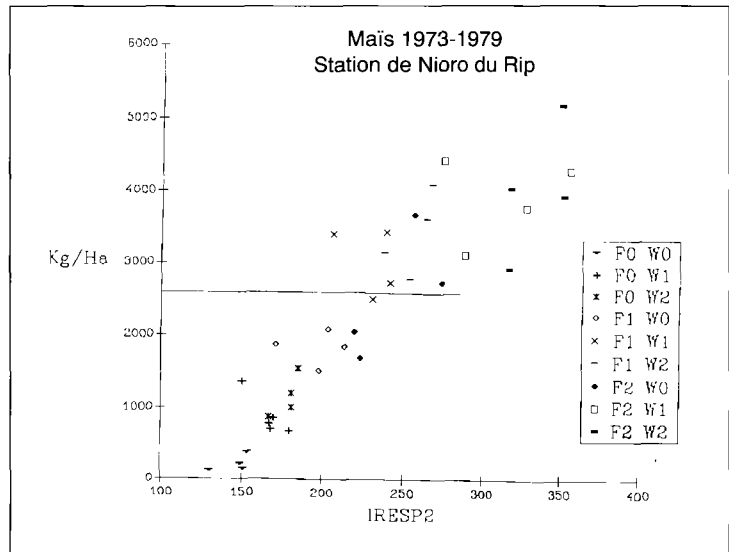


climat local (ETP) croisé avec le niveau de croissance et de développement (LAI) de la culture. Cette liaison a été mise en évidence par Affholder à Nioro du Rip [15].

Cette relation entre l'indicateur IRESP2 et le rendement pour l'intervalle 0-6000 kg/ha quels que soient les traitements confirme les travaux de Girard *et al* portant sur la relation IRESP2/rendements espérés en conditions de maîtrise agronomique [5].

En admettant la fiabilité de la relation ainsi trouvée, il est désormais possible d'étudier des scénarios sur des séries pluviométriques de longue durée et de calculer les rendements espérés pour chaque paquet technique (figure 4). Les conditions favorables sont ainsi remplies par un travail d'analyse micro-macroéconomique où il serait possible de coupler

Figure 4. Relation rendement/indicateur IRESP2 pour neuf niveaux d'intensification agronomiques combinant travail du sol et fertilisation.



les productivités brutes ainsi identifiées dans leur variabilité avec des informations sur les charges et coûts d'exploitation.

Une analyse sommaire, fixant le coût de la maîtrise agronomique à 2500 kg/ha, pour le niveau F2 T2 montrerait, en consultant la courbe calculée sur une période de longue durée, que ce niveau d'intensification n'est pas le plus intéressant et que la voie la plus sûre à recommander pour faire progresser le rendement mais aussi la marge de l'exploitant passe bien par une analyse du risque agroclimatique.

Conclusion et perspectives

Des travaux similaires ont été réalisés sur les cultures d'arachide, de riz pluvial, de sorgho, et de coton. Toutes ces tentatives sont apparues concluantes : l'indicateur IRESP2 constitue un mode de diagnostic rapide bioclimatologiquement fondé puisqu'il s'appuie sur le principe de la conservation de l'énergie : eau et biomasse.

Cette démarche ouvre ainsi la voie au couplage des outils de diagnostics agroclimatiques et économiques; elle doit donc être renforcée et affinée : d'une part, en précisant mieux les lois de paramétrage, à l'aide d'observations et de mesures *in situ*, objet de la seconde phase (STD3) du programme R3S ; d'autre part, bien que cela soit complexe, en reconsidérant la parcelle dans son environnement. Il faudra mieux apprécier les flux d'énergie susceptibles d'être consommés (sous la forme ETR) par la culture intensifiée, dans la mesure où l'advection locale, régionale, mécanisme naturel en milieu semi-aride, risque d'entraîner une surconsommation hydrique des cultures intensifiées, d'autant plus probable que les techniques coûteuses visant à recharger le stock d'eau du sol auront été appliquées (thème du GAP).

Dans ces conditions le rôle des agroclimatologistes est d'alerter les agronomes et responsables du développement sur le risque agroclimatique lié au processus d'intensification.

Un grand pas sera fait à l'aide du modèle SARRA, lorsque l'on sera en mesure d'évaluer dans chaque zone agroécologique le supplément de besoin en eau, le coût en millimètre d'eau supplémentaire lié à l'apport d'une unité fertilisante, et d'en analyser la faisabilité agroéconomique pour l'agriculteur.

Références

1. Vaksman M., Traoré M. (1991). Suivi évaluation de la production agricole au Mali. Projet ESPACE IER-CIRAD/Bamako, Mali.
2. Reyniers F.N., Forest F. (1990). La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. Sécheresse 1 : 36-9.
3. Somé L. (1989). Diagnostic agropédoclimatique du risque de sécheresse au Burkina-Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse de diplôme de doctorat. Spécialité physiologie, biologie des organismes et des populations. Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 312 p.

4. Traoré S., Valet S. (1988). Zonage des potentialités agroclimatiques pour les principales cultures pluviales au Mali. IER/CIRAD-CA, projet sol-eau-plante, Bamako, Mali.
5. Girard X., Adri K. (1991). Potentialités de la maïsiculture pluviale en Afrique soudano-sahélienne. INSAH/R3S/CIRAD, Lomé, Togo.
6. Reyniers F.N. (1991). Diagnostic de l'alimentation hydrique des cultures pluviales. Actes des journées DRN CIRAD, 12-15/9/89, Montpellier.
7. Forest F., Cortier B. (1991). Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. CIRAD-CA/AGRHYMET. IAHS, 199 : 547-57.
8. Forest F., Lidon B. (1986). Simulation du bilan hydrique pour l'explication du rendement et l'appui aux producteurs. La sécheresse en zone intertropicale pour une lutte intégrée. Edit. CIRAD : 55-65.
9. Cortier B., Pochier G., Imbernon J. (1988). Le maïs au Sénégal. Effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. L'Agron. Trop., 43 : 85-90.
10. Fréteaud J.P., Poss R., Saragoni H. (1987). Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensionneutroniques *in situ* sous culture de maïs. L'Agron. Trop. 1987, 42-4 : 94-102.
11. Rousseau V. (1989). Caractérisation du bilan hydrique sur le terrain agricole de Kassela. Conséquences sur la variabilité du rendement. Projet ESPACE CIRAD-IER/Bamako, Mali.
12. Paques C. (1990). Influence du ruissellement sur le bilan hydrique et la productivité des cultures pluviales sur le terroir de Kassela. Projet ESPACE CIRAD-IER/Bamako, Mali.
13. Imbernon J. *et al* (1990). Suivi de la désertification au Sahel, caractérisation et contribution à l'élaboration d'un modèle de prévision du rendement du mil. CEE DG XII. CIRAD-INRA.
14. Affholder F. (1991). Influence de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement sur l'efficacité de l'eau et la production du mil pluvial. Atelier GAP/R3S, Bamako, décembre 1992.
15. Cissé L., Vachaud G. (1988). Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transfert hydrique et l'évaporation d'un sol sableux dégradé au nord du Sénégal. Hydrologie continentale, ORSTOM 2, 15, 28.
16. Chopart J.L. (1991). Optimisation de l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier par les techniques culturales dans les zones à pluviosité irrégulière, projet R3S/PF2. IDESSA/Côte-d'Ivoire.
17. Ségué L. *et al* (1989). Des modes de gestion mécanisés des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol. Cas des Cerrados du Centre-Ouest brésilien CIRAD-CA-EMBRAPA, 156 p.
18. Forest F., Reyniers F.N. (1986). Proposals for the classification of agroclimatologic situations of upland rice in terms of water balance. Symposium Progress in upland rice. IRRI. Djakarta.
19. Valentin P. (1989). Les états de surface des savanes de l'Ouest africain. Relations avec les sols et incidences sur l'économie de l'eau. ORSTOM/Paris.
20. Albergel J., Pérez P., Vaksman M. (1991). Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. Soil Water Balance in the Sudano Sahelian Zone. IAHS Publ. 199 : 483-96.
21. Clopes A., Baron C. (1991). Présentation du logiciel SARRA, Système d'analyse régionale du risque agroclimatique. CIRAD-CA/Montpellier.
22. Marquette J. (1986). Maintien et amélioration des rendements du maïs sur les terres de Barre dans le Sud Togo. L'Agron. Trop. 41 : 132-48.
23. Hamon (1980). Mise en œuvre et critique de méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Applications aux sols de culture du Sénégal. Thèse de doctorat-ingénieur, Institut de mécanique de Grenoble, 136 p.

24. Chopart J.L., Nicou R., Vachaud G. (1979). Le travail du sol et le mulch pailleux. Influences comparées sur l'économie de l'eau dans le système arachide/mil au Sénégal. *In* : "Isotopes and radiation in research on soil plan relationships". International atomic energy agency. Vienna, 199-221.
25. Cissé L. (1988). Influence de la matière organique sur l'alimentation hydrique des cultures de mil et d'arachide en région centre-nord du Sénégal. Thèse université ISRA-IMG/Grenoble.
26. Dancette C. (1983). Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.* 38 : 281-92. CIEH collectif. Atelier de valorisation agricole des ressources pluviométriques. Ouagadougou.
27. Forest F., Cortier B. (1988). Cellule diagnostic hydrique des cultures et prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. CIRAD-CA/AGRHYMET.
28. Fréteaud J.P., Imbernon J., Charoy J. (1982). Conduite d'une irrigation à l'aide de l'humidimètre à neutron. Document interne CIRAD-CA.
29. Reyniers F.N., Forest F. (1988). Improving the water supply and its efficiency in sub saharan rainfed agriculture. *In* "Irrigated agriculture in Africa". Ed. CTA.
30. Traoré S., Valet S. (1990). Zonage des potentialités agroclimatiques pour les principales cultures pluviales au Mali. IER/CIRAD-CA, projet sol-eau-plante, Bamako, Mali.

2

Analyse des risques de déficit hydrique au cours des différentes phases phénologiques du mil précoce au Niger. Conséquences agronomiques

M. ELDIN

ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier, France

Objet de l'étude

Originaire d'Afrique, croissant dans des zones arides jusqu'aux confins du désert, le mil (*Pennisetum typhoides*) est une graminée rustique adaptée aux régions sahéliennes. Céréale ancestrale de valeur énergétique élevée, le mil y constitue l'élément traditionnel le plus important, la base essentielle de l'autosuffisance alimentaire. Le mil représente 73 % de la production céréalière du Niger, où cette culture (pure ou en association avec le niébé) couvre 3,2 millions d'hectares, soit 53 % des superficies cultivées.

De 1971 à 1985, la superficie emblavée en mil a augmenté de 2,7 % et les rendements sont restés pratiquement stables (0,8 %), ce qui conduit à une augmentation de production de l'ordre de 2,9 % en 15 ans (Source MP/DAEP, 1986, et Ministère de l'Agriculture/Groupe Développement rural).

Le rendement du mil au Niger est extrêmement bas : moyenne interannuelle de l'ordre de 400 kg/ha, traduisant une pluviosité extrêmement aléatoire et des pratiques culturales très extensives.

La pression démographique est très forte : le taux de natalité du Niger (3 %) est l'un des plus élevés du monde ; la population — estimée actuellement à 6,3 millions d'habitants — a doublé au cours des 25 dernières années et atteindra 10 millions de personnes en l'an 2000. L'augmentation de production est obtenue non pas au moyen d'une élévation du rendement, mais par le biais de l'extension des surfaces mises en culture. Cette pratique entraîne des conséquences graves à long terme : protection insuffisante des sols, érosion, raccourcissement de la durée moyenne de la jachère, perte de fertilité des sols, diminution des surfaces recouvertes d'arbustes ou de parcours pour le bétail... Il semble donc qu'il faille s'orienter vers des recherches conduisant à l'augmentation et à la sécurisation des rendements de mil.

Il a déjà été montré [1] que les chances de réussite du mil au Niger (mil non photopériodique, semé après la pluie) sont d'autant plus grandes que le semis est plus précoce. Sivakumar met en évidence une corrélation entre la précocité de la saison des pluies et sa durée (période de culture) qui explique ce résultat.

Mais l'agriculteur n'est pas maître de la pluie et il sème dès que la pluie le permet, c'est-à-dire souvent trop tard pour que la culture puisse éviter un déficit hydrique de fin de cycle.

L'objet de cette communication est de montrer qu'il est possible d'augmenter et de sécuriser la production de mil au Niger de façon très significative par le choix de cultivars à longueurs de cycle différentes, suivant la précocité de la pluie qui permet le semis.

Exemple de la région de Niamey

Le cultivar le plus largement utilisé et conseillé par l'INRAN (Institut national de recherche agronomique du Niger) dans la région de Niamey est le cultivar HKP dont la durée de cycle est de 90 jours. Nous nous proposons de montrer que l'utilisation judicieuse de 3 cultivars ayant des durées de cycle de 70 jours, 90 jours et 110 jours au lieu du seul cultivar HKP, permettrait d'augmenter et de sécuriser la production de mil dans cette zone et dans toutes les zones à mil du Niger.

Méthode

Elle consiste à simuler sur un grand nombre d'années le développement d'un cultivar de mil de durée de cycle donné en fonction de la pluviosité de l'année, pour toutes les dates de semis possibles.

Le modèle utilisé repose sur les hypothèses suivantes :

1) Le semis est considéré comme possible à la fin de la i ème décade de l'année si la pluie de cette décade $P(i)$ et celle de la décade précédente $P(i-1)$ répondent aux conditions suivantes :

$$P(i) > 20 \text{ mm ou } P(i) > 10 \text{ mm avec } P(i-1) + P(i) > 35 \text{ mm}$$

2) L'installation de la culture (la levée) est considérée comme réussie, pour un semis réalisé à la fin de la ième décade, si :

$$P(i+1) > 10 \text{ mm et } P(i+2) > 10 \text{ mm et } P(i+1) + P(i+2) > 30 \text{ mm}$$

Si la condition n'est pas remplie, il y a "échec initial" de la culture, mais, après avoir constaté cet échec, l'agriculteur a la possibilité de réaliser un nouveau semis si les précipitations le lui permettent.

3) Si l'installation de la culture se fait bien, on considérera que la récolte sera correcte et la culture réussie pour la date de semis considérée si les plants de mil ne subissent pas un déficit hydrique "terminal" au cours de la période de grande sensibilité au manque d'eau qui s'étend sur 30 jours, du 40^e au 10^e jour avant la récolte pour des cultivars de durée de cycle < 90 jours et sur 40 jours, du 50^e au 10^e jour avant la récolte pour des cultivars de durée de cycle > 90 jours.

On considère que le cultivar passera sans trop de dégât cette période critique de 30 ou 40 jours, si l'on n'observe pas au cours de celle-ci 2 décades consécutives présentant une pluviométrie < 20 mm et si la pluviométrie totale de la période est > 75 mm pour une période de 30 jours ou > 100 mm pour une période de 40 jours. On souhaite donc que la culture puisse disposer en moyenne d'au moins 2,5 mm d'eau par jour et ne subisse pas de période sans pluie de plus de 10 jours.

Si ces conditions ne sont pas remplies, on notera que, pour la date de semis correspondante, la culture a échoué du fait d'un déficit terminal.

Si, au cours d'une année, aucun semis n'est possible ou si aucun semis n'a permis une installation correcte de la culture, l'année est notée comme inapte à la culture de mil.

Il y donc trois causes possibles d'échec de la culture :

- semis impossible ;
- échec initial (installation défectueuse) ;
- échec terminal (déficit hydrique postfloral, de fin de cycle).

4) Ces hypothèses — même si elles essayent de coller le plus possible à la pratique paysanne de culture du mil au Niger — ont forcément un caractère un peu arbitraire. Les probabilités de succès ou d'échec calculées sur la base de ces hypothèses n'ont donc aucune prétention de précision en elles-mêmes. Il faut les considérer comme des "indices" de succès ou d'échec ayant une valeur relative et dont le grand intérêt est de permettre la comparaison des différentes simulations réalisées sur le choix des cultivars et des dates de semis.

Résultats de la simulation pour la région de Niamey

Ils sont présentés dans le tableau I, pour 5 longueurs de cycle possible : 70, 80, 90, 100 et 110 jours, et pour 6 dates de semis possibles : de la fin de la 14^e décade (21 mai) à la fin de la 19^e décade (11 juillet).

Les abréviations utilisées ont le sens suivant :

- NASI = Nombre d'années où le semis a été impossible
- NASP = Nombre d'années où le semis a été possible

- PET = Pourcentage d'échec total, c'est-à-dire pour l'ensemble des dates de semis considérées
 NSEM = Nombre de semis, pour la date considérée
 NEI = Nombre d'échecs initiaux, pour la date considérée
 NET = Nombre d'échecs terminaux, pour la date considérée
 NS = Nombre de cas de succès du cultivar étudié, pour la date considérée

Pour une date de semis donnée, on a :

$$NS = NSEM - NEI - NET$$

On peut noter les résultats suivants :

1) Le pourcentage d'échec total (PET) augmente de 15 à 51 % quand on passe d'un cultivar de 70 jours à un cultivar de 110 jours.

2) Le pourcentage de réussite de la culture (NS %) est le même pour les cultivars de 90, 100 et 110 jours pour des dates de semis précoces (fin de la 14^e décade). Ce résultat est important : il signifie que si les pluies de l'année permettent un semis précoce (courant mai), on ne prend aucun risque supplémentaire à utiliser un cultivar de 110 jours à la place du cultivar de 90 jours. Par contre, on peut attendre de ce choix une substantielle augmentation de rendement (durée de cycle augmentée de plus de 20 %).

3) Pour des dates de semis tardives (fin de la 18^e et de la 19^e décade), le pourcentage de succès (NS %) augmente très sensiblement si l'on utilise des cultivars à cycles plus courts :

	Cult. de 70 j.	Cult. de 80 j.	Cult. de 90 j.
Semis effectué fin 18 ^e décade	NS % = 93 %	NS % = 87 %	NS % = 80 %
Semis effectué fin 19 ^e décade	NS % = 100 %	NS % = 71 %	NS % = 29 %

Ainsi, pour un semis effectué début juillet (fin de la 19^e décade), on augmentera de 29 à 100 % les chances de succès de la culture, en choisissant un cultivar de 70 jours plutôt que le cultivar traditionnel de 90 jours.

4) Le cultivar de 90 jours est parfaitement adapté à des dates de semis allant de la fin de la 15^e décade (fin mai) à la fin de la 17^e décade (21 juin).

5) Compte tenu des résultats précédents, on peut faire, pour la région de Niamey, les recommandations suivantes :

– Semis possibles avant le 21 mai :

Choisir un cultivar de 110 jours pour une probabilité de réussite espérée voisine de 100 %.

– Semis possibles entre le 21 mai et le 21 juin :

Choisir un cultivar de 90 jours pour une probabilité de réussite supérieure à 78 %.

– Semis possibles entre le 21 juin et le 21 juillet :

Choisir un cultivar de 70 jours pour une probabilité de réussite supérieure à 93 %.

Ne pas semer avant le 11 mai ou après le 11 juillet. Les risques de faux départs ou d'échec terminal sont trop importants. La simulation montre en effet que les pourcentages de réussite pour ces dates-là sont extrêmement faibles (< 20 %).

6) On a évalué les chances de réussite des deux stratégies possibles suivantes : Utilisation d'un seul cultivar de 90 jours *ou* utilisation de trois cultivars de 70, 90 et

110 jours en suivant les recommandations énoncées ci-dessus. Pour cela, on a calculé un taux de réussite (TR %) de la stratégie considérée en effectuant une moyenne pondérée des NS % de toutes les dates de semis possibles, en pondérant les NS % de chaque date de semis par le NSEM correspondant.

– Stratégie “1 seul cultivar de 90 jours”

$$TR \% = \frac{6 \times 100 + 9 \times 78 + 15 \times 93 + 19 \times 79 + 15 \times 80 + 7 \times 29}{71} = 79 \%$$

– Stratégie “3 cultivars”

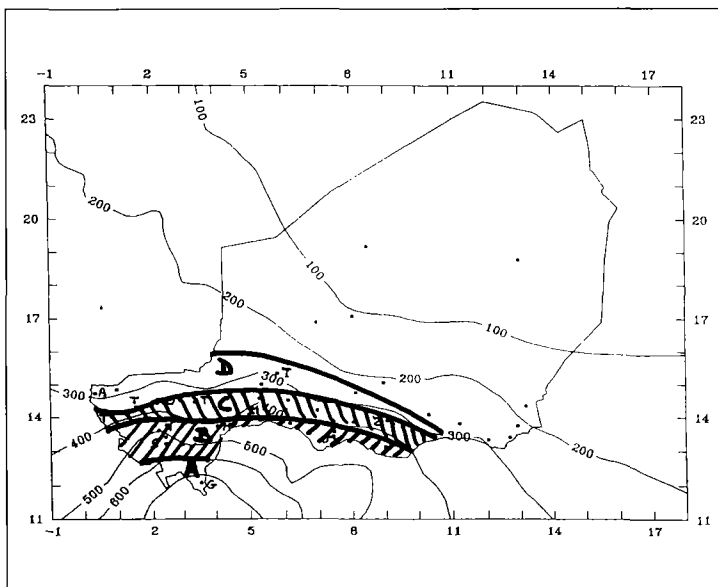
$$TR \% = \frac{6 \times 100 + 9 \times 78 + 15 \times 93 + 19 \times 79 + 15 \times 93 + 7 \times 100}{71} = 89 \%$$

La stratégie “trois cultivars” permet d’augmenter de 10 % le taux de réussite de la culture de mil, tout en obtenant une appréciable augmentation du rendement moyen interannuel.

Extension de la méthode à l’ensemble des zones à mil du Niger

La méthode décrite ci-dessus a été appliquée aux différentes stations du Niger situées dans la zone de production du mil et qui disposaient de données pluviométriques sur un grand nombre d’années (> 30 ans) : Gaya, Niamey, Say, Maradi, Tillabery, Tera, Ouallam, Zinder, Tahoua, Toukounis, Ayorou (cf. tableaux I à VI).

Les résultats obtenus permettent de proposer des recommandations pour la culture du mil au Niger adaptées aux 4 zones qu’il a été possible d’identifier (carte 1).



Carte 1. Zone de culture du mil au Niger.

Zone A : zone de Gaya

On peut sans problème semer un mil à cycle long (100-110 j) de début mai à début juillet. En fait, on se trouve dans une zone bien arrosée, où l'on peut préférer la culture du sorgho à celle du mil.

Zone B : zone de Niamey et Say, et zone de Maradi

Les résultats et recommandations ont été exposés au paragraphe "Résultats de la simulation pour la région de Niamey".

Zone C : zone de Tera et Ouallam et zone de Zinder

On peut semer le mil de fin mai à début juillet. Pour des semis réalisés avant début juin, on peut choisir un mil à cycle long (100-110 j). Pour des semis réalisés entre le 1^{er} et le 20 juin, on choisira un mil de 90 jours. Après cette date, il convient d'utiliser un mil à cycle court (70-80 jours).

Zone D : zone de Tillabery et Ayorou et zone de Tahoua, Toukounis

On est à la limite de la zone où l'on peut encore cultiver le mil. Seuls les semis réalisés en juin et début juillet ont quelques chances de succès.

On choisira un mil de 90 jours pour les semis réalisés avant le 20 juin et un mil de 70 jours pour les semis réalisés fin juin ou début juillet.

Le respect de ces recommandations devrait se traduire par un gain de rendement et surtout par une sécurisation importante de la production de mil au Niger, face aux aléas de la pluviométrie.

Tableau I. Zone A.

Niger/Niamey – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 74				NASI = 3		NASP = 71		PET = 15 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	6	0	0	0	0	6	100	0
15	9	2	22	0	0	7	78	22
16	15	1	7	1	7	13	87	13
17	19	4	21	2	11	13	68	32
18	15	1	7	0	0	14	93	7
19	7	0	0	0	0	7	100	0

Niger/Niamey – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 74				NASI = 3		NASP = 71		PET = 16 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	6	0	0	0	0	6	100	0
15	9	2	22	0	0	7	78	22
16	15	1	7	0	0	14	93	7
17	19	4	21	1	5	14	74	26
18	15	1	7	1	7	13	87	13
19	7	0	0	2	29	5	71	29

Tableau I. Zone A (suite).

Niger/Niamey – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 74				NASI = 3		NASP = 71		PET = 20 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	6	0	0	0	0	6	100	0
15	9	2	22	0	0	7	78	22
16	15	1	7	0	0	14	93	7
17	19	4	21	0	0	15	79	21
18	15	1	7	2	13	12	80	20
19	7	0	0	5	71	2	29	71

Niger/Niamey – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 74				NASI = 3		NASP = 71		PET = 36 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	6	0	0	0	0	6	100	0
15	9	2	22	0	0	7	78	22
16	15	1	7	2	13	12	80	20
17	19	4	21	4	21	11	58	42
18	15	1	7	7	47	7	47	53
19	7	0	0	6	86	1	14	86

Niger/Niamey – Calage d'un mil de 110 jours								
Nombre d'années utilisées : 74				NASI = 3		NASP = 71		PET = 51 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	6	0	0	0	0	6	100	0
15	9	2	22	1	11	6	67	33
16	15	1	7	4	27	10	67	33
17	19	4	21	8	42	7	37	63
18	15	1	7	10	67	4	27	73
19	7	0	0	7	100	0	0	100

Tableau II. Zone B.

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 13 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	0	0	0	0	2	100	0
15	5	0	0	1	20	4	80	20
16	7	0	0	0	0	7	100	0

Tableau II. Zone B (suite).

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 13 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
17	3	0	0	0	0	3	100	0
18	10	0	0	0	0	10	100	0
19	9	2	22	0	0	7	78	22
20	8	1	13	1	13	6	75	25
21	3	0	0	1	33	2	67	33

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 21 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	0	0	0	0	2	100	0
15	5	0	0	0	0	5	100	0
16	7	0	0	0	0	7	100	0
17	3	0	0	0	0	3	100	0
18	10	0	0	1	10	9	90	10
19	9	2	22	1	11	6	67	33
20	8	1	13	2	25	5	63	38
21	3	0	0	3	100	0	0	100

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 34 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	0	0	0	0	2	100	0
15	5	0	0	0	0	5	100	0
16	7	0	0	0	0	7	100	0
17	3	0	0	0	0	3	100	0
18	10	0	0	2	20	8	80	20
19	9	2	22	2	22	5	56	44
20	8	1	13	6	75	1	13	88
21	3	0	0	3	100	0	0	100

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 51 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	0	0	0	0	2	100	0
15	5	0	0	0	0	5	100	0

Tableau II. Zone B (suite).

Niger/Maradi – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 47				NASI = 0		NASP = 47		PET = 51 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	0	0	7	100	0
17	3	0	0	1	33	2	67	33
18	10	0	0	5	50	5	50	50
19	9	2	22	5	56	2	22	78
20	8	1	13	7	88	0	0	100
21	3	0	0	3	100	0	0	100

Tableau III. Zone C.

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 33				NASI = 3		NASP = 30		PET = 39 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	1	50	0	0	1	50	50
15	5	1	20	0	0	4	80	20
16	3	2	67	1	33	0	0	100
17	8	4	50	0	0	4	50	50
18	4	2	50	0	0	2	50	50
19	8	2	25	0	0	6	75	25

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 33				NASI = 3		NASP = 30		PET = 39 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	1	50	0	0	1	50	50
15	5	1	20	0	0	4	80	20
16	3	2	67	0	0	1	33	67
17	8	4	50	0	0	4	50	50
18	4	2	50	0	0	2	50	50
19	8	2	25	1	13	5	63	38

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 33				NASI = 3		NASP = 30		PET = 55 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	1	50	0	0	1	50	50
15	5	1	20	0	0	4	80	20
16	3	2	67	0	0	1	33	67

Tableau III. Zone C (suite).

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 33				NASI = 3		NASP = 30		PET = 55 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
17	8	4	50	0	0	4	50	50
18	4	2	50	2	50	0	0	100
19	8	2	25	4	50	2	25	75

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 32				NASI = 3		NASP = 29		PET = 59 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	1	50	0	0	1	50	50
15	5	1	20	0	0	4	80	20
16	2	1	50	0	0	1	50	50
17	8	4	50	1	13	3	38	63
18	4	2	50	2	50	0	0	100
19	8	2	25	5	63	1	13	88

Niger/Ouallam – Calage d'un mil de 110 jours								
Nombre d'années utilisées : 32				NASI = 3		NASP = 29		PET = 66 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	1	50	0	0	1	50	50
15	5	1	20	0	0	4	80	20
16	2	1	50	0	0	1	50	50
17	8	4	50	2	25	2	25	75
18	4	2	50	2	50	0	0	100
19	8	2	25	6	75	0	0	100

Tableau IV. Zone C.

Niger/Zinder – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 72				NASI = 8		NASP = 64		PET = 29 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	2	100	0	0	0	0	100
15	8	3	38	1	13	4	50	50
16	4	1	25	0	0	3	75	25
17	10	4	40	0	0	6	60	40
18	15	4	27	0	0	11	73	27
19	25	3	12	3	12	19	76	24

Tableau IV. Zone C (suite).

Niger/Zinder – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 72				NASI = 8		NASP = 64		PET = 35 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	2	100	0	0	0	0	100
15	8	3	38	1	13	4	50	50
16	4	1	25	0	0	3	75	25
17	10	4	40	1	10	5	50	50
18	15	4	27	2	13	9	60	40
19	25	3	12	4	16	18	72	28

Niger/Zinder – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 72				NASI = 8		NASP = 64		PET = 54 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	2	100	0	0	0	0	100
15	8	3	38	0	0	5	63	38
16	4	1	25	0	0	3	75	25
17	10	4	40	1	10	5	50	50
18	15	4	27	4	27	7	47	53
19	25	3	12	17	68	5	20	80

Niger/Zinder – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 71				NASI = 8		NASP = 63		PET = 63 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
14	2	2	100	0	0	0	0	100
15	8	3	38	0	0	5	63	38
16	4	1	25	0	0	3	75	25
17	10	4	40	3	30	3	30	70
18	15	4	27	6	40	5	33	67
19	24	3	13	19	79	2	8	92

Niger/Zinder – Calage d'un mil de 110 jours								
Nombre d'années utilisées : 71				NASI = 8		NASP = 63		PET = 73 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec
14	2	2	100	0	0	0	0	100
15	8	3	38	0	0	5	63	38
16	4	1	25	1	25	2	50	50
17	10	4	40	3	30	3	30	70
18	15	4	27	10	67	1	7	93
19	24	3	13	21	88	0	0	100

Tableau V. Zone D.

Niger/Tahoua – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 56				NASI = 1		NASP = 55		PET = 34 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
15	2	0	0	1	50	1	50	50
16	6	1	17	1	17	4	67	33
17	6	2	33	1	17	3	50	50
18	14	2	14	0	0	12	86	14
19	14	3	21	3	21	8	57	43
20	13	2	15	3	23	8	62	38

Niger/Tahoua – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 56				NASI = 1		NASP = 55		PET = 43 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
15	2	0	0	0	0	2	100	0
16	6	1	17	1	17	4	67	33
17	6	2	33	1	17	3	50	50
18	14	2	14	0	0	12	86	14
19	14	3	21	5	36	6	43	57
20	13	2	15	7	54	4	31	69

Niger/Tahoua – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 56				NASI = 1		NASP = 55		PET = 64 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
15	2	0	0	1	50	1	50	50
16	6	1	17	2	33	3	50	50
17	6	2	33	2	33	2	33	67
18	14	2	14	2	14	10	71	29
19	14	3	21	8	57	3	21	79
20	13	2	15	11	85	0	0	100

Niger/Tahoua – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 56				NASI = 1		NASP = 55		PET = 80 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
15	2	0	0	1	50	1	50	50
16	6	1	17	2	33	3	50	50
17	6	2	33	3	50	1	17	83
18	14	2	14	7	50	5	36	64
19	14	3	21	11	79	0	0	100
20	13	2	15	11	85	0	0	100

Tableau V. Zone D (suite).

Niger/Tahoua – Calage d'un mil de 110 jours								
Nombre d'années utilisées : 56				NASI = 1		NASP = 55		PET = 88 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
15	2	0	0	1	50	1	50	50
16	6	1	17	2	33	3	50	50
17	6	2	33	4	67	0	0	100
18	14	2	14	10	71	2	14	86
19	14	3	21	11	79	0	0	100
20	13	2	15	11	85	0	0	100

Tableau VI. Zone D.

Niger/Tillabery – Calage d'un mil de 70 jours								
Nombre d'années utilisées : 57				NASI = 1		NASP = 56		PET = 21 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	1	14	6	86	14
17	10	1	10	0	0	9	90	10
18	14	2	14	0	0	12	86	14
19	14	3	21	3	21	8	57	43
20	11	0	0	2	18	9	82	18

Niger/Tillabery – Calage d'un mil de 80 jours								
Nombre d'années utilisées : 57				NASI = 1		NASP = 56		PET = 35 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	0	0	7	100	0
17	10	1	10	0	0	9	90	10
18	14	2	14	1	7	11	79	21
19	14	3	21	5	36	6	43	57
20	11	0	0	8	73	3	27	73

Niger/Tillabery – Calage d'un mil de 90 jours								
Nombre d'années utilisées : 57				NASI = 1		NASP = 56		PET = 44 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	0	0	7	100	0
17	10	1	10	1	10	8	80	20
18	14	2	14	1	7	11	79	21
19	14	3	21	7	50	4	29	71
20	11	0	0	10	91	1	9	91

Tableau VI. Zone D (suite).

Niger/Tillabery – Calage d'un mil de 100 jours								
Nombre d'années utilisées : 57				NASI = 1		NASP = 56		PET = 65 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	1	14	6	86	14
17	10	1	10	2	20	7	70	30
18	14	2	14	8	57	4	29	71
19	14	3	21	9	64	2	14	86
20	11	0	0	11	100	0	0	100

Niger/Tillabery – Calage d'un mil de 110 jours								
Nombre d'années utilisées : 57				NASI = 1		NASP = 56		PET = 79 %
Décade	NSEM	NEI	NEI %	NET	NET %	NS	NS %	Echec %
16	7	0	0	2	29	5	71	29
17	10	1	10	5	50	4	40	60
18	14	2	14	11	79	1	7	93
19	14	3	21	10	71	1	7	93
20	11	0	0	11	100	0	0	100

Référence

1. Sivakumar M.V.K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. Agr. Forest Meteorology. 42 : 295-305.

3

Réduction de l'impact du climat sur le calendrier agricole au Sahel

B. DIARRA, K. KONARE

Service météorologique du Mali

Introduction

La sécheresse récurrente qui caractérise le climat des pays du Sahel exerce une forte contrainte sur leur agriculture et entrave ainsi leur développement économique. Afin de réduire cette contrainte, les services météorologiques [1] tentent de développer des méthodologies d'assistance, parmi lesquelles l'aide à la décision dans la mise en œuvre du calendrier agricole, celui-ci n'étant plus maîtrisé par le paysan sahélien.

Cette étude concerne l'établissement d'un calendrier prévisionnel de semis au Mali [2]. Il est basé sur l'analyse statistique des résultats de simulation du bilan hydrique, dont le modèle est celui développé par l'Institut de recherches agronomiques tropicales (IRAT) [3] en 1982 à partir des travaux de F. Forest et de P. Franquin [4].

Outre son importance dans la planification des travaux de début de campagne agricole, son application permet :

- d'éviter la perte de semences (de plus en plus sélectionnées et chères) ;
- d'éviter les resemis qui peuvent réduire la durée de la période favorable de végétation et donc la production ;
- d'augmenter les chances de succès des spéculations en profitant des périodes prévisibles de disponibilité en eau.

Principe de base de la simulation du bilan hydrique

Le modèle utilisé (BIP) est basé sur la caractérisation des conditions hydriques de la culture selon une échelle de temps plus ou moins fine (pentade ou décade).

Le principe est de résoudre l'équation générale du bilan hydrique dans tous ses termes :

$$P + (I) \pm \text{Ruiss.} \pm \text{Dr} + H - \text{ETR} = 0$$

avec P (pluie), I (irrigation), Ruiss. (ruissellement), Dr (drainage),
H (variation du stock d'eau), ETR (évapotranspiration).

Malgré la complexité de cette équation, le modèle utilisé est pratique et relativement précis. La qualité des résultats dépend de la précision des données de base et de la validité des hypothèses de travail en ligne.

Son originalité est :

- de tester un seuil pluviométrique pour le semis ;
- de faire appel à un système de simulation de l'humectation du sol ;
- d'utiliser à la fois, pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, des coefficients culturaux ($k_c = \text{ETM}/\text{ETP}$) et l'algorithme d'Eagelman ($\text{ETR} = f [\text{HR}/\text{ETP}]$).

Un organigramme général est élaboré donnant ainsi les étapes de la simulation du bilan hydrique (figure 1).

Le modèle utilise comme données la description de la culture, les façons culturales, les caractéristiques climatiques et pédologiques [5] reprises dans le tableau I. Ces données sont entrées dans le modèle sous un mode conversationnel.

Tableau I. Données utilisées dans le logiciel du bilan hydrique

Description de la culture	Façons culturales	Données climatiques	Données pédologiques	Caractérisation de l'irrigation
Type de cultures	Travail du sol	Pluie journalière	Capacité de rétention	Dose de mise en culture
Longueur du cycle	Pluie de semis (seuil)	Evapotranspiration potentielle (ETP)	Réserve utile du sol	Dose d'irrigation
Coefficients culturaux (Kc)	Date de semis (ou repiquage)		Seuil de ruissellement	
Période de végétation			Coefficient de ruissellement	
Vitesse d'enracinement				

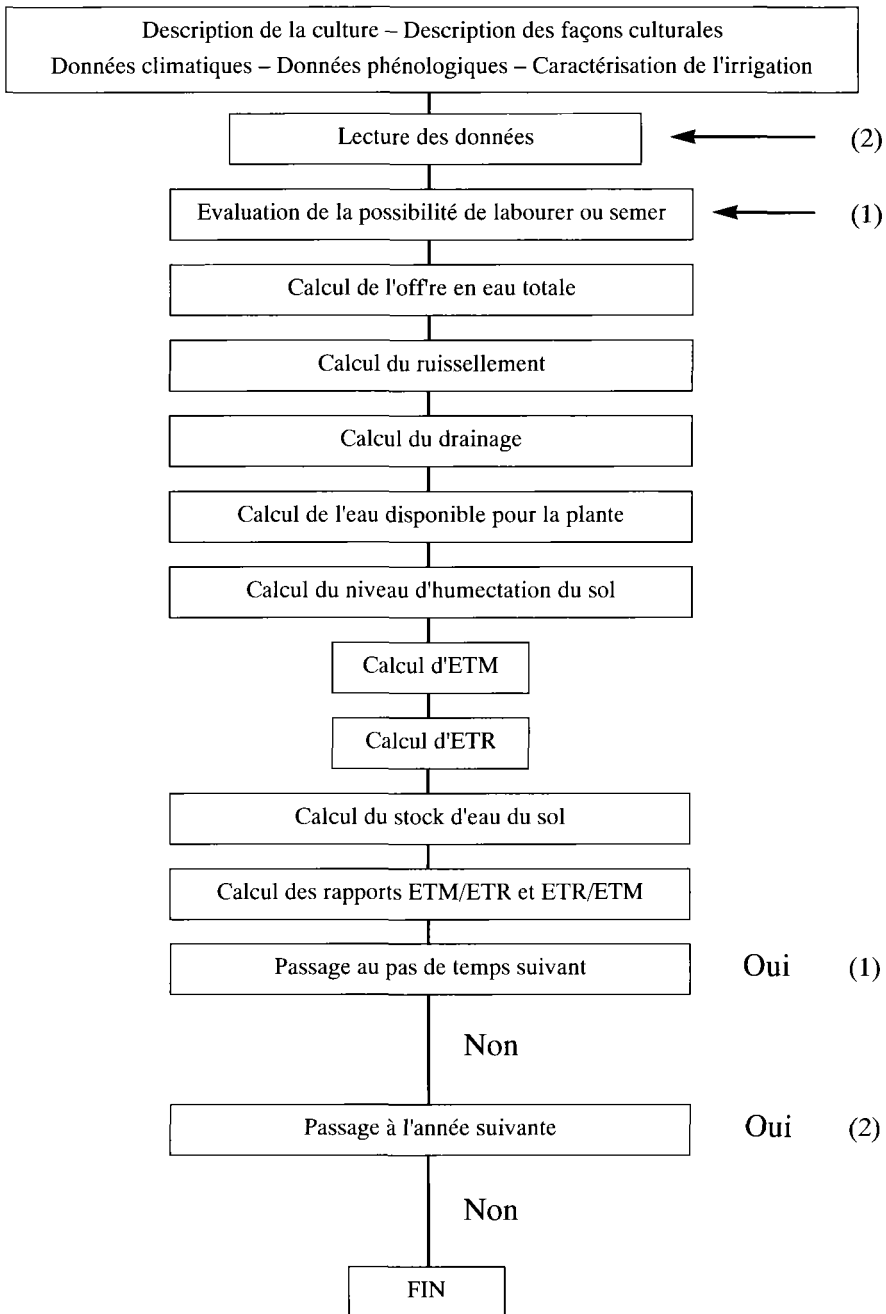


Figure 1. Organigramme du bilan hydrique (BIP).

Ainsi le modèle calcule systématiquement :

HR : l'humidité relative du sol qui est une caractérisation du pourcentage d'eau extractible par les racines ;

ETM : l'évapotranspiration réelle maximale (mm) ;

ETR : l'évapotranspiration réelle (mm) à partir de la fonction d'Eagleman ;

RES : la réserve en fin de période (mm) ;

Ruiss. et Dr : la quantité d'eau ruisselée et drainée (mm) ;

Satis. : le taux de satisfaction des besoins en eau, qui correspond à ETR/ETM (%) ;

Défi. : le déficit, qui correspond à $ETM-ETR$ (mm) ;

Front : le front d'humectation, en mm, qui varie entre 0 et la réserve utile.

Ces résultats sont ensuite analysés pour l'élaboration du calendrier prévisionnel.

Méthodologie d'élaboration du calendrier prévisionnel

L'objectif de cette méthodologie est de prendre en compte des considérations empiriques et scientifiques.

Nous avons choisi des seuils pluviométriques de semis (0, 10, 20, 30, 40 mm) compte tenu de la diversité des semis dans les champs.

Aussi, à partir de l'analyse des données pluviométriques et agronomiques (30 ans), les traitements ont porté sur les trois décades des mois de mai, juin, juillet, considérés comme les mois de semis au Mali.

La simulation du bilan hydrique consiste à traiter, pour une station et un cycle de culture donnés, les cinq seuils pluviométriques de semis décade par décade pour les 30 années.

Ensuite l'analyse de ces traitements [6] se fait en trois étapes :

Première étape :

Sélection des années répondant aux critères de semis seuil par seuil et décade par décade.

Deuxième étape :

Pour caractériser la réussite d'une culture, nous avons créé un indice de réussite (IR), qui est le produit des taux de satisfaction ETR/ETM du bilan hydrique pendant les trois phases les plus importantes du cycle de la culture (levée-croissance, initiation paniculaire, floraison-début maturation).

$$IR = (ETR/ETM) \text{ Phase I} \times (ETR/ETM) \text{ Phase II} \times (ETR/ETM) \text{ Phase III}$$

Nous avons posé comme condition de réussite d'une phase, tous les autres facteurs n'étant pas limitants, un taux de satisfaction (ETR/ETM) supérieur à 0,80 ce qui implique que :

$$IR = (0,80)^3 = 0,51$$

Ainsi l'indice IR est calculé pour les années sélectionnées dans la première étape.

Troisième étape :

Dans cette étape, il s'agit de calculer la probabilité de réussite à partir de la deuxième étape (en tenant compte des seuils et des décades) en faisant un simple rapport entre le nombre de cas favorables ($IR > 0,51$) et le nombre total d'années sélectionnées. Cette probabilité est exprimée en nombre d'années de réussite sur 10 ans. Un tableau récapitulatif (tableau II) est enfin élaboré et analysé pour l'avertissement agricole.

Cette méthode n'est qu'une approche parmi d'autres et elle doit être testée sur le terrain en vue de parfaire sa validité. C'est ce qui a été réalisé pour deux zones à pluviométrie différente : Bancoumana et Banamba.

Tableau II. Nombre d'années sur 10 de réussite du mil/sorgho pour des semis à partir des seuils pluviométriques.

1. Zone humide (Bancoumana) : cycle long

Seuil pluie (mm)	0	10	20	30	40
Mai	I	0	0	0	1
	II	2	3	3	3
	III	3	4	4	5
Juin	I	6	6	8	9
	II	8	9	9	9
	III	9	9	8	8

2. Zone sèche (Banamba) : cycle court

Seuil pluie (mm)	0	10	20	30	40
Mai	I	0	0	0	0
	II	0	0	0	0
	III	0	0	0	3
Juin	I	5	5	6	6
	II	6	7	7	9
	III	8	8	9	9
Juillet	I	8	9	9	9
	II	8	8	8	8
	III	5	5	5	5

Résultats

Dans le cadre des prises de décision concernant surtout le semis, la Direction nationale de la météorologie a élaboré des calendriers prévisionnels de semis du mil et du sorgho pour certaines zones.

Les résultats présentés concernent une zone humide (secteur de Bancoumana) et une zone sèche (secteur de Banamba) [6] et donnent le nombre d'années de réussite sur 10 années de semis du mil et du sorgho à partir des seuils pluviométriques (tableau II). Il en ressort des avertissements agricoles :

Pour la zone humide (secteur de Bancoumana) :

1. Ne pas semer avant le 1^{er} juin mais procéder aux préparatifs des champs.
2. Semer du 1^{er} au 10 juin dès qu'on atteint au moins un cumul pluviométrique décadaire de 40 mm.
3. Semer du 11 au 20 juin dès qu'on atteint au moins un cumul pluviométrique décadaire de 10 mm.
4. Semer du 21 au 30 juin à sec ou humide.
5. Pour une variété de 135 jours, on pourra semer jusqu'au 30 juin au plus tard.
6. Pour une variété de 120 jours, on pourra semer jusqu'au 10 juillet au plus tard.
7. Après ces dates, il n'est pas recommandé de semer un cycle long.

Pour la zone sèche (secteur de Banamba) :

1. Ne pas semer avant le 10 juin.
2. Semer du 11 au 20 juin dès qu'on atteint au moins un cumul pluviométrique décadaire de 40 mm.
3. Semer du 21 au 30 juin dès qu'on atteint au moins un cumul pluviométrique décadaire de 20 mm.
4. Semer du 1^{er} au 10 juillet dès qu'on atteint au moins un cumul pluviométrique décadaire de 10 mm.
5. Semer du 11 au 20 juillet à sec ou humide.
6. Pour un cycle de 90 jours, ne pas semer après le 31 juillet.
7. Après ces dates, un cycle plus court serait préférable.

Applications

Dans le cadre du projet pilote en agrométéorologie, ces calendriers prévisionnels de semis ont été testés et les résultats sont satisfaisants (tableau III).

Tableau III. Rendement du mil et du sorgho 1989 en fonction du calendrier prévisionnel de semis dans les secteurs de Bancoumana et Banamba (kg/ha).

Périodes de semis	Bancoumana		Banamba	
	Pluies (mm)	Rendement	Pluies (mm)	Rendement
1 ^{er} au 10 juin	37,1	/	7,0	/
11 au 20 juin	84,1	900-2460	36,7	/
21 au 30 juin	76,4	960-3100	59,4	**
1 ^{er} au 10 juillet	79,1	920-2400	19,3	740-2200
11 au 20 juillet	149,1	900-2700 *	66,4	620-2250
21 au 31 juillet	74,4	/	37,2	500-2250
1 ^{er} au 10 août	111,5	/	80,5	250-560 *

/ : Pas de semis conformément à l'avertissement.

** : Pas de semis (contraintes sociales).

* : Cycle court conformément à l'avertissement.

NB : le niveau du rendement est lié au niveau de fertilité des champs.

Conclusion

Afin de mieux exploiter ces calendriers prévisionnels et lutter contre les effets de la sécheresse il est nécessaire de :

- considérer que les pluies tombées avant la date prévue pour le démarrage du calendrier ne sont favorables qu'aux préparatifs des champs ;
- accepter de ne semer qu'après la date indiquée pour minimiser le risque face à une pluviométrie aléatoire de début de campagne ;
- respecter les techniques culturales appropriées : densité et profondeur de semis, sarclage, apport d'engrais, etc. ;
- lutter contre les ennemis en surveillant strictement les cultures.

Les agriculteurs aussi bien que les encadreurs [7] ne doivent pas perdre de vue ces remarques puisque le calendrier prévisionnel n'est qu'un élément, même s'il est primordial dans l'augmentation de la production agricole et la lutte contre la sécheresse.

Références

1. Météorologie nationale, Mali. Rapports techniques. Campagne 1987, 1988 et 1989.
2. Traoré K. (1982). Vers une assistance agrométéorologique opérationnelle à l'agriculture. Séminaire CILCA à Katibougou (Mali) du 13 au 24 juin 1982.
3. IRAT/CIRAD (1982). Valorisation agricole des ressources pluviométriques. Synthèse de l'atelier IRAT-CIEH tenu à Ouagadougou du 27-11-82 au 4-12-82.
4. Forest F. (1984). Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. IRAT/CIRAD, Montpellier, février 1984.
5. Charoy J., Forest F., Le Goupi J.C. (1978). Evapotranspiration, besoins en eau des cultures, relation eau-sol et estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique en culture pluviale et irriguée. Bilan hydrique, Montpellier, avril 1978.
6. Diarra B. (1985). Traitement des données agrométéorologiques en vue d'un avertissement agricole dans le secteur de Bancoumana. Montpellier, janvier 1985.
7. Diarra B. (1989). Deuxième séminaire d'agrométéorologie à l'intention des paysans, animateurs et encadreurs ruraux du projet de développement "haute vallée Bamako", du 17 au 22 mars 1989.

4

Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre

J.-L. CHOPART¹, D. KONE²

1. IDESSA-DCV 01, BP 633, Bouaké, Côte-d'Ivoire ; IRAT/CIRAD, BP 5035, 34032 Montpellier, France

2. IRAT/CIRAD, BP 5035, 34032 Montpellier, France

La mise en évidence de l'intérêt de l'intensification des cultures passe par des études de terrain menées sur des dispositifs expérimentaux. La variabilité interannuelle des résultats obtenus (production et effet) y est souvent élevée, en particulier dans les régions d'Afrique soumises à un risque climatique important. L'évaluation des termes du bilan hydrique apparaît alors comme un outil privilégié d'analyse de la variabilité de la production des cultures et de l'effet des techniques d'intensification [1]. Toutefois, ces expérimentations ne peuvent pas toujours avoir une durée suffisante pour analyser et expliquer la variabilité de la production.

Des résultats obtenus sur une courte période (2 à 3 ans) peuvent conduire à des conclusions contradictoires selon la séquence d'années retenue. C'est ainsi que dans une expérimentation prévue pour trois ans, on a eu, au cours des deux premières années, des résultats montrant un effet négatif des techniques d'intensification telles que l'engrais et le travail du sol sur la production de maïs grains [2]. Ces données sont en contradiction avec celles obtenues la même année ou les années précédentes dans un milieu comparable. Quelle est donc la représentativité des résultats obtenus ?

Après avoir caractérisé les conditions agroclimatiques des cultures, il est apparu intéressant d'évaluer le risque de rencontrer des situations analogues grâce à une étude fréquentielle des termes du bilan hydrique simulé.

L'objectif est de replacer les résultats de terrain obtenus pendant deux ans dans leur contexte agroclimatique. Ceci doit permettre une approche raisonnée du risque agronomique lié à l'intensification de la culture du maïs dans la zone centre de Côte-d'Ivoire, prenant en compte, entre autres, le risque climatique.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental et traitements

L'expérimentation principale (n° 1) ayant servi de support à cette étude est située à Bouaké (Côte-d'Ivoire) sur un sol ferrallitique gravillonnaire sur granite [3]. On compare différents niveaux d'intensification dans un système comprenant deux cultures par an : maïs entre avril et juin, puis cotonnier entre fin juin et décembre. Cette succession de deux cultures par an est rendue possible par le caractère bimodal de la pluviosité.

On ne s'intéressera ici qu'à la seule culture de maïs de la première saison des pluies. La variété utilisée est le composite dahoméen (CD) : il a un cycle cultural de 80 jours environ ; son potentiel de production est de l'ordre de 4 t/ha. Pendant la saison de culture, la pluviosité est faible (300 à 400 mm) et irrégulière, rendant la production, elle aussi, très irrégulière.

L'engrais et le travail du sol constituent les thèmes d'intensification étudiés sur deux expérimentations.

Le premier essai (n° 1) comprend six répétitions de six traitements, dont seulement trois sont examinés ici :

T : témoin sans travail du sol ni engrais ;

E : 200 kg/ha d'engrais 10-18-18 et 100 kg/ha d'urée ;

E + L : engrais + labour. La fertilisation est identique à celle de E ; un labour d'environ 20 cm de profondeur est fait à la charrue à soc, dès les premières pluies, avec un tracteur de 50 CV. Ce labour est suivi d'un passage de herse avant le semis manuel.

Le second essai, implanté dans un milieu similaire, compare deux traitements :

E : 200 kg/ha d'engrais 10-18-18 et 100 kg/ha d'urée ;

E + L : engrais + labour : travail du sol identique à celui de l'essai n° 1.

Méthodes d'évaluation du bilan hydrique

Evaluation des termes du bilan hydrique des essais

L'expérimentation n° 1 est instrumentée pour permettre la mesure *in situ* des termes du bilan hydrique à l'aide d'un humidimètre à neutrons et de tensiomètres, suivant la méthode du drainage de Darcy. Les premiers résultats obtenus par cette méthode [4] ont permis de montrer une bonne similitude entre les valeurs mesurées *in situ* et celles obtenues par simulation du bilan hydrique à partir du modèle PROBE [5,6], issu d'un modèle de base élaboré par Franquin et Forest [7].

Les conditions d'alimentation hydrique des deux essais ont donc été caractérisées par la simulation du bilan hydrique selon le logiciel PROBE. Les valeurs des paramètres d'entrée du modèle sont décrites par ailleurs [2].

Etude fréquentielle du bilan hydrique entre 1961 et 1990

Si le logiciel PROBE est bien adapté à une caractérisation fine du bilan hydrique à la parcelle ("pas" de temps journalier, réserve utile en eau fonction de la croissance racinaire), il n'a pas été conçu pour des études fréquentielles portant sur un grand nombre d'années et faisant appel à des fichiers climatiques. Le logiciel BIP [8], issu également du modèle de Franquin et Forest [7], adapté pour ce type d'étude, a été utilisé ici pour évaluer les termes du bilan hydrique simulé sur la longue période 1961-1990.

La comparaison des résultats obtenus par les deux logiciels de simulation sur les expérimentations en 1989 et 1990 (figure 1) fait ressortir quelques différences. Celles-ci

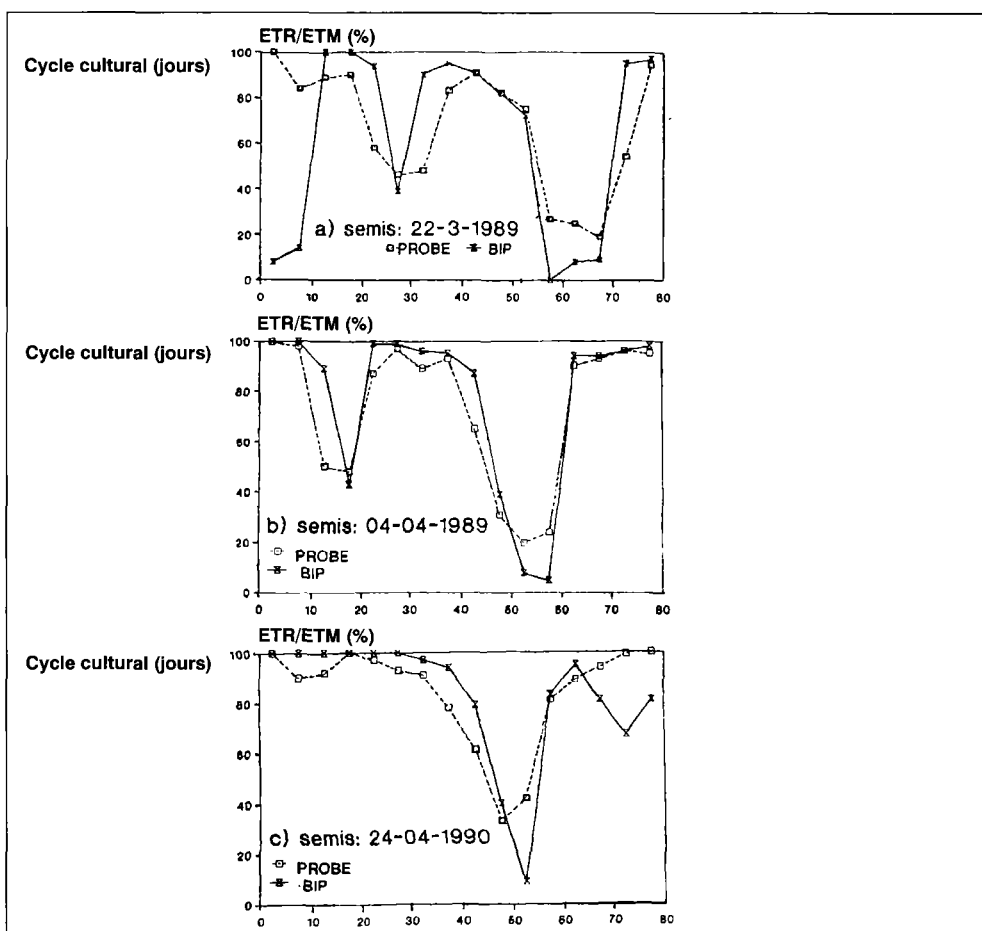


Figure 1. Taux de satisfaction des besoins en eau du maïs à Bouaké.

seraient dues, d'une part, au pas de temps de calcul (1 jour pour PROBE et 5 jours pour BIP) et, d'autre part, à la réserve en eau utile, variant avec la profondeur racinaire pour PROBE et fixe pour BIP.

Toutefois, les résultats, hormis ceux du tout début de cycle (0-10 jours), sont suffisamment proches pour que l'on retienne le logiciel BIP pour l'étude fréquentielle des termes du bilan hydrique simulé du maïs de premier cycle à Bouaké sur les 30 dernières années (1961-1990).

Les bases et les hypothèses de cette simulation sont décrites ci-dessous.

La réserve en eau utile (RU) du sol est fixée à 50 mm. Cette valeur de RU est représentative de celle des sols de l'étude et de la région, pour une profondeur d'enracinement du maïs d'environ 70 à 80 cm.

Les coefficients culturaux sont repris d'études réalisées au Sénégal [9] et adaptés pour tenir compte des résultats que nous avons obtenus à Bouaké avec la variété considérée.

Les pluies journalières sont relevées sur le site des essais tandis que l'ETP est calculée suivant l'équation de Penman à partir des facteurs climatiques mesurés au poste météorologique situé à 300 m environ du site expérimental.

La date de semis, et donc la date de début du calcul du bilan hydrique pour chacune des 30 années considérées, a été déterminée en estimant que la première pluie supérieure à 20 mm, tombée après le 1^{er} mars, permet la réalisation de la préparation du sol. La durée de ce travail est d'au moins 5 jours. La date de semis est donc fixée le lendemain de la première pluie, supérieure à 15 mm, située plus de 5 jours après la date de début de la préparation du sol. Le seuil de 15 mm, nécessaire à la réalisation du semis, peut être atteint par le cumul de deux pluies successives espacées d'un jour.

Les normes ainsi retenues correspondent assez bien à la pratique paysanne en culture motorisée et à celle des stations de recherche pour la mise en culture de grandes parcelles.

La typologie des conditions d'alimentation hydrique du maïs, au cours de la période 1961-1990, a été rendue plus aisée grâce à un découpage du cycle en quatre grandes phases phénologiques :

- 1 : 0-9 JAS (jour après semis) : germination et levée ;
- 2 : 10-39 JAS: croissance végétative ;
- 3 : 40-59 JAS: floraison, formation et remplissage des grains ;
- 4 : 60-80 JAS: maturation des grains et sénescence des feuilles.

A l'intérieur de ces quatre séquences, on s'est focalisé sur les deux périodes 2 et 3 au cours desquelles se forme l'essentiel des tiges, des feuilles et des grains. C'est également pendant ces deux phases qu'un déficit hydrique a le plus d'incidence sur la production.

Résultats

Résultats relatifs aux essais de 1989 et 1990

Les conditions d'alimentation hydrique sont caractérisées par le taux de satisfaction des besoins en eau (TSBE) obtenu par bilan hydrique simulé. La figure 1 montre l'évolution du TSBE du maïs des essais de 1989 et de 1990. Cette figure fait ressortir des périodes de

déficit hydrique placées à des stades différents conduisant à trois situations spécifiques de croissance du maïs. Les caractéristiques schématiques d'alimentation hydrique sont présentées dans le tableau I.

Tableau I. Taux de satisfaction des besoins en eau obtenu par bilan hydrique simulé (BIP et PROBE) des essais de maïs en 1989 et 1990 à Bouaké.

Année	Date semis	Logicie de bilan	Phase végétative 10-39 JAS		Phase reproductive 40-59 JAS	
			ETR/ETM moyen	ETR/ETM 10 jours les + secs	ETR/ETM moyen	ETR/ETM 10 jours les + secs
1989	04.04	PROBE BIP	0,77	0,49	0,35	0,22
			0,87	0,71	0,35	0,07
			Déficit hydrique modéré		Déficit hydrique très sévère	
1989	22.03	PROBE BIP	0,69	0,47	0,68	0,50
			0,86	0,65	0,61	0,36
			Déficit hydrique modéré		Déficit hydrique sévère	
1990	24.04	PROBE BIP	0,92	0,85	0,54	0,38
			0,99	0,95	0,53	0,25
			Pas de déficit hydrique		Déficit hydrique sévère	

Tableau II. Production (kg/ha) des essais de maïs en 1989 et 1990 à Bouaké [2,4].

Dates de semis	04.04.89			22.03.89		24.04.90		
Traitements	T	E	E + L	E	E + L	T	E	E + L
Tiges	2250	2650	3830	1780	2480	1840	2550	3240
Grains	1140	780	200	1140	1650	1490	1340	880

Les facteurs d'intensification ont toujours un effet favorable sur la production des tiges (tableau II). L'effet du travail du sol est plus marqué en 1989 (+ 44 %) avec les conditions de déficit hydrique certes modéré de la phase végétative (10-40 jours), qu'en 1990 (+ 28 %), année sans déficit en eau pendant cette période.

Les effets des traitements sur la production utile sont plus complexes. Sur l'essai semé le 22 mars 1989, l'effet du travail du sol est positif. En revanche, cette même technique a un effet nettement négatif sur l'essai du 4 avril 1989 semé dans des conditions semblables de variété et de milieu. Ainsi, une date de semis décalée de deux semaines a provoqué des conditions d'alimentation hydrique très déficitaires au cours de la phase sensible de la reproduction (figure 1 et tableau I) entraînant un effet négatif du labour et de l'engrais. On retrouve cet effet négatif des facteurs d'intensification sur la production utile de maïs en 1990.

En 1989 et 1990, sur trois résultats expérimentaux, on obtient donc deux résultats montrant des effets néfastes de l'intensification. Ces résultats sont en contradiction avec

d'autres obtenus dans le même milieu, aussi bien en ce qui concerne les effets du labour [10] que de la fertilisation [11].

Analyse fréquentielle du bilan hydrique de 1961 à 1990

Les résultats détaillés de l'évolution du taux de satisfaction des besoins en eau au cours du cycle du maïs, pour la période 1961-1990, figurent dans le tableau III. A partir de ces résultats obtenus par période de cinq jours, on a évalué la fréquence d'apparition des

Tableau III. Evolution du taux (%) de satisfaction des besoins en eau obtenu par bilan hydrique simulé (BIP) d'un maïs de premier cycle à Bouaké par périodes de cinq jours entre 1961 et 1990.

Année	Pentade semis	Pentades après semis															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1961	1 ^{er} avril	30	57	100	100	99	46	91	87	49	8	82	85	86	94	93	95
1962	4 avril	46	100	100	100	100	96	80	38	14	83	94	94	95	80	91	98
1963	1 ^{er} avril	100	43	100	100	100	99	96	94	94	93	55	78	64	13	64	93
1964	2 avril	100	100	100	100	98	96	96	95	94	92	38	60	94	95	96	98
1965	4 mars	100	0	23	100	100	98	93	88	75	26	25	45	7	68	8	67
1966	6 mars	100	100	100	100	100	99	96	95	77	30	75	77	21	87	88	95
1967	3 mars	100	100	100	98	94	46	90	86	85	94	58	22	7	84	90	78
1968	4 avril	100	98	100	100	100	100	94	88	95	94	81	86	95	95	96	96
1969	5 mars	100	44	100	100	98	94	96	95	68	8	27	4	0	0	28	97
1970	2 avril	100	100	100	100	100	96	96	81	34	65	29	94	87	80	58	7
1971	5 mars	100	98	100	100	99	91	60	13	86	88	64	48	94	94	87	70
1972	6 mars	100	100	100	78	57	99	96	95	94	91	94	75	65	95	95	98
1973	5 avril	100	100	89	91	100	100	92	94	95	85	82	56	24	7	15	18
1974	1 ^{er} avril	100	100	100	100	61	98	89	95	78	8	76	15	86	75	40	95
1975	6 mars	100	78	100	100	100	99	94	88	94	72	40	94	94	47	50	94
1976	3 avril	100	100	100	100	100	95	89	93	94	95	50	9	69	69	87	92
1977	4 avril	100	43	100	100	100	97	84	45	85	94	94	90	82	45	7	80
1978	3 mars	100	47	94	49	98	98	96	84	51	85	94	84	59	77	56	94
1979	1 ^{er} avril	100	92	0	100	100	99	96	86	65	85	71	5	94	94	96	98
1980	4 avril	100	0	100	100	100	99	92	79	85	76	62	59	61	65	18	0
1981	3 mars	100	100	100	100	98	91	58	84	94	94	94	78	26	0	6	80
1982	4 mars	100	42	98	100	99	95	96	95	87	61	46	51	24	9	43	97
1983	6 avril	100	100	100	100	100	100	95	95	94	73	9	91	58	12	0	15
1984	5 mars	100	96	96	50	0	17	90	95	94	67	26	7	83	83	34	14
1985	3 avril	100	100	100	100	100	99	97	95	78	39	82	91	94	76	27	69
1986	2 avril	100	100	100	100	100	95	90	76	73	86	94	89	49	87	84	62
1987	2 avril	100	0	29	0	99	95	96	95	86	41	29	77	86	94	83	94
1988	1 ^{er} avril	100	100	98	100	99	99	96	87	94	69	32	40	94	75	38	20
1989*	5 mars	8	14	100	100	94	39	90	95	91	82	72	0	8	9	95	97
1989*	1 ^{er} avril	100	100	89	43	99	99	96	95	87	39	8	5	94	94	96	98
1990*	5 avril	100	100	100	100	100	100	97	94	79	40	9	83	95	81	67	81

* Expérimentations de 1989 et 1990.

5 avril = 5^e pentade d'avril, soit la période du 20 au 25 avril.

situations comparables à celles des expérimentations de 1989 et 1990, avec des effets négatifs de l'intensification. A cet effet, des fourchettes de taux de satisfaction des besoins en eau ont été fixées pour faciliter la caractérisation des différentes situations d'alimentation hydrique en 1989 et 1990, en se référant aux résultats synthétiques du tableau I.

On a retenu comme critère de tri l'ETR/ETM moyen pendant les dix jours consécutifs les plus secs de la phase phénologique considérée, avec les intervalles de classe suivants :

Classe a : pas de déficit hydrique : $ETR/ETM > 0,75$;

Classe b : déficit hydrique modéré à sévère : $0,3 < ETR/ETM < 0,75$;

Classe c : déficit hydrique très sévère $ETR/ETM < 0,3$.

D'autres critères de tri pourraient, bien sûr, être choisis pour faire une typologie plus générale [12]. Les normes retenues ici permettent toutefois de bien typer les trois expérimentations dont les résultats agronomiques sont très différents (tableau II). Les conditions d'alimentation hydrique du maïs des trente dernières années ont ainsi pu être discriminées (tableau IV), comme celles des expérimentations de 1989 et 1990 (tableau I).

On peut alors étudier le degré de représentativité des situations agroclimatiques observées sur les expérimentations de 1989 et 1990 (tableau V). Le risque de rencontrer une sécheresse sévère ou très sévère au moment de la phase sensible de la reproduction, comme en 1989 et 1990, est de l'ordre d'une année sur six. Ce risque agroclimatique, entraînant un effet négatif des thèmes d'intensification, n'est pas nul, mais reste cependant modeste.

Tableau IV. Répartition de la série des 30 années (1961-1990) en classes de déficit hydrique, d'après le taux de satisfaction des besoins en eau du maïs à Bouaké.

	Classe a	Classe b	Classe c
Phase végétative			
10-39 jours après semis	17 ans/30	11 ans/30	2 ans/30
Phase reproductive			
40-59 jours après semis	5 ans/30	20 ans/30	5 ans/30

Tableau V. Fréquence d'apparition des situations agroclimatiques comparables à celles des essais de 1989 et de 1990 à Bouaké, entre 1961 et 1990.

Année	Essai	Classe de déficit hydrique		
		Phase végétative (10-39 JAS)	Phase reproductive (40-59 JAS)	Fréquence
1989	n° 1	b	c	3 ans/30
	n° 2	b	b	9 ans/30
1990	n° 1	a	c	2 ans/30

Discussion

Des effets négatifs de facteurs d'intensification (labour et fertilisation) ont été observés sur la production de maïs grain en 1989 et 1990. Ces résultats sont en contradiction avec d'autres. Ils sont liés à un déficit hydrique très sévère au stade épiaison-floraison de la plante. La culture en système intensifié avait un développement végétatif exubérant par rapport à celui du témoin. Le potentiel de production était donc supérieur mais les besoins en eau également plus grands. La culture intensifiée, en conséquence, a été plus gravement perturbée lors du stress hydrique au stade reproduction, que celle du témoin sans travail du sol ni fertilisation, peu développée. La production de grains est finalement inférieure.

L'étude fréquentielle du bilan hydrique d'un même maïs de premier cycle indique que, dans les conditions climatiques de la zone centre, le risque de rencontrer une situation comparable est d'environ une année sur six. Ce risque n'est donc pas nul mais reste plus limité que peut le laisser croire l'observation des deux situations comparables en 1989 et 1990. Cette succession est en fait liée aux variations aléatoires du climat.

Par ailleurs, cet effet négatif n'apparaît que pour une sécheresse très sévère, avec un taux de satisfaction moyen des besoins en eau inférieur à 30 % sur une période d'au moins dix jours consécutifs au moment de la floraison et du début du remplissage des grains. Si le taux de satisfaction des besoins en eau, mesuré dans les mêmes conditions, est de l'ordre de 50 %, l'effet du travail du sol reste positif.

Conclusion

Dans cette zone, les thèmes d'intensification ne semblent pas devoir être remis en cause, de façon globale, par les résultats agronomiques cités. L'agriculteur qui peut se permettre de supporter certains risques agroclimatique et économique a donc intérêt à adopter un système de culture moyennement intensifié comprenant un travail du sol et une fertilisation modérée comme dans les systèmes examinés. L'agriculteur qui ne peut ou ne veut pas accepter ce risque devra rester dans un système extensif. Sa production moyenne sera plus faible, mais aussi moins variable d'une année à l'autre. Le risque économique sera réduit. Il lui faudra toutefois veiller, pour préserver la fertilité du sol, à maintenir un certain équilibre entre les exportations minérales de ces cultures et les restitutions. Il se confirme que des systèmes de culture du maïs très intensifs, en particulier avec de hautes doses d'engrais azoté, ne sont pas envisageables dans la zone, en culture pluviale stricte.

On a donc pu apporter une réponse pratique à un problème d'interprétation d'essais agronomiques relatifs aux techniques d'intensification.

Au-delà des recommandations agronomiques, on a également essayé de montrer ici l'intérêt plus général d'une démarche permettant de replacer des résultats agronomiques dans leur contexte agro-écologique.

Cette démarche consiste à bien caractériser les conditions d'alimentation hydrique et de croissance de la culture grâce à des mesures *in situ* et/ou par une simulation du bilan hydrique avec des outils aussi précis que possible. On procède ensuite à une typologie

simplifiée, mais fidèle, de l'alimentation hydrique. On réalise enfin une analyse fréquentielle du bilan hydrique sur une série d'années aussi longue que possible, pour identifier le risque de rencontrer des conditions d'alimentation hydrique comparables à celles enregistrées sur les essais.

Le produit de cette démarche permet de relativiser des résultats agronomiques en les situant à l'intérieur d'une gamme de variabilité climatique. On peut alors raisonner en terme de risque (ou d'espérance !), et extrapoler plus facilement des référentiels locaux à d'autres situations agroclimatiques légèrement différentes. La mise en oeuvre de cette démarche peut enfin être une contribution à un travail interdisciplinaire de raisonnement et de choix des systèmes de culture dans les zones à risque agroclimatique.

Remerciements

Cette étude a été réalisée à l'IDESSA dans le cadre des projets de recherche (PF1 et PF2) du R3S, réseau de la CORAF. Ces projets ont bénéficié d'un financement de la CEE-DGXII que les auteurs remercient vivement.

Références

1. Chopart J.L., Nicou R. (1989). Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. *L'Agron. Trop.* 44 (4) : 269-81.
2. Chopart J.L., 1990 (b). Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique, enracinement et rendement des cultures pluviales. In : "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales". IRAT/Montpellier : 223-37.
3. Chopart J.L., Koné D. (1985). Influence de différentes techniques de travail du sol sur l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier en Côte-d'Ivoire. *L'Agron. Trop.* 40 (3) : 223-9.
4. Chopart J.L. (1990) (a). Optimisation de l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier par les techniques culturales dans les zones à pluviosité irrégulière. Synthèse des résultats 1989. In : "Actes de l'atelier PF1 PF2 R3S CORAF. Premiers résultats sur l'alimentation hydrique des cultures", vol. III. CIRAD-IRAT/Montpellier, 34 p.
5. Chopart J.L., Siband P. (1988). PROBE : Programmes de Bilan de l'Eau. Mémoires et travaux de l'IRAT n° 17, 76 p. CIRAD-IRAT, Montpellier.
6. Chopart J.L., Vauclin M. (1990). Water balance estimation Model Field test and Sensitivity Analysis. *Soil Science Society America J.* 54 : 1377-84.
7. Franquin P., Forest F. (1977). Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* 39 (1) : 42-50.
8. Forest F. (1984). Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. IRAT, 60 p.
9. Dancette C. (1983). Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone Soudano-Sahélienne. *L'Agron. Trop.* 38 (4) : 281-93.
10. Chopart J.L. (1989). Effect of tillage on a corn-cotton sequence in Côte-d'Ivoire. In : "Soil crop and water management in the Sudano-Sahelian zone". ICRISAT ed. : 325-31.
11. Gigou J. (1987). L'adaptation des cultures dans le centre de la Côte-d'Ivoire. *L'Agron. Trop.* 42 : (1) 1-11.
12. Koné D. (1991). Caractérisation du risque climatique de la culture du maïs en zone centre Côte-d'Ivoire. In : "Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone". IAHS Public. n° 199: 515-21.

5

Assessment of climatic resources for the cropping potential in Northern Ghana

C.N. KASEI, H. RUDAT

Nyankpala Agricultural Experiment Station, NAES/GTZ, PO Box 52, Tamale, Ghana

Ghana is basically an agricultural country and this accounts for 57 % of the gross national product. Practically all agriculture in Ghana is rainfed. The main food crops are root crops and food grains. Food grains are more largely produced in the north of Ghana than root crops. Northern Ghana is about 41 % of the total land area of Ghana (figure 1).

It is mostly semi-arid and consists of the Northern Guinea and Southern Sudan savanna zones (figure 2). These areas have an erratic monomodal pattern of rainfall with an annual average of about 900-1000 mm. The length of the rainy season although punctuated by drought conditions permits a large portion of the country's millet, sorghum, rice, yam and food legumes, and also some amount of maize to be produced in this part of Ghana [1].

In spite of the area being prone to unreliable rainfall, its potential for grain production probably encouraged the Ghana government to enter into an agreement with the German government by 1975 to upgrade the Nyankpala Agricultural Experiment Station (NAES), with a mandate to improving the prevailing farming systems in order to step up food production in this dry ecological zone of Ghana. The first problem mitigating the execution of the program has been the weather. Many crop failures in the zone have also been attributed to the inability of the farmers to adopt cropping strategies to overcome the intra-seasonal vagaries of the weather, particularly short drought conditions.

This paper therefore describes the approach adopted in the analysis of some historical climatic data for the assessment of climatic resources for cropping potential and the evaluation of risks to cropping in semi-arid Ghana.

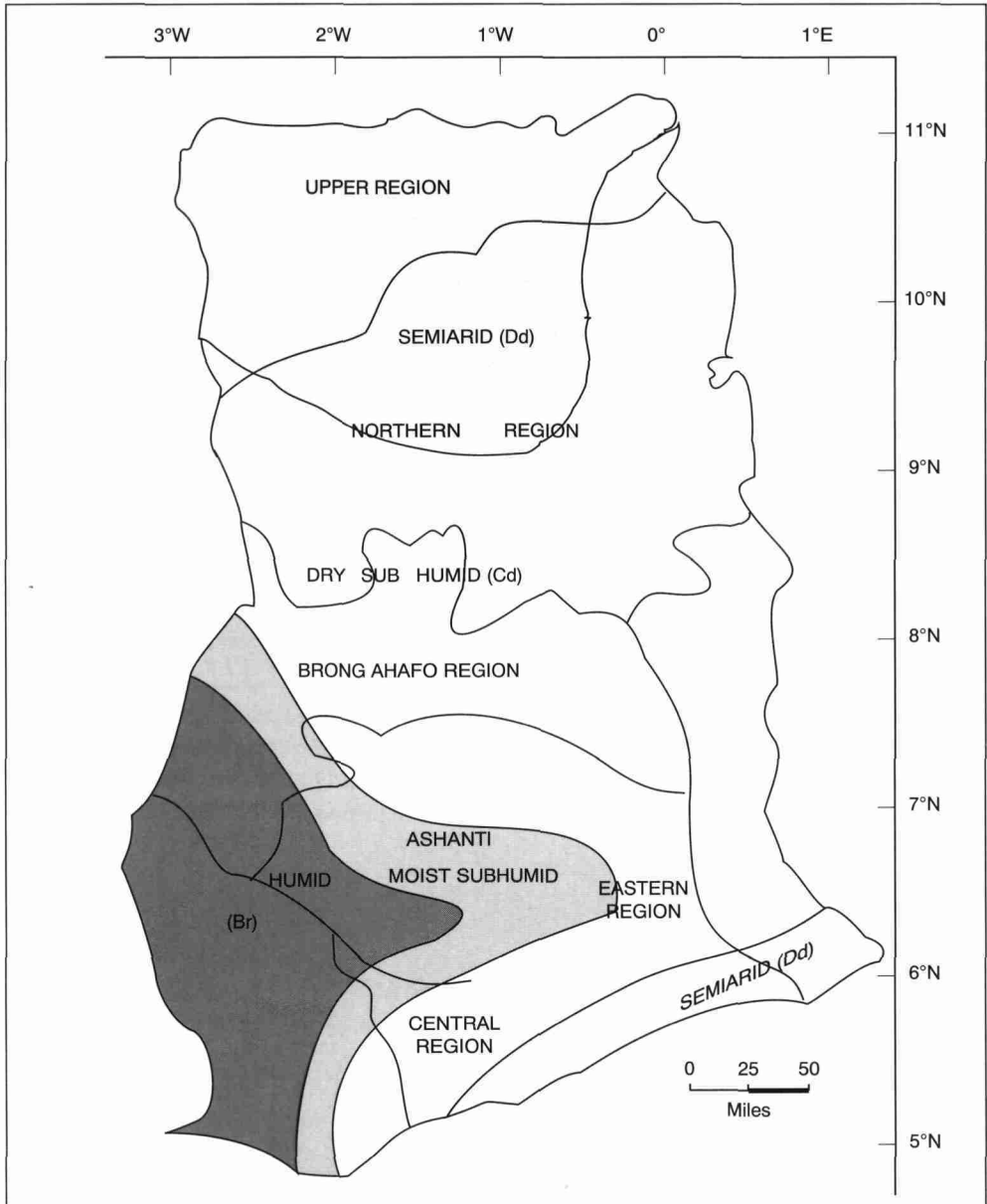


Figure 1. Climates of Ghana.

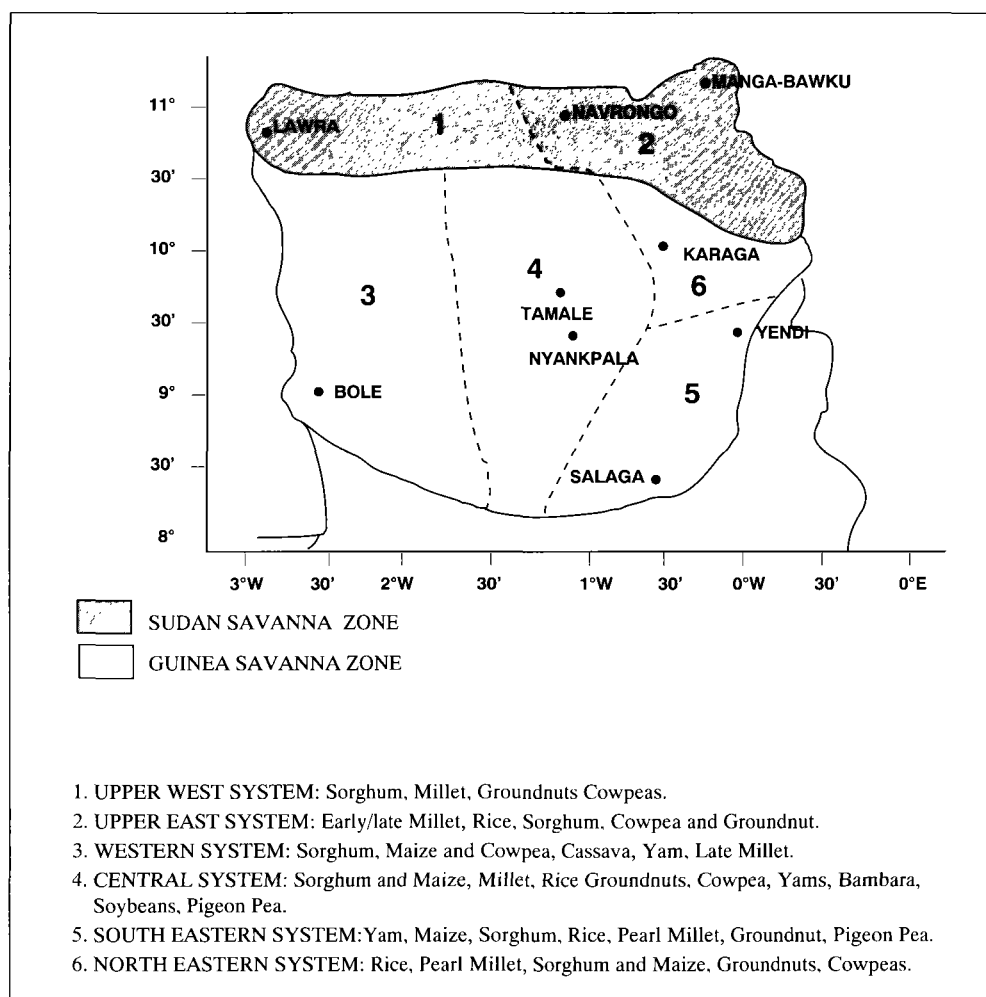


Figure 2. Map of semi-arid Ghana and the groups of cropping systems.

Cereal production in Ghana

Cereals are the staple food of the communities in the savanna area and also people in other ecological zones of Ghana (table I). The Government places emphasis on increased production of cereals. However, this expectation is not often met due to unreliable rainfall during the growing season. Production figures (table II) show the level of output of selected cereals. The low figures recorded from 1980-1983 are a reflection of the effect of poor rainfall on yield during those years.

Table I. Ghana: Cereal consumption, production, and marketable. Surplus by region, 1987.

Region	Population (thousands)	Share (%)	Consumption ¹		Production ¹		Commercial surplus ¹	
			Maize ²	Sorghum ² Millet	Maize ³	Sorghum ³ Millet	Maize ³	Sorghum ³ Millet
Upper West	345	2.64	23	47	11.9	42.7	3.8	26.5
Upper West	833	6.38	23	47	1.5	49.0	-17.7	9.8
Northern	1.256	9.62	34	45	70.1	81.9	27.3	25.4
Brong Ahafo	1.274	9.76	26	10	79.1	8.4	46.0	-4.3
Ashanti	2.257	17.29	26	7	60.5	0	1.8	-15.8
Western	1.206	9.24	34	7	32.9	3.8	-8.1	-4.6
Central	1.237	9.48	46	7	26.6	0	-30.3	-8.6
Eastern	1.814	13.90	34	7	58.8	0	-2.9	-12.7
Volta	1.297	9.94	42	10	42.7	4.2	-11.8	-8.8
G. Accra	1.534	11.75	47	7	2.8	0	-69.2	-10.7
Total	13.053	100.00	—	—	386.9	190.0	—	—

1. Independent estimates by (Ministry of Agriculture) MoA.

Source: Ministry of Agriculture (MoA). Estimates of commercial surpluses are based on independent estimates of population and per capita consumption.

2. kg/person.

3. Thousand metric tons.

They assume 30 percent for feed, seed, industrial use, and waste. The sum of commercial surpluses and shortfalls do not balance in 1987.

Table II. Production of cereals, 1980-1988.

Cereals ¹	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Maize	382	378	346	172	574	411	559	553	581
Rice	78	79	36	40	64	90	70	88	88
Sorghum/millet	213	250	162	96	140	155	160	271	290

1. Thousand tons.

Source: Ministry of Finance & Economic Planning - Accra

Strategies at NAES

The NAES has been mandated to put priority on :

- crop improvement
- on-farm research
- crop management.

With reference to crop improvement, research strategies in the North of Ghana are also aimed at making an effort to achieve varieties that are able to tolerate dry spells. This includes among other factors the development of different maturity groups of different

crops to cater for different rainfall distribution patterns across the area [2] and also to develop adequate cropping systems adapted to the needs of farmers in the different zones of Northern Ghana [3].

Agrometeorological research

In 1988 an assessment of the physical environment of semi-arid Ghana [2] showed the significance of the influence of rainfall on the practised cropping systems. These cropping systems have been grouped into classes based on dominance of specific components [4,5] within the systems in the various locations (figure 2).

In 1989 research in the evaluation of crop performance under the erratic rainfall regime commenced. The approach used was the analysis of historical weather data particularly rainfall data from 1953-1988, which allows the assessment of climatic resources for cropping potential and evaluation of risks to cropping. The analysis looked like:

- the average date of onset of the growing season and its variability
- the average end of the growing season and its variability
- duration of the growing season in relation to the different crops on the average and its variability
- the probabilities of receiving rainfall to meet potential water demand during the growing season
- the probable period of dry spells during the cropping season for the selected varieties and strategies to be devised to overcome the effects of drought.

Results

Rainfall variability and drought are the most important factors limiting crop production in semi-arid Ghana. The results of some of the analysis indicate the determination of the optimum planting date (table 3), the onset and ending of the rains (table 4), and the length of the growing season (table 5) for some locations in the area.

The results for each location are related to its ecological zone. Although the month of May is the optimum planting date for all the locations yet the guinea savanna locations have a longer growing season than the Sudanian savanna (table 5). The results suggest that it is safe to use longer maturity varieties in the Guinea savanna zone (full season varieties 125-145 days).

Future work

Included in the on-going research to meet the objectives of the NAES are the following:

- The calculation of moisture stress probabilities using rainfall and evapotranspiration data. The length of the rainy season is thereby divided into periods of various developmental stages of the crop. This is considered to be important because the water needs differ according to developmental stages and so is the sensitivity of water stress.

– An examination of the data for over long periods (30 years or more) can help expose expected frequency of drought occurrence during crop life depending on soil type.

Table III. The number of times the computed planting date occurred in each month for selected locations in Ghana (1953-1988) [1].

Location	March	April	May	June	July	August	September
Nyankpala	2	5	14	6	2	2	1
Yendi	1	12	15	2	0	1	0
Damongo	2	4	18	6	1	0	0
Wa	1	11	12	4	0	2	0
Navrongo	0	5	23	3	0	0	0
Manga	1	9	18	7	0	0	0

Table IV. Percent occasions of onset of rains in May and the ranges of onset and ending of rains for selected locations in Ghana (1953-1988) [1].

Location	% Onset in May	Onset of rains		Ending of rains	
		Range	Av. date	Range	Av. date
Nyankpala	79	2-30	16 May	1.10-10.11	22 oct
Yendi	27	1-29	15 May	29.09-7.11	28 oct.
Damongo	47	8-31	20 May	5.10-23.11	30 oct.
Wa	8-31	22 May	29.09-31.10	15 oct.	
Navrongo		1-19	15 May	23.09-25.11	24 oct.
Manga	56	2-27	15 May	24.09-3.10	12 oct.

Table V. Number of years with indicated length of growing season (LGS) for selected locations in Ghana (1953-1988) [1].

Location	75-100 days	101-125 days	126-150 days	151-175 days	176-200 days	201-250 days	Total in years
Nyankpala	4	4	11	7	4	2	32
Yendi	0	0	4	12	12	3	31
Damongo	0	2	11	11	6	1	31
Wa	0	1	9	12	5	1	30
Navrongo	0	1	13	8	8	2	32
Manga	1	4	13	11	6	0	35

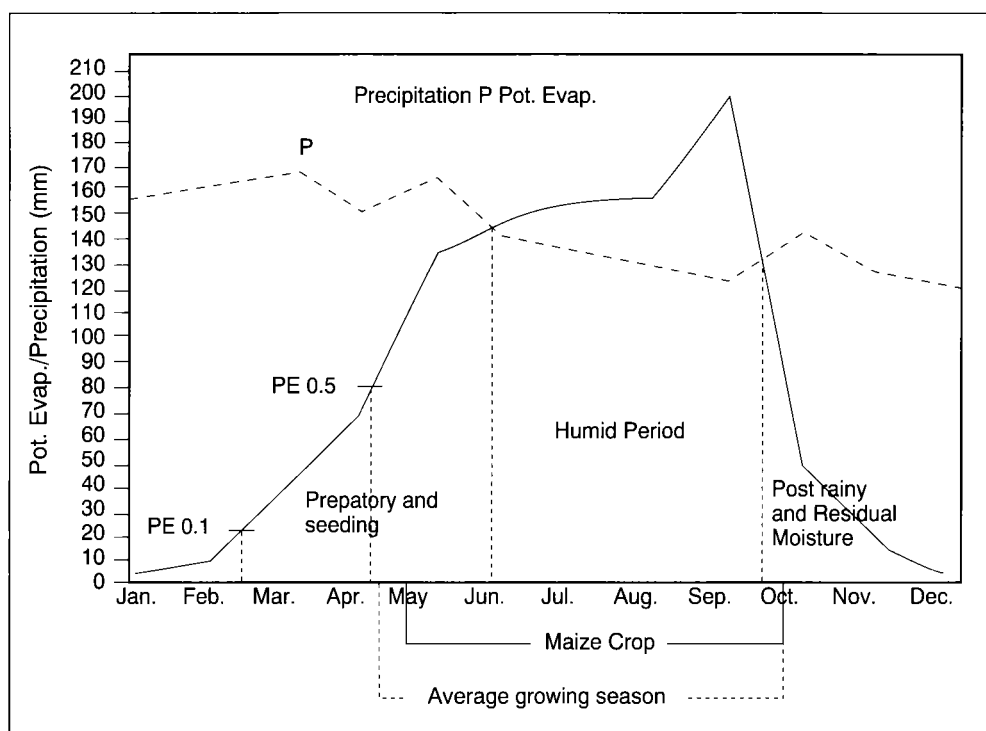


Figure 3. Mean monthly P and PE (1977-1986) (Nyankpala) [1].

– The probability of receiving rainfall to meet potential water demand during the growing season.

Potential evapotranspiration is calculated using methods by Penman [6] and Turc [7]. In future lysimetric studies on crop water use for both rainfed and irrigated crops shall be undertaken.

Conclusion

The recommendations we hope to arrive at, shall help the farmer in:

- the choice of crop varieties with different growth cycles which could fit well within the moisture availability period at different locations;
- giving an idea regarding the relative dependability of rainfall and the length of the rainy season at various locations;
- giving an idea or even dates of the beginning of the preparatory, humid, moist periods and possible timing of field operations if data is computed for different locations.

Using methods by Cocheme [8] the moisture balance (eg. figure 3) enables the farmer to programme field operation and take decisions for crops in advance for various locations in the two ecological zones.

The agrometeorology unit in this Institute is still young and efforts are being made to improve existing facilities to foster the acceleration of the food production potential of the mandate area.

References

1. Kasei C.N., Afuakwa J.J. (1991). Determination of optimum planting date and growing season of maize in the northern savanna zone of Ghana. In: "Sivakumar M.V.K., Wallace J. S., Renard C. and Giroux C. eds, Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone (Proc. Int. Workshop, Niamey, Niger). Inst. of Hydrology, Wallingford, U.K.: IAHS Press ; 199: 593-600.
2. Kasei C.N. (1988). The physical environment of semi-arid Ghana. In: P.W. Unger, T.V. Sneed, W.R. Jordan and R. Jensen eds, Challenges in Dryland Agriculture. A global perspective. Texas Agricultural Experiment Station, Amarillo/Bushland, Texas. USA, 350-54.
3. Schmidt G., E. Frey eds (1988). Crop Rotation effects in savanna soils at the Nyankpala Agricultural Experiment Station. Wiekersheim, Germany: Margraf Scientific Publ.
4. Naes (1983). Nyankpala Agricultural Experiment Station. Annual Report.
5. Nabilla P.M. (1988). Cropping Systems of semi-arid Ghana - Practice and Research. In: P.W. Unger. T.V. Sneed, W.R. Jordan and R. Jensen eds, Challenges in Dryland Agriculture. A global perspective. Texas Agricultural Experiment Station, Amarillo/Bushland. Texas, USA, 784-7.
6. Penman H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. A, 193: 120-45.
7. Turc L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12 (1) : 13-49.
8. Cocheme J. (1986). Agroclimatology methods. In: Proceedings of the Reading Symposium, UNESCO/Paris, 235-48.

6

Rainfall analysis for agricultural production in the Nigerian savanna

J.J. OWONUBI

Institute for Agricultural Research (IAR), Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria

Rainfall is increasingly a source of concern, particularly in the rainfed agricultural areas of the world. Typical of this rainfed agricultural area is the West African Savanna, where the scarcity of water and uncertainties in both the amount received and in spread, have continued to pose major constraints to the rational development of agriculture and have contributed significantly to the poor yields and high variability in crop production from year to year. The almost total dependence of agriculture on rainfall in the savanna implies that any meaningful agricultural research within the zone must incorporate an assessment of this resource.

The IAR (Institute for Agricultural Research), right from its establishment in 1927, began collecting weather data as a routine to aid the interpretation of field research data. This paper will discuss the results that have so far emerged from analyses of the weather data and what problems exist in the application of these results to agricultural planning and production in the Nigerian savanna.

Sources of data

- Establishments involved in the generation of meteorological data in Nigeria include:
- the Federal Department of Meteorology;
 - government farm centres;

- schools;
- agricultural research institutes;
- inland waterways;
- private companies;
- river basin authorities;
- utility boards;
- agricultural development projects.

The Federal Department of Meteorology, Farm Centres, Schools, Inland Waterways and Agricultural Research Institutes were the primary sources of agrometeorological data through the nineteen-sixties and early seventies but most stations located in the Farm Centres and Schools have since closed down while the contribution from the Federal Department of Meteorology has dwindled to data from airports alone.

The IAR built and maintained five agrometeorological stations. In addition to data generated at these stations, the Institute collects data from all the other sources in the Nigerian savanna and presently has a data pool of over 160 stations. The extent of the data in terms of the number of factors measured and the period of coverage varies from station to station. The minimum length of data is 10 while the maximum is 80 years.

Analytical methods

Until recently, Kowal and Knabe [1] had been virtually the only reference on the rainfall analysis of the Nigerian savanna. The authors provided means, standard deviation and confidence limits of rainfall at 148 stations. Akintola [2] broadened the scope of this study by including stations throughout Nigeria.

The two-part model of Stern [3] and Stern *et al* [4] which employed the Markov chain for the occurrence of rain and the gamma distribution for the spacing of lengths of dry spell enabled further characterization of rainfall using the example of a few stations only. Earlier works of Garbutt *et al* [5] analysed the mean length of dry or wet spells and the mean rainfall per rainy day while Stern *et al* [6] used a modelling approach to estimate the chance and distribution of rain at Kano (Lat. 12° 03'N and Long. 08° 32'E).

More recently, the computation of constant precipitation and constant probability as well as initial or conditional probability by the methods of Virmani *et al.* [7] was introduced into the West African savanna (for example [8-10]). The highlights of the findings of these studies and others related to the application of the results to crop production will be discussed below.

Rainfall distribution

A reliable estimate of the start of the rainy season is important to agriculture. First, the start of the rains comes at the time of highest demand on farm equipment and labour as

early establishment of crops often implies higher yield. Secondly, a reliable knowledge of the on-set of the rains eliminates the risk of poor crop establishment of repeated planting.

Kowal and Knabe [1] and Akintola [2] provided some basic definition of the Nigerian climate. The dry and wet seasons in Nigeria were distinguished by equations relating times of on-set (Y1), cessation (Y2) and consequent length of the season (Y3) to latitude (X, in degrees North) as follows:

$$\begin{aligned} Y1 &= 1.43 X - 1.31 & (r = 0.88) \\ Y2 &= 35.13 - 0.67 X & (r = 0.83) \\ Y3 &= 36.48 - 2.1 X & (r = 0.91) \end{aligned}$$

where time is measured in decades or 10-day intervals. Computed mean dates for rainfall establishment and end of rain at 10 stations across the savanna are given in table I.

Table I. Computed dates of rainfall establishment and end of rains at some selected locations in the Nigerian savanna.

Location	Latitude (N)	Rainfall Establishment	End of Rains
Yandev	7°23'	April 3	November 2
Ilorin	8°29'	April 18	October 25
Mokwa	9°18'	April 30	October 19
Lokoja	9°48'	May 7	October 16
Samaru	11°11'	May 27	October 6
Maiduguri	11°51'	June 3	October 4
Kano	12°03'	June 9	October 1
Bakura	12°33'	June 16	September 27
Katsina	13°01'	June 23	September 24
Sokoto	13°01'	June 23	September 24

Rainfall amount

Mean amount and statistics of rainfall across the Nigerian savanna have been published for several locations by Kowal and Knabe [1], Odiwo [9], and Owonubi *et al* [10]. Examples of 19 stations are given in table II. What is apparent from the data is the wide variation of rainfall about the mean, with the minimum often less than half of the expected. Bauchi, Kano and Samaru data, extending longer than fifty years, are more typical of the savanna.

Another striking information from table II is the excess water during peak rainfall seasons. Plots of rainfall side by side with evapotranspiration as shown in figure 1, reveal that the length of the humid period (when rainfall exceeds potential evapotranspiration) ranges between 40 and 130 days across the Nigerian savanna as delimited by latitudes 13 and 7°N.

Rainfall trend

In reviewing what may appropriately be called a drought, Glantz and Katz [11] proposed that the variability in rainfall in the West African Sahel may have been so frequent as to assume a normal pattern. The continuity of this variability has recently been confirmed by Jensen [12] using annual rainfall for 17 locations having a record length of 45 to 78 years. Fifteen of the stations displayed a negative trend, of which 10 were significant and ranging from -1.7 mm/year in Bauchi to -17.0 mm/year at Nguru. The average rainfall decrease during the period is 200 mm while the rate of decrease approximated 3.5 mm/year overall or a 22 percent relative decrease at each location. Rainfall decreased sharply during 1960-83 from the Northern Guinea savanna northwards at an average rate of about 10 mm/year while the decreases in the more southern locations were non-significant. This result has questioned the rationale for using unqualified long-term annual rainfall mean in agricultural planning.

Yayock and Owonubi [13] have shown the inter-relationship of potential evapotranspiration to rainfall from 1958 to 1983. The situation is that of a shrinking length of rainy season. Their data for the first three years in the 1980s showed that the beginning of the humid season (when ET is lower than precipitation) has been delayed by about 12 and 30 days compared to 1971-80 and 1961-70, respectively while the end of the season

Table II. Summary statistics of long-term annual rainfall across the Nigerian savanna.

Station	Lat. N (°)	Long. E (°)	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean (mm)	SD (mm)	CV (%)
Argungu	12 45	04 31	597	970	727	100	14
Bauchi	10 17	09 49	416	1493	1061	182	17
Birnin Kebbi	12 23	04 11	305	1048	751	159	21
Biu	10 36	12 12	460	1347	880	226	26
Gombe	10 17	11 07	587	1142	871	162	19
Gusau	12 10	06 42	554	1299	863	194	22
Jos	09 52	08 54	943	1857	1397	185	13
Kaduna	10 36	07 27	884	1684	1244	196	16
Kafanchan	09 36	08 18	656	2096	1632	377	23
Kano	12 03	08 32	416	1299	816	186	23
Katsina	13 01	07 41	439	994	711	136	19
Kontagora	10 22	05 29	597	1526	1143	196	17
Maiduguri	11 51	13 05	437	884	652	128	19
Malumfashi	11 47	07 38	532	1548	995	202	20
Nguru	12 53	10 28	206	678	520	114	22
Potiskum	11 42	11 02	361	1074	744	194	26
Samaru	11 11	07 38	608	1479	1051	182	17
Sokoto	13 01	05 15	388	979	690	160	23
Yola	09 14	12.28	759	1207	958	141	15

was conversely hastened by 3 and 10 days relative to 1971-80 and 1961-70. Jensen [12] estimates the delay in the start of the growing season to be 10 days per decade in the Northern Guinea and Sudan savannas.

Dry spells

The occurrence of dry spells immediately after sowing or germination and during flowering are considered to be crucial for crop production. The first type creates a need to replant because the roots of seedlings are not extensive enough to keep the plants alive through a dry spell lasting longer than five days. The second type causes the failure of pollen germination and seed formation which result in partly or wholly unfilled heads at

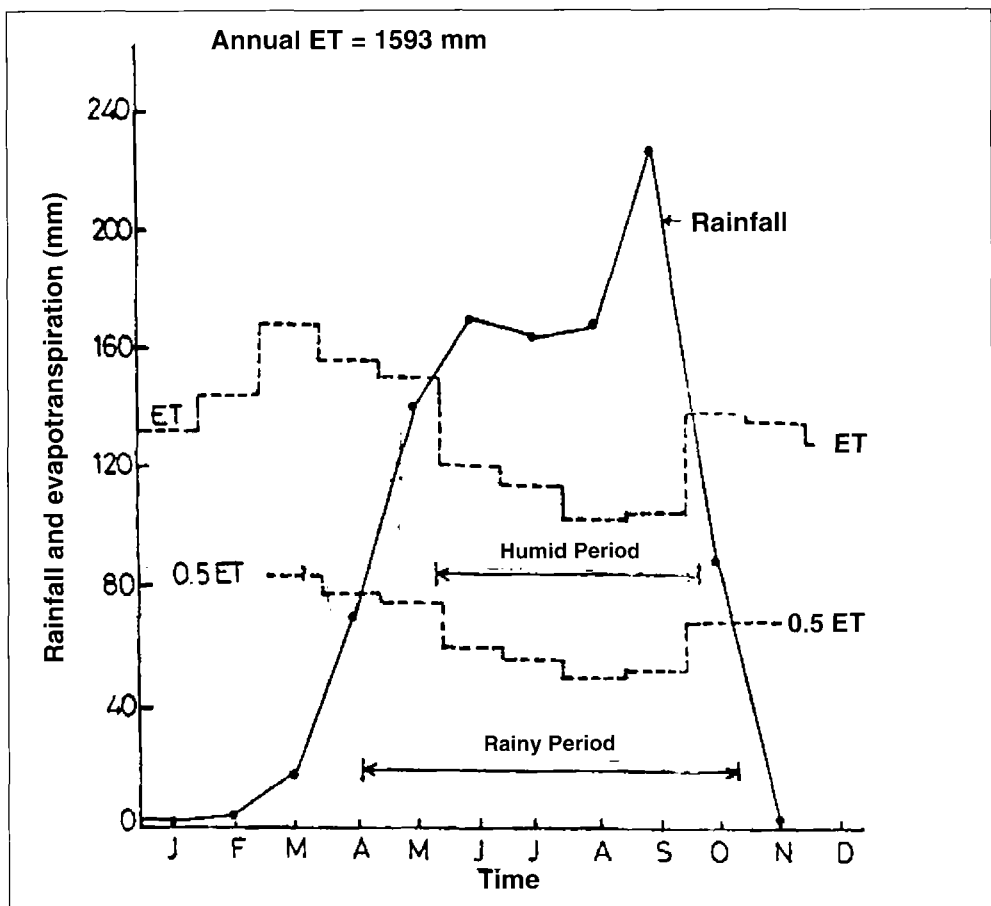


Figure 1. Rainfall and evapotranspiration patterns at Mokwa.

harvest. In a 25-year rainfall analysis covering the period 1951 to 1975, Benoit [14] found that the probability of having a dry spell during flowering (July-August) is negligible in the Northern Guinea savanna, but increases both northward and southward from this central area. The probability of dry spells immediately after sowing or germination (April-June) throughout the savannas is however considerably greater than during flowering. With currently available analytic facilities, it is possible to compute probabilities (initial and conditional) of dry spell occurring at any specific time of year at various locations across the country as presented for Kano and Katsina in table 3. Although dry spells cause a false start of the growing season in one out of every five years and significantly reduce grain yields in most parts of the northern States of Nigeria, a dry spell is a local phenomenon as distinct from the generally widespread rainfall deviations following global-scale droughts.

Table III. Initial and conditional probabilities of receiving at least 10 mm of rainfall per week at Kano and Katsina.

Std. Week	Kano				Katsina			
	W (%)	W/W (%)	W/D (%)	MR (mm)	W (%)	W/W (%)	W/D (%)	MR (mm)
19	28	48	40	9.8	29	47	22	7.6
20	42	63	35	13.6	29	77	22	10.4
21	46	60	50	18.3	38	36	50	14.9
22	55	61	66	20.1	45	61	64	17.8
23	63	69	70	21.3	63	61	59	19.3
24	69	86	78	24.5	61	60	62	19.1
25	83	82	100	34.2	61	78	84	18.6
26	85	85	73	35.5	80	76	89	24.4
27	83	88	84	37.1	78	83	80	29.7
28	88	92	78	39.7	83	82	88	37.6
29	90	39	86	46.5	82	95	76	46.7
30	89	99	100	51.8	92	91	100	49.6
31	99	98	100	56.6	92	96	100	55.5
32	98	98	100	72.4	96	98	50	67.7
33	98	96	100	61.2	96	98	100	65.9
34	96	96	34	70.0	98	91	0	53.2
35	93	85	100	55.5	89	86	100	49.3
36	86	86	70	41.3	87	72	84	38.2
37	83	66	42	33.6	74	73	59	31.3
38	62	52	41	24.3	69	39	43	22.9
39	48	31	19	18.5	40	17	15	12.1
40	25	12	4	8.7	16	0	6	4.7

W = Initial probability of receiving 10 mm rainfall.

W/W = Probability of receiving 10 mm rainfall if previous week is wet.

W/D = Probability of receiving 10 mm rainfall if previous week is dry.

MR = Long-term mean weekly rainfall (mm).

Implications for crop production

Over 90 percent of crop production in Nigeria is rainfed. Even in areas where irrigation is practised, the command area is directly or indirectly related to rainfall amount. The results of the analysis of rainfall in the savanna which indicate high variability make the monitoring of rainfall crucial. The choice of crop, cropping system, and variety is dependent on both the available rainfall and length of the growing season, particularly so in the tropics where temperature is less of a constraint. On the strength of the increasing adverse rainfall environment in the Nigerian savanna over the past three decades, the focus of the IAR breeders has shifted to the production of short-season crop varieties, some of which are described in table IV.

Table IV. Available varieties of short-season sorghum, millet, cowpea and groundnut for production in the drought-prone areas of Nigeria.

Crop/Variety	Maturity period (days)	Potential yield (tons/ha)	Characteristic/Seed type
Millet:			
SAMMIL-3	70	1.5	Dwarf
SAMMIL-6	75	3.0	Disease resistant
SAMMIL-7	75-80	3.0	Disease resistant
Sorghum:			
SAMSORG-2	90-110	3.0	Seed Reddish with brown specks
SAMSORG-5	90-110	3.5	Seeds cream with brown specks
SAMSORG-6	90-110	3.0	Light yellow seeds
SAMSORG-7	90-110	3.5	Cream coloured seeds
SAMSORG-8	90-110	3.5	White seeded
SAMSORG-9	90-110	3.5	Red coat with white endosperm
Cowpea:			
SAMPEA-5	65-75	2.4	Brown, medium-sized seeds
SAMPEA-7	65-90	2.5	Photo-insensitive; brown, medium/large seeds
Ife Brown	75-90	2.0	Brown, medium-sized seeds
SAMPEA-4	75-90	2.0	White, medium/large seeds
Groundnut:			
SAMNUT-13	90-100	2.5	Light tan, small seeds
SAMNUT-14	90-100	2.3	Light tan, small/medium-sized seeds
SAMNUT-17	90-100	2.8	Flesh coloured seeds; high oil content
SAMNUT-18	100-100	2.8	Red coloured seeds

Conclusion

From the foregoing, it is obvious that there are tools for extracting substantial information from the routine rainfall data that are measured in existing weather stations. However the density of these stations and the availability of computing facilities and/or

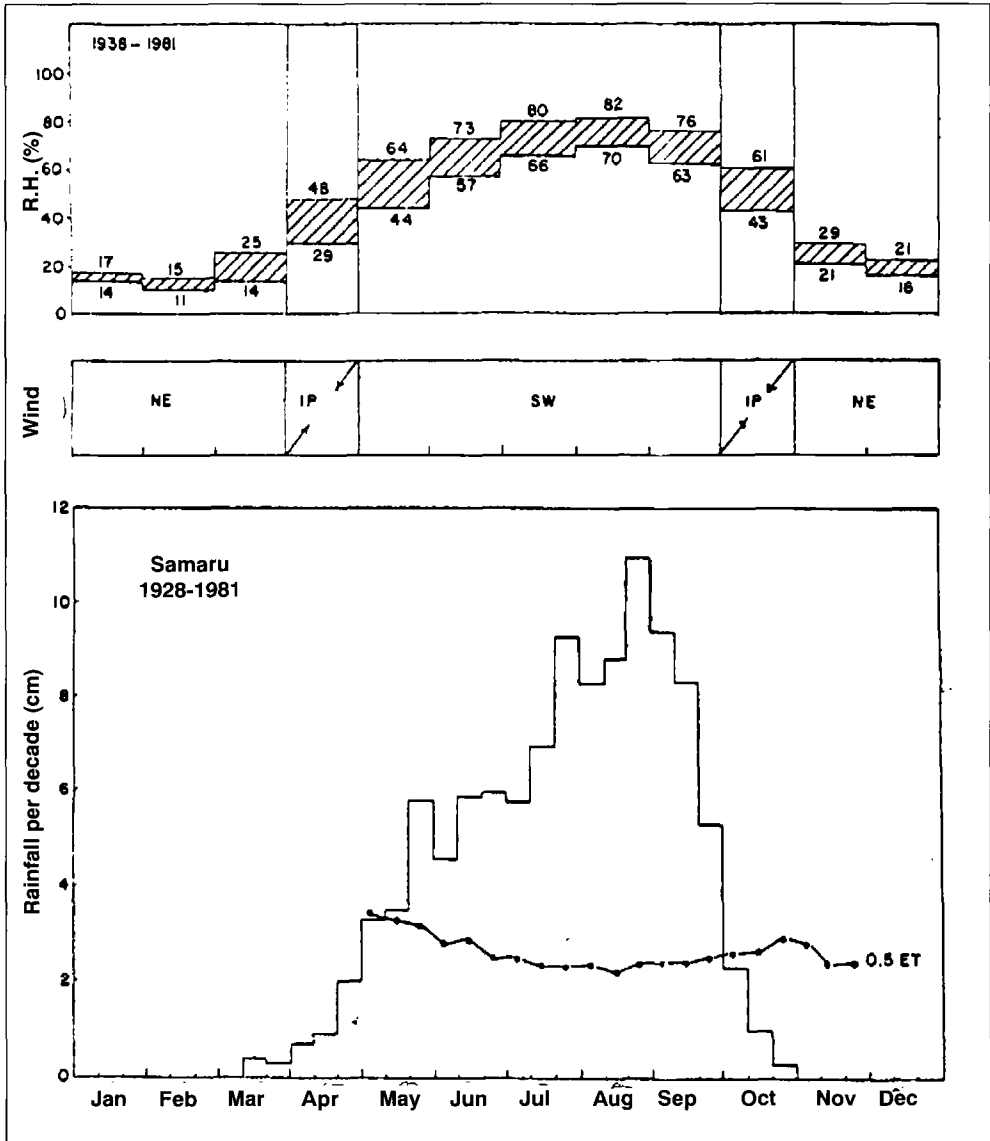


Figure 2. Long term mean relative humidity, wind direction and rainfall for Samaru.

expertise remain largely inadequate. This is despite the extreme variability of rainfall in the savanna which constitutes a major constraint to crop production. As the level of analysis of historical rainfall data in the Nigerian savanna improves and provides some guide for agricultural planning, the farmers appear to have shifted their attention to the yearly deviations from long-term means. These yearly variations can be provided only if the cause(s) of rainfall in this environment can be monitored.

Short-term forecasts would necessarily rely on identifying indicators of rainfall trend within each year and/or remote sensing. Although remote sensing holds much promise for the future [15], its high technology and cost requirement makes this option presently unavailable to Nigeria.

On the assessment of rainfall indicators, it is known that the beginning of rains in any season is associated with a shift in wind direction and rising relative humidity (figure 2). A logical base in rainfall forecasting in this region would therefore appear to be in determining the stability of the intermediate period between the dry and wet seasons and what relationships exist (if any) between its timing and annual total rainfall. Preliminary assessment of the time of start of the growing season as an indicator of expected annual rainfall at Samaru [16] shows that this approach has some merits. We found a significant linear but negative relationship between the time of start of the growing season and annual total rainfall fitting the equation:

$$y_4 = 1491.5 - 2.998X_1$$

where

y_4 = total annual rainfall (mm); and

X_1 = day of start of the growing season on a scale 1 through 365 per year,

while this relationship may be locally useful, any meaningful forecast can only incorporate this factor into a comprehensive monitoring of the environment in the savanna.

References

1. Kowal J.M., Knabe D.T. (1972). An agroclimatological atlas of the Northern States of Nigeria. Institute for Agricultural Research, Ahmadu Bello University, Zaria.
2. Akintola J.O. (1986). Rainfall distribution in Nigeria, 1982-83. Impact Publishers, Ibadan.
3. Stern R.D. (1980). The calculation of probability distributions for models of daily precipitation. Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B 28: 137-47.
4. Stern R.D., Dennett M.D., Dale I.C. (1982a). Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. I. Direct Methods. Expl. Agric. 18: 223-36.
5. Garbutt D.J., Stern R.D., Dennett M.D., Elston J. (1981). A comparison of the rainfall climate of eleven places in West Africa using a two-part model for daily rainfall. Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B 29: 137-55.
6. Stern R.D., Dennett M.D., Dale I.C. (1982b). Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. II. A modelling approach. Expl. Agric. 18: 237-53.
7. Virmani S., Sivakumar M.V.K., Reddy S.J. (1978). Rainfall probability estimates for selected locations of semi-arid India. ICRISAT Res. Bull. n° 1.

8. Sivakumar M.V.K., Virmari S.M., Reddy S.J. (1979). Rainfall climatology of West Africa: Niger. ICRISAT Information Bull. 5, Patancheru, A.P. India.
9. Odiwo A.E. (1989). Agrostatistical assessment of rainfall in the dry savanna zone of Nigeria. MSc. Thesis, Ahmadu Bello University, Zaria.
10. Owonubi J.J., Odiwo A.E., Asiribo O.E., Abdulmunin S. (1991). Rainfall probability estimates for agricultural production in the Nigerian savanna. Samaru J. Agric. Res. (in press).
11. Glantz M.H., Katz W. (1977). When is a drought a drought ? *Nature*, 267: 192-3.
12. Jensen J.R. (1990). Decreases in point annual rainfall in Northern Nigeria. Conference paper to the First Biennial Hydrology Symposium, Maiduguri, 89: 1905-83.
13. Yayock J.Y., Owonubi J.J. (1986). Weather-sensitive agricultural operations in groundnut production: the Nigerian situation. In: Sivakumar, *et al* (eds). ICRISAT: Agrometeorology of Groundnuts, 282 p.
14. Benoit P. (1977). The start of the growing season in Northern Nigeria. *Agric. Meteorol.*, 18: 91-9.
15. Prince S.D., Justice C.O., Los S.O. (1990). Remote sensing of the Sahelian environment: a review of the current status and future prospects. ACP/CEE, Lome Convention, 128 p.
16. Owonubi J.J., Olorunju S.A.S. (1985). The relationship of times of first rain and the beginning of the growing season to annual rainfall at Samaru, Nigeria. *Samaru J. Agric. Res.* 3 (1 & 2): 3-8.

7

Crop yield estimation and forecasting in Niger using NOAA AVHRR data

C. CONESE, F. MASELLI, A. DI VECCHIA, B. SENNI, G. MARACCHI
IATA-CNR, P. le delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italy

Introduction

The use of remotely sensed data has shown its maximum potential in arid and semi-arid countries mainly for the study and assessment of vegetation type, density and status on a regional scale. In particular, in the last few years many studies have been conducted concerning the utilization of NOAA NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) data to monitor tropical and sub-tropical landscapes. NDVI maximum value composites (MVCs) accumulated throughout a rainy season have been demonstrated to be a good indicator of environmental conditions in semi-arid environments, and have been particularly tested in the Sahel [1-3]. In this area, such data have been found to be linearly related to global primary productivity [4].

Some advances are however still necessary to practically utilize NDVI data for crop monitoring and forecasting, which would clearly be a major application. A marked geographical variability has in fact been found in the relationship NDVI/active green biomass, depending on many environmental factors (vegetation and soil types, terrain

topography, etc.). Moreover, agricultural production is an extremely variable proportion of total primary production, so that its identification is highly problematic when working on a regional scale. Also, the use of data accumulated during a whole rainy season tends to limit practical applications for yield forecasting.

In this context, the present work has been carried out in collaboration with a STD Program of the CEE ; the objective of the work has been the development of an operative method for NDVI data processing aiming at environmental monitoring, and, more specifically, at crop yield assessment and forecasting in sahelian regions. Some quantitative tests of the procedure developed have been made with data taken from four successive rainy seasons in Niger. The first results, reported in the present paper, are quite encouraging also for applications.

Materials and methods

Study site, ground and satellite data

Niger has been selected as study area ; this is a typical sahelian country, characterized by high temperatures throughout the whole year and scarce precipitations during the brief rainy season. Its landscapes range from woodland in the southern part to brushland, grassland and desert going towards north. The country is divided into seven administrative departments, which cover the whole environmental variety (figure 1).

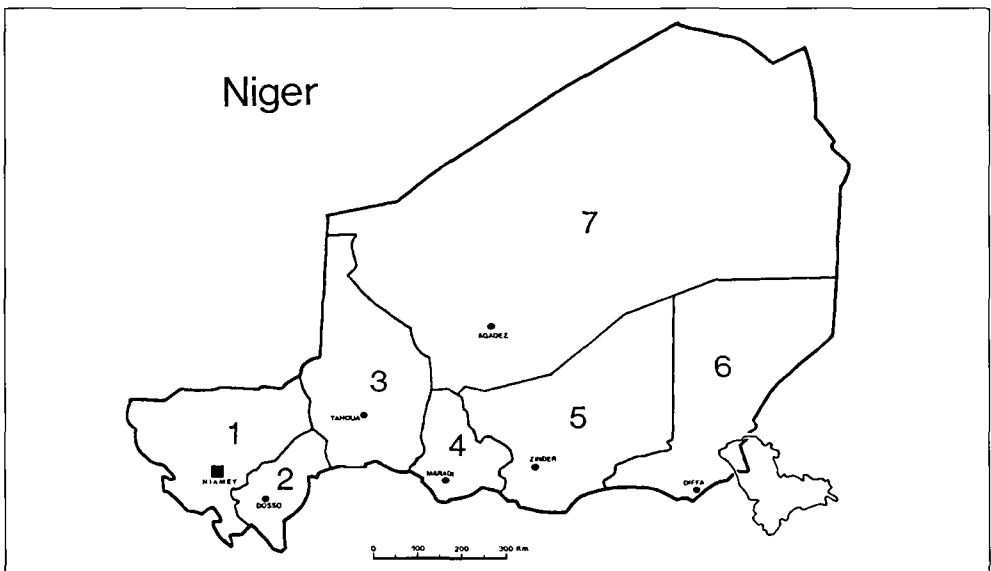


Figure 1. Study country divided into seven administrative departments.

Four years were considered in the study (1986-1989). Information regarding crop production was derived from the FAO archives in Rome. Even though the precision of the FAO estimates is somewhat questionable, they are the only source of information about agricultural production covering the whole country in the last decades. Millet and sorghum crops were considered, as they account for more than 90 % of the total agricultural production in Niger. Mean grain yield of each department was selected as the available crop parameter most suitable for correlation with the NDVI signal.

The NOAA AVHRR data in LAC format of the four rainy seasons had been acquired by the receiving station of Maspalomas (Spain). About 20 AVHRR scenes of the whole country were selected for each year among those less affected by cloud contamination.

Data processing

The processing of the satellite data was performed by the following steps :

1. Georeferencing of the scenes by means of the reference grids present on the NOAA images ; a bivariate third degree polynomial equation was employed for scene rectification.
2. Reduction to a smaller format of the images by averaging 4x4 original pixels, to reduce the subsequent computational expences ; little loss in information is expected by this operation in this fairly homogeneous environment [5].
3. Computation of channel 1-2 apparent reflectances through the use of the relevant transformation coefficients [6].
4. Calculation of NDVI according to the well known formula :

$$NDVI = (R2 - R1) / (R2 + R1) \quad (1)$$

where

R1 = apparent reflectance in channel 1 ;

R2 = apparent reflectance in channel 2.

5. Cloud masking by means of a thermal threshold in band 4.
6. Maximum value compositing of several temporally adjacent NDVI images [7].
7. Normalization of the MVC NDVI images on some desert areas assumed with constant, negligible vegetation signal. This step was carried out in order to reduce the effects of sensor's radiometric degradation and of residual atmospheric perturbances [7-8].
8. Temporal interpolation of the NDVI at a fixed date ; two MVCs for each year, the first in the second half of July and the second in the first part of August, were employed to linearly interpolate the NDVI values at the end of July. This was done to make possible interannual comparisons whilst avoiding the computation of data accumulated during the whole rainy season, which is expensive and not suitable for forecasting purposes.

The date of interpolation (31 July) was selected on the basis of ecophysiological considerations and of previous evaluation of NDVI annual profiles. The end of July is the termination of the most variable period in terms of rainfall and just preceeds the peak of vegetation activity in August [3]. Generally, if the rainy season begins late or with scarce precipitations, there is no time for complete plant development. Thus it can be assumed that plant conditions at the end of the season are chiefly controlled by the precipitations fallen during the first part of it, until the end of July. Accordingly, vegetation status at this

date should be highly responsive to the rainfall totals of the preceding months and should express information about final primary production, which is the working hypothesis of the present research.

9. Averaging of NDVI levels over each department for comparisons with final crop (millet and sorghum) yields. The mean values were computed after eliminating the boundary pixels of the departments, so as to alleviate possible errors due to the georeferencing of the scenes.

Results

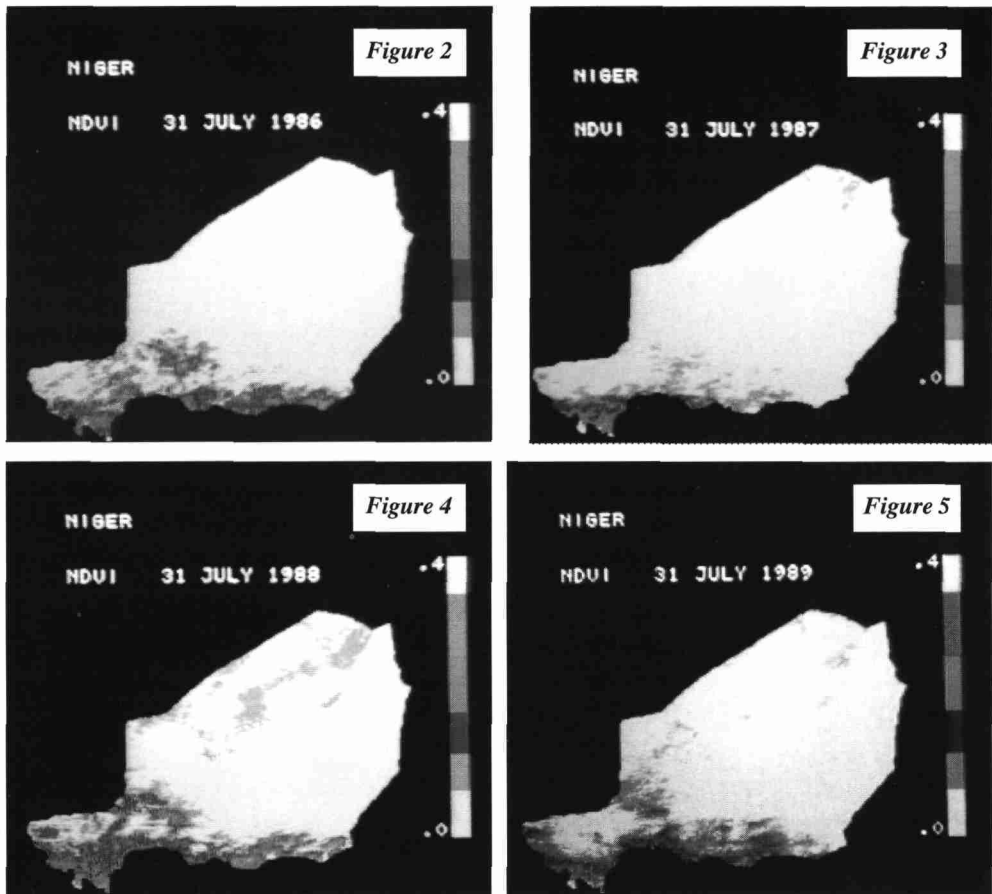
Comparison NDVI/crop yield

Figures 2-5 report the NDVI measured at the end of July of the four years considered (1986, 1987, 1988, 1989). From these figures, three ecological zones can be identified in Niger, going from North to South : the Sahara desert (NDVI always low), the Sahelian belt (NDVI highly variable from year to year) and the woodland zone (NDVI always medium-high).

Actually, NDVI data can be expected to be a good indicator of plant productivity only in areas where this parameter is highly variable due to environmental conditions. Thus, the comparisons between these factors were restricted to the sahelian departments (transition zone), which surely show the features required. The selection of the sahelian departments was accomplished by the use of the relevant multitemporal NDVI coefficients of variation (table 1), as suggested by Tucker *et al.* [9]. A department with quite low coefficient of variation was discharged as not belonging to the Sahel (department 2, chiefly covered by woodland). Another department (department 7, almost completely covered by desert) was also not taken into consideration because it is practically lacking in crop production. These two departments were therefore not considered in the following processing.

Table I. Multitemporal NDVI coefficients of variation for each department of Niger.

Depart.	Mean	Stand.Dev.	Coeff.Var.
1	0.0852	0.0221	0.2595
2	0.1438	0.0147	0.1023
3	0.0781	0.0231	0.2957
4	0.0992	0.0238	0.2399
5	0.0627	0.0122	0.1957
6	0.0291	0.0066	0.2293
7	0.0488	0.0100	0.2056



Figures 2-5. Study country: NDVI at the end of july of the four years considered (1986-1989).

Figure 6 reports the comparison between the averaged NDVI values of the 5 sahelian departments in the 4 years and final grain yield. The relationship is not well defined, with a rather low correlation coefficient. In addition to this, part of the observed variance in the two parameters has surely a geographic origin, deriving from permanent differences in landscape ; this variance is therefore static in nature, giving no useful information about the interannual environmental variability.

This clearly means that the NDVI cannot be directly considered as a good indicator of crop yield. In effect, the vegetation index measured at suitable times in a season has been demonstrated to be linearly correlated with total plant productivity, not only with crop yield [4, 8, 10-12]. Moreover, many external factors can affect this relationship, such as variations in vegetation quantity, type and density and differences in soil type and terrain topography. In practice, it is nearly impossible to deterministically separate the NDVI signal deriving from natural vegetation from that deriving from the crops of interest on a

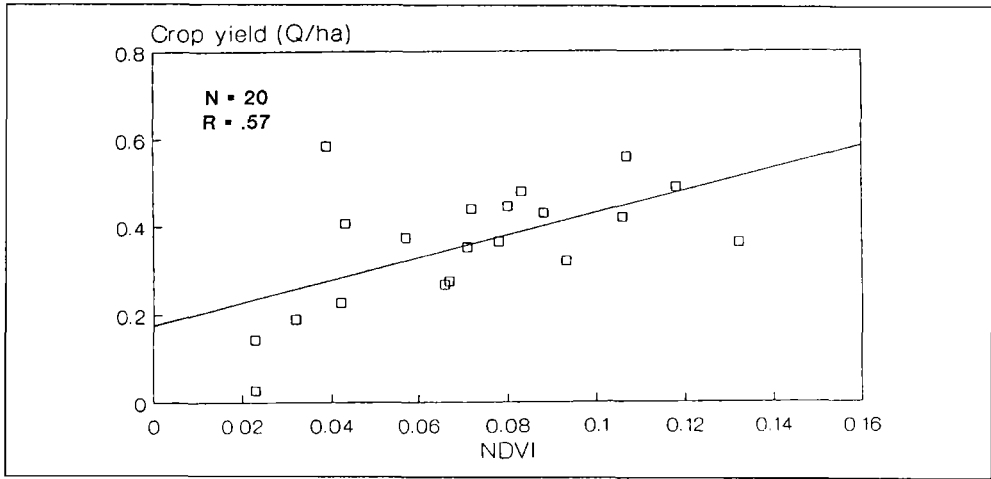


Figure 6. Relationship between NDVI at the end of July and final crop yield in the 5 sahelian departments for the period 1986-1989.

regional scale. Thus, only the global actual productivity of the surface monitored can be assessed, which can be assimilated to crop yield only when all the other environmental factors have been taken into consideration.

Comparison standardized NDVI/Crop yield

In order to circumvent similar problems related to geographical differences in land resources, Kogan [13] proposed the transformation of MVC NDVI into VCI (Vegetation Condition Index), following the formula :

$$VCI = (Max_NDVI - NDVI) / (Max_NDVI - Min_NDVI) \quad (2)$$

where

Max_NDVI = maximum NDVI in a plot for the period considered.

Min_NDVI = minimum NDVI in a plot for the period considered.

The aim of the transformation, based on the concept of ecological potential of an area, is to remove the differences due to geographical resources (climate, topography, soil and vegetation types) from the examined signal. The VCI values were generally referred to a regular geographic grid and were accumulated through a rainy season like the usual NDVI. The idea was surely interesting and the method was demonstrated to be both powerful and efficient. Some points can however be examined in order to envisage some possible improvements.

The identification of minimum and maximum NDVI is inherently not statistically stable, because the selection of proper values is probabilistically very difficult and these can strongly change with the consideration of new data. Moreover, the proposed normalization over a regular geographical grid can generate some problems for direct comparisons with conventionally acquired data, and, as already seen, the utilization of NDVI accumulated during a whole rainy season is often impractical for forecasting purposes.

For all these reasons, in the present work a different method of standardization is put forward according to the following formula in which all the symbols refer to NDVI measured at the end of July over a department :

$$\text{NDVI}^* = (\text{NDVI} - \text{M_NDVI}) / \text{SD_NDVI} \quad (3)$$

where

NDVI* = standardized NDVI ;

M_NDVI = multiannual NDVI mean ;

SD_NDVI = multiannual NDVI standard deviation.

The use of more stable statistical parameters should improve the characterization of geographical variability without absolutely losing the original effectiveness, so that the new method can avoid most of the problems mentioned.

This procedure was applied to the NDVI values of all the departments, and, to compare the NDVI* with the ground collected data (millet and sorghum grain yield), these were also subjected to a similar process of standardization over the relevant multitemporal means and standard deviations (grain yield*).

The results of the comparison between standardized variables are reported in figure 7. The correlations coefficient is quite high, with an increase of about 28. This clearly testifies to the effectiveness of the standardization process, which succeeds in isolating the geographical variability that partly obscured the relationship between the original variables, and, above all, gives emphasis only to the information related to interannual variations in vegetation activity. The results also indicate that NDVI levels measured at the middle of a rainy season can be used to predict interannual variations in grain yield with good approximation in this kind of landscape ; this finding is clearly the most remarkable from an application viewpoint.

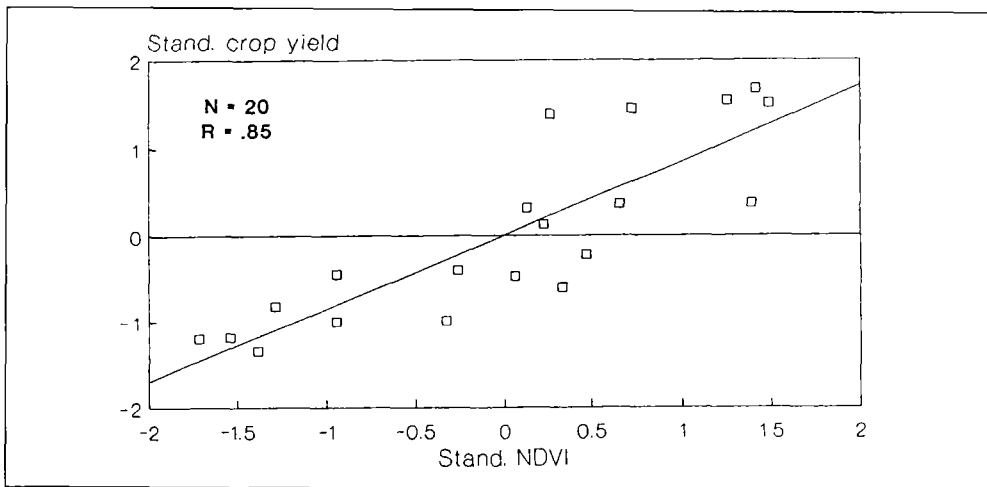


Figure 7. Relationship between standardized NDVI (NDVI*) at the end of July and final crop yield (grain yield*) in the 5 sahelian departments for the period 1986-1989.

Discussion and future perspectives

From the first results of the present work, some interesting conclusions can be drawn about the utilization of NOAA NDVI data for environmental monitoring and yield forecasting in sahelian areas.

The use of NDVI values estimated at the end of July seems to be quite efficient and straightforward ; the rationale for this is that in the peculiar environmental conditions of the Sahel information about plant productivity can be reasonably inferred from vegetation conditions at the middle of a rainy season.

The geographical standardization adopted has been highly effective to remove differences in local resources from the NDVI signal ; thus, the correlations between NDVI and environmental variables are much more notable and informative when using standardized data. The strong correlation between the remotely sensed index and final crop yield is particularly remarkable, as it allows the utilization of the former as a means not only for monitoring, but also for forecasting agricultural production already in mid Summer.

Our approach to the problem is clearly statistical, based on the present impossibility to deterministically evaluate all the parameters involved in the complex relationships between environmental factors and NDVI. Such an approach has fundamentally practical purposes, and could find its main utilization in the context of an efficient drought early warning system.

References

1. Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben B.N., Tucker C.J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Internat. Remote Sensing*, 6 : 1271-318.
2. Tucker C.J. (1986). Maximum normalized difference vegetation index images for sub-Saharan Africa for 1983-1985. *Internat. Remote Sensing*, 7 : 1383-84.
3. Townshend J.R.G., Justice C.O. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Internat. Remote Sensing*, 7 : 1435-45.
4. Tucker C.J., Van Praet C.L., Sharman M.J., Van Ittersum G. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing Environ.*, 17 : 239-49.
5. Townshend J.R.G., Justice C.O. (1990). The spatial variation of vegetation changes at very coarse scales. *Internat. Remote Sensing*, 11 : 149-57.
6. Prince J.C. (1988). An update on visible and near infrared calibration of satellite instruments. *Remote Sensing Environ.*, 24 : 419-22.
7. Holben B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Internat. Remote Sensing*, 7 : 1417-34.
8. Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A., Prevost I. (1991). AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988. *Internat. Remote Sensing*, 12 : 1259-79.
9. Tucker C.J., Newcomb W.W., Los S.O., Prince S.D. (1991). Mean and inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel : 1981-1989. *Internat. Remote Sensing*, 12 : 1133-35.

10. Prince S.D. (1991). Satellite remote sensing of primary production : comparison of results for Sahelian grasslands : 1981-1988. *Internat. Remote Sensing*, 12 : 1301-12.
11. Prince S.D. (1991). A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Internat. Remote Sensing*, 12 : 1313-30.
12. Wylie B.K., Harrington Jr J.A., Prince S.D., Denda I. (1991). Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988. *Internat. Remote Sensing*, 12 : 1281-300.
13. Kogan F.N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Internat. Remote Sensing*, 11 : 1405-19.

SESSION II

Facteurs du milieu et alimentation hydrique

Animateur : G. Raymond (CIRAD-IRCT, France)

Rapporteur : A. Brétaudeau (IPR, Mali)

8

Esquisse d'hydrosystème céréalier soudano-sahélien valorisant les précipitations

F.-N. REYNIERS

CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier, France

En Europe de l'Ouest, au XIX^e siècle, les systèmes de culture se sont intensifiés progressivement pour éviter les famines. Les contraintes de la production ont été levées par la fin de la jachère, l'augmentation des surfaces cultivées et de leurs productivités. Schématiquement, les étapes successives de ce progrès furent les introductions de techniques maintenant la fertilité en culture continue, comme le marnage ou les rotations avec des légumineuses fourragères, puis d'engrais chimiques, et enfin de variétés sélectionnées répondant à ces modifications du milieu [1]. Au cours de cette évolution des systèmes de culture, les ressources naturelles ont été grandement valorisées.

De nos jours, dans les régions soudano-sahéliennes où la nécessité de l'intensification s'accroît avec le déficit de production sur la consommation de céréales, la valorisation des ressources naturelles et en particulier de l'eau est devenue une priorité, et les étapes de transformation des systèmes de culture des régions tempérées sont une référence utile pour la réflexion. Dans cette zone soudano-sahélienne, les critères de valorisation des précipitations par le système de culture sont : l'accroissement de la productivité des céréales, actuellement de 600 à 900 kg/ha selon les régions, le ralentissement de la dégradation des sols par les pluies, et une prise en compte des risques de l'agriculteur.

La question est de savoir si les pluies peuvent être mieux valorisées, et si oui, comment. Une réponse positive peut être donnée à la première question au moins pour la

partie amélioration de la productivité d'après les zonages de potentialités du mil, sorgho, maïs, effectués dans cette zone [2]. Ils indiquent en effet d'importants écarts entre potentialités et productivités en milieu paysan, et la possibilité de réduire cet écart par une meilleure utilisation des ressources pluviométriques. Pour expliciter ce diagnostic et proposer des éléments de réponse à la seconde question, la présente communication esquisse une démarche fondée sur l'étude des bilans hydriques réalisée dans le cadre des programmes fédérateurs du réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse (R3S) de la CORAF.

Hydrosystème céréalier soudano-sahélien

A la base de la démarche proposée, l'hydrosystème agricole est la partie de l'écosystème agricole conditionnant les flux hydriques générés par les pluies (figure 1). Cette notion est à rapprocher de celle plus traditionnelle de continuum eau-sol-plante, mais a l'avantage de mieux s'intégrer à l'écosystème agricole considéré.

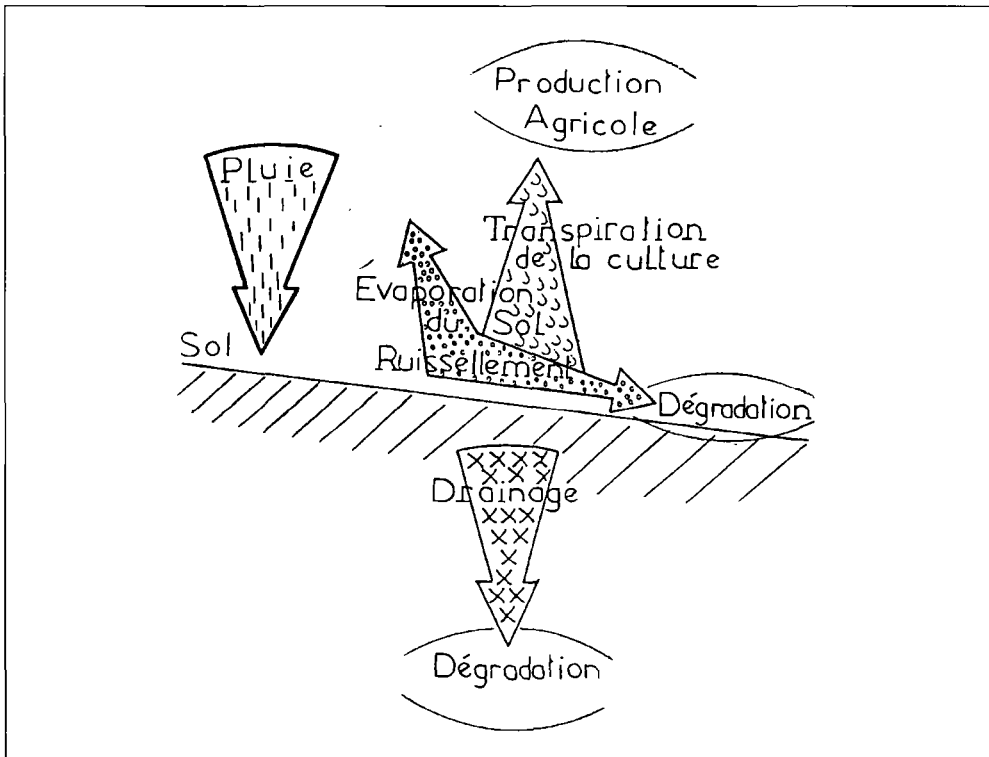


Figure 1. L'hydrosystème agricole, pluvial, caractérisé par ses principaux flux.

En subdivisant l'écosystème agricole en hydrosystème agricole, nous appliquons un des préceptes de la méthode de Descartes : *“Diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.”*

La présentation ne considérera que les composants et les fonctionnements de l'hydrosystème céréalier soudano-sahélien importants pour l'adaptation à la sécheresse des systèmes de culture.

Caractérisation de l'hydrosystème céréalier soudano-sahélien

Les composants

Les composants de l'hydrosystème agricole sont le climat, le sol et la culture. Ils seront caractérisés par des paramètres à différentes échelles s'emboîtant comme des poupées russes. Les composants de l'hydrosystème plante comprennent la rhizosphère, les stomates et l'humidité relative atmosphérique. Les composants de l'hydrosystème parcelle sont la réserve utile racinaire, l'indice de surface foliaire, la pluviométrie et la demande évaporative localisée. L'hydrosystème du versant agricole comprend un composant supplémentaire : les caractéristiques morpho-pédologiques. Les composants de l'hydrosystème régional sont les valeurs moyennes de la réserve utile racinaire, de l'indice foliaire, des estimations fréquentielles des précipitations et de la demande évaporative.

Les possibilités d'emboîtement faciliteront les transferts d'échelles. Ainsi les modalités d'intensification, établies par des expérimentations locales, pourront être extrapolées en tenant compte de la forte variabilité de l'écosystème agricole dans ces régions.

Les méthodes de caractérisation des composants sont celles de la climatologie, de la pédologie et des autres disciplines concernées.

Le fonctionnement

La caractérisation du fonctionnement de l'hydrosystème agricole est basée sur la quantification des flux hydriques présentés à la figure 1. Des expressions synthétiques de ces flux, reliées à la productivité et appelées indicateurs hydriques, sont nécessaires. Forest et Kalms [3] ont été parmi les premiers à montrer sur riz pluvial que l'ETR du cycle simulé permettait de prévoir sa production à certaines conditions. Ce premier résultat a encouragé les améliorations tant des modèles de simulation du bilan hydrique que des indicateurs hydriques liés à la productivité.

Le modèle de bilan hydrique du type réservoir tenait compte, à l'origine, de la vitesse de descente du front d'humectation du sol, de la durée du cycle découpée en phases physiologiques, et de la courbe enveloppe des coefficients cultureux. Progressivement, ont été inclus dans la modélisation les paramètres suivants : l'évaporation du sol nu en début de cycle, la vitesse d'enracinement [4, 5], le taux de ruissellement en fonction de l'état de surface [6], l'indice de surface foliaire et l'effet de techniques culturales [7].

Les indicateurs hydriques ont été améliorés en testant différentes expressions de l'ETR, ou/et du taux de satisfaction des besoins en eau. Ils ont été validés et calibrés selon diverses conditions pédoclimatiques, de techniques culturales et pour diverses espèces de céréales. L'IRESP (indice de rendement espéré), l'indicateur hydrique utilisé le plus couramment, a

été proposé initialement par Forest et Reyniers [8] pour le zonage agroclimatique des potentialités climatiques du riz pluvial du Brésil.

$$\text{IRESP} = \text{ETM}_{\text{cycle}} \times \text{ETR}/\text{ETM}_{\text{cycle}} \times \text{ETR}/\text{ETM}_{\text{phase critique}} \quad (1)$$

ou, en divisant par ETM :

$$\text{IRESP} = \text{ETR}_{\text{cycle}} \times \text{ETR}/\text{ETM}_{\text{phase critique}} \quad (2)$$

Cet indicateur (en mm) a été sélectionné pour sa facilité d'évaluation et sa robustesse. Dans l'équation (2) le premier terme, l' $\text{ETR}_{\text{cycle}}$, dépend d'une partie du rayonnement, celle photosynthétiquement active lorsque la plante transpire. Il équivaut à "un flux productif". Ce terme intègre les effets de la durée du cycle, de l'enracinement et la surface foliaire. Ces caractéristiques de la plante dépendent elles-mêmes des spécificités du milieu et des techniques culturales. Le second terme, $\text{ETR}/\text{ETM}_{\text{phase critique}}$, répond à la grande sensibilité, en particulier des céréales, au déficit hydrique pendant la phase reproductive.

Les relations entre indicateurs hydriques et productivité ont été réalisées pour le maïs, le mil et l'arachide, avec des techniques culturales et des situations pédoclimatiques variées.

L'équation du rendement s'établit ainsi :

$$\text{Rdt} = a \text{ IRESP} + b$$

Le terme a est dépendant de l'efficience de l'eau consommée. Dans les situations paysannes soudano-sahéliennes, celle-ci est généralement comprise entre 2 et 5 kg/ha/mm. Ce sont des valeurs faibles comparées aux valeurs des écosystèmes agricoles tempérés. Dans chaque type d'agrosystème agricole, les paramètres a et b sont à définir. Ce calage garantit la fiabilité des estimations de productivité.

Les capacités prévisionnelles du rendement par l'IRESP ont été démontrées dans différentes situations agricoles soudano-sahéliennes. La démonstration la plus générale a été celle sur la productivité du maïs en condition de culture intensifiée, comme l'indiquent les régressions de la figure 2 [9].

Dans les études actuelles, en parcelle paysanne, est couramment utilisé le taux de satisfaction des besoins en eau du cycle et de la phase critique [10]. Cet indicateur a toutefois l'inconvénient d'être peu sensible à certains facteurs de l'intensification comme la durée du cycle ou le niveau de fertilité.

La valorisation des précipitations

Comment obtenir la valorisation des précipitations en gérant les composants de l'hydrosystème agricole ? Comme exemples, seront présentés le photopériodisme du mil, le contrôle de l'acidification du sol, la fluctuation de la marge brute. D'autres facteurs sont aussi très importants et bien connus, comme le ruissellement ou la durée du cycle. Un avantage de la démarche hydrosystème agricole est qu'elle révèle des facteurs de la valorisation des précipitations.

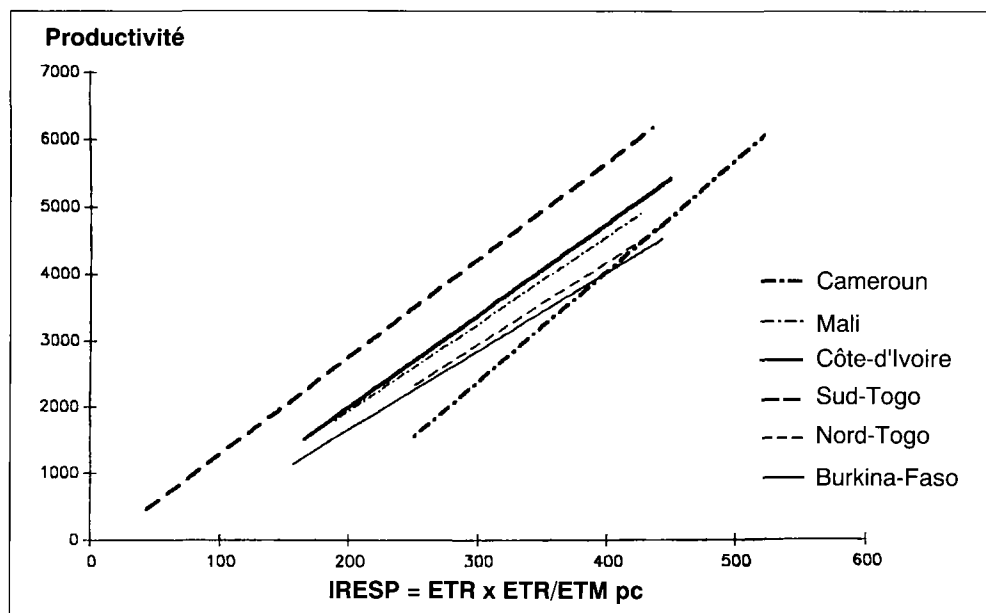


Figure 2. IRESP et productivité du maïs. Culture intensifiée (d'après [9]).

Le photopériodisme

Vaksmann et Traoré [11] ont démontré l'effet du photopériodisme partiel de la variété de mil NKK sur la réduction de la variabilité interannuelle de l'IRESP. Cette stabilité est mise à profit par les agriculteurs de la région de Bankass, au Mali. Elle s'explique par une adaptation de la durée du cycle à la date d'arrivée des pluies et donc de semis.

L'acidification du sol

L'évolution de la fertilité chimique des hydrosystèmes à sols ferralitiques dessaturés en culture continue à faibles intrants entraîne la sécheresse. Le processus est le suivant. La culture continue entraîne l'acidification du sol par la lixiviation du calcium et corrélativement, en deçà d'un pH de l'ordre de 5, une toxicité aluminique. Celle-ci induit un dysfonctionnement racinaire et, si l'humidité du sol est limitante, un déficit d'alimentation hydrique.

L'enchaînement se transforme en un cycle de dégradation : la culture consomme moins d'eau, à pluviosité égale, le drainage augmente d'autant, ainsi que la lixiviation et l'acidification (figure 3).

Pour pallier cette dégradation de l'environnement rendu plus vulnérable à des périodes de sécheresse, l'introduction de la culture continue, pour les écosystèmes à risque, est à accompagner d'amendement organique et, quand c'est possible, calcique. Cependant, la composition de la matière organique doit être riche en calcium et phosphore, sans excès d'azote, de façon à favoriser la croissance racinaire sans entraîner une exubérance de la surface foliaire.

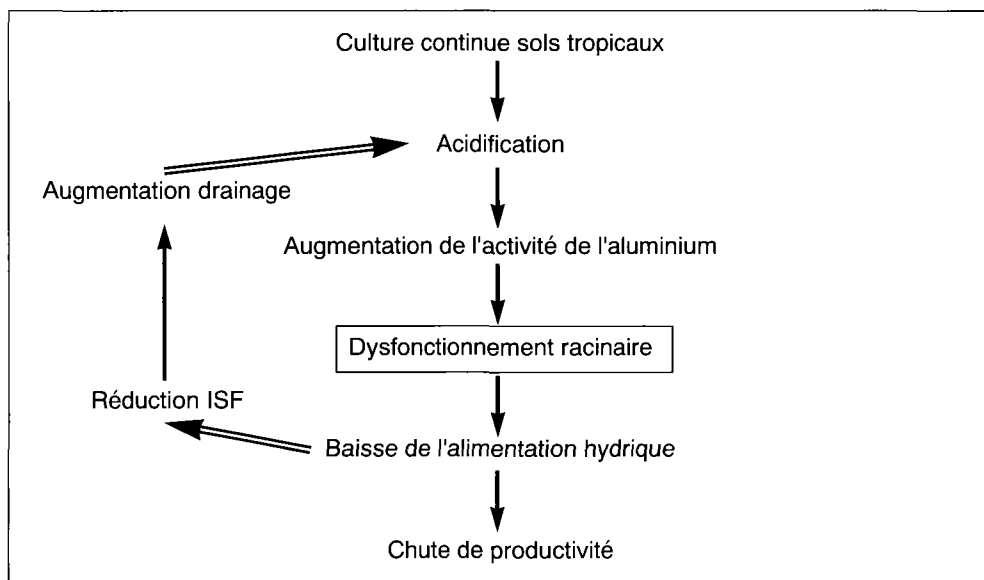


Figure 3. Cycle de sécheresse induit par la culture continue sur sol ferrallitique à faible pH.

La fluctuation de la marge brute

La valorisation des précipitations est à évaluer aussi en fonction de critères économiques, comme le bénéfice de l'agriculteur. Par exemple, les engrais ne seront rentables que si la marge brute dégagée est supérieure à leurs coûts. Or, cette marge dépend non seulement des précipitations mais aussi d'autres caractéristiques de l'hydrosystème.

Une étude préliminaire, de Forest, Reyniers, Lidon [13], relie un indicateur hydrique respectivement avec la productivité et la marge brute, pour des cultures de mil ou sorgho à trois niveaux d'intrants en zone sahélienne (figure 4). Dans ce cas d'école, l'augmentation de l'alimentation hydrique n'entraîne que celle de la productivité, mais guère celle de la marge brute, sauf avec l'irrigation. Ce résultat explique la réticence des agriculteurs à intensifier tant que les caractéristiques de l'hydrosystème ne leur permettent pas d'améliorer leurs marges brutes.

Propositions pour la recherche et le développement

On l'a vu, la démarche sur la caractérisation et la gestion de l'hydrosystème agricole en est encore à ses débuts, aussi reste-t-il à la poursuivre tant par la recherche que par l'application des premiers acquis. Quelques propositions sont présentées, sans prétendre traiter l'ensemble du sujet mais en mettant l'accent sur la demande du terrain.

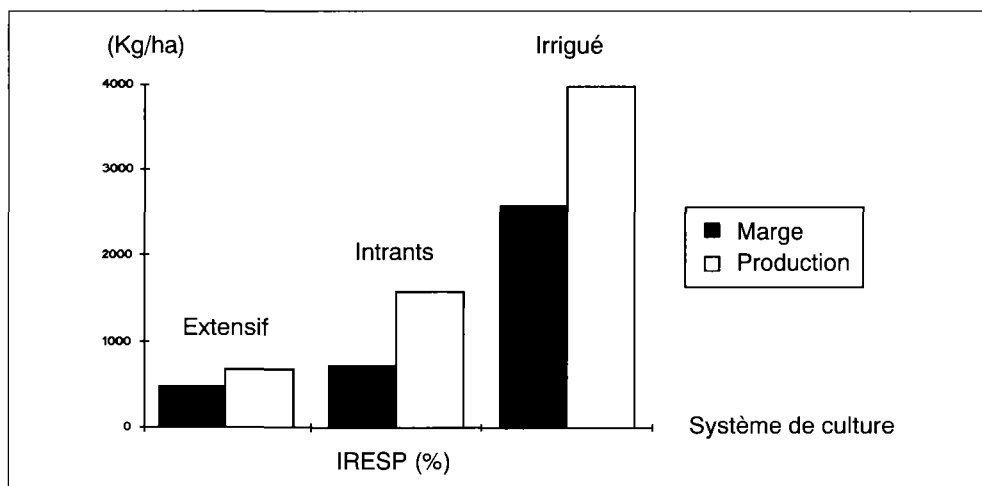


Figure 4. Ecart entre productivité et marge brute (kg/ha) en fonction du taux de satisfaction des besoins en eau et des intrants. Exemple en condition sahélienne sur culture de mil ou sorgho.

Recherches sur l'hydrosystème agricole soudano-sahélien

Les recherches sur les composants et la gestion des hydrosystèmes agricoles tropicaux sont à poursuivre en particulier dans deux domaines.

Caractérisation des hydrosystèmes agricoles tropicaux non céréaliers

La caractérisation des hydrosystèmes des légumineuses tropicales (arachide, niébé) et du cotonnier est importante dans la gestion de ces cultures mais aussi pour celle de l'ensemble du système de production. En effet, ces espèces et les céréales sont généralement en rotation et leur fonctionnement hydrique est interdépendant. La principale difficulté actuelle est de ne pas disposer d'indicateurs hydriques de productivité pour l'arachide et pour le cotonnier. Une des raisons de ce retard vient de leur floraison indéterminée qui complique la délimitation de leur période de plus forte sensibilité à un déficit hydrique.

La caractérisation des hydrosystèmes fourragers et forestiers tropicaux apporterait des éléments de réponse sur la gestion des systèmes de production forestiers et pastoraux dans cette région et contribuerait à établir des complémentarités entre les divers systèmes de production soudano-sahéliens. Le sujet est très vaste et dans le cas des arbres les données de base font défaut.

La caractérisation du fonctionnement hydrique des bas-fonds avec le riz et les cultures maraîchères est également prioritaire compte tenu des espoirs que soulèvent leurs exploitations, mais aussi des difficultés qu'elles rencontrent. Dans cette situation, la prévision des fluctuations de la nappe devient une composante déterminante du fonctionnement de l'hydrosystème.

Les facteurs de gestion de l'hydrosystème céréalier soudano-sahélien

En vue d'une gestion plus efficace de l'hydrosystème céréalier soudano-sahélien, son fonctionnement doit être étudié avec les outils spécifiques de chaque discipline concernée, en particulier l'agroclimatologie, l'hydrologie des petits bassins versants, la physiologie de la production, la génétique, les sciences du sol, l'économie rurale. La synergie entre les méthodes exige des références quantitatives adoptées d'un commun accord. Les indicateurs du régime de consommation hydrique de la culture, tel l'IRESP, sont une des références à débattre. Parmi les objectifs communs, les mécanismes explicitant les relations et l'importance relative des facteurs hydriques et de fertilité sont généralement considérés comme la clé de systèmes de culture à faibles intrants et économiquement rentables. Chaque discipline abordera ce champ complexe d'investigation. Par exemple, la physiologie de la production conduira des enquêtes agronomiques sur la forte variabilité de la production des champs paysans de façon à hiérarchiser les facteurs.

Adapter les acquis pour le développement

Tout en poursuivant les efforts de recherche, les importants acquis doivent désormais être appliqués au développement en les modulant selon les spécificités des situations agricoles. Une démarche rigoureuse mettrait progressivement en place trois phases. Une phase évaluation-diagnostic observera les composantes de l'hydrosystème agricole et diagnostiquera les causes de sécheresse. Une phase simulation, en laboratoire, estimera les caractéristiques optimales, comme la date de semis, la durée de cycle, la profondeur d'enracinement, etc. Enfin, une phase expérimentation-validation, de terrain, ajustera progressivement les techniques culturales pratiquées par les paysans en fondant le dialogue sur les conclusions des phases précédentes (figure 5).

En un site, l'évaluation des composantes de l'hydrosystème et des flux hydriques procède en allant de la région à la plante (tableau I).

Tableau I. Évaluation des composantes de l'hydrosystème et des flux hydriques.

Échelle	Composantes de l'hydrosystème agricole	Flux hydriques évalués
Région de même pluviosité.	Régime fréquentiel des pluies, ETP, etc.	IRESP potentiel
Terroir-versant.	Etats de surface, porosité du sol, etc.	Taux de ruissellement, apports latéraux, etc.
Champs paysans.	Réserve utile racinaire, indice foliaire, etc.	IRESP réel, évaporation sol, drainage
Plante.	Composition rhizosphérique, état hydrique des feuilles, etc.	Flux de sève, exsudats racinaires, etc.

Les logiciels de bilan hydrique conçus sur le même modèle sont adaptés selon les paramètres et variables traités. Le logiciel SARRA, le plus récent, intègre l'effet de techniques culturales ou de caractéristiques du sol sur la vitesse d'enracinement ou l'indice foliaire [7].

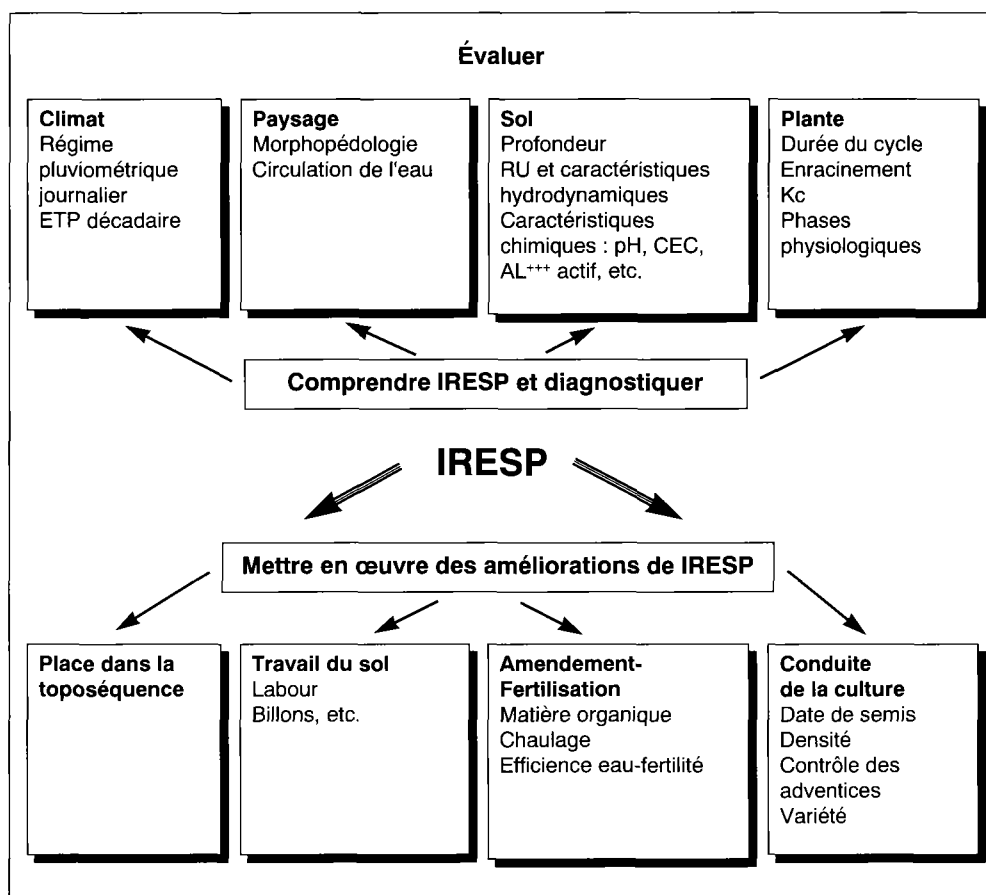


Figure 5. Facteurs et techniques de la gestion de l'hydrosystème céréalière soudano-sahélien.

Le diagnostic des facteurs de la valorisation des précipitations s'affine à chaque échelle. A l'échelle régionale sont évaluées les limitations des régimes pluviométriques en relation avec le calage des cycles. A l'échelle du bassin versant les facteurs morphopédologiques, comme les états de surface liés au ruissellement, sont évalués. A l'échelle de la parcelle sont évalués les facteurs liés au système de culture, tels que ceux pouvant causer un déséquilibre entre offre et demande hydrique.

Compte tenu de la précarité actuelle des paysans, ce transfert de l'ensemble des acquis pour une meilleure gestion de leurs risques ne réussira que si les gains fournis par les techniques culturales préconisées compensent leurs coûts avec une forte probabilité. Pour s'en assurer, une contribution de l'économie rurale est nécessaire.

Conclusion

Cette présentation schématique des composants et du fonctionnement de l'hydrosystème céréaliier soudano-sahélien en vue de sa gestion pour mieux valoriser les précipitations n'avait pas la prétention d'apporter des solutions immédiates aux graves problèmes de la production agricole face à la sécheresse et à la semi-aridité des régions soudano-sahéliennes. Son objet était d'encourager les développeurs et les chercheurs à utiliser cette démarche pour améliorer les systèmes de culture. Ce serait déjà un premier impact si elle permettait de mieux mettre en évidence les acquis sur les bilans hydriques. Parmi ces acquis, les plus significatifs sont les méthodes de diagnostic des risques de sécheresse et les propositions de gestion des composants de l'hydrosystème pour les réduire. Pour la recherche, l'impact de la notion d'hydrosystème agricole sera à évaluer sur des critères d'interdisciplinarité tant dans les études sur les systèmes de culture céréaliiers que sur d'autres espèces cultivées annuelles ou pérennes. Ainsi, la démarche progressivement maîtrisée pourrait rationaliser l'intensification en valorisant les investissements de l'agriculteur et en protégeant son environnement.

Références

1. Duby D., Wallon S. (1987). Victoire sur la disette. In : Histoire de la France rurale, Paris, Seuil, tome 3.
2. Reyniers F.N., Forest F. (1990). La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. Les flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. *Sécheresse*, 1 : 36-43.
3. Forest F., Kalms J.M. (1984). Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.*, 39 (1) : 42-50.
4. Fréteaud J.P., Poss R., Saragoni H. (1987). Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensiométriques, *in situ*, sous culture de maïs. *L'Agron. Trop.*, 42 (4) : 94-102.
5. Chopart J.L., Siband P. (1988). Probe : Programme de bilan de l'eau. Mémoires et travaux 17. CIRAD-CA/Montpellier, 76 p.
6. Albergel J., Pérez P., Vaksman M. (1990). Une méthode d'estimation du ruissellement dans le bilan hydrique des cultures. Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 12 p.
7. Forest F., Clopes A. (1993). Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Paris, John Libbey Eurotext, 3-15.
8. Forest F., Reyniers F.N. (1985). Proposals for the classification of climatic risk of upland rice in terms of Water Balance. Progress in Upland rice research. IRRI, 93-106.
9. Girard X., Adri K. (1991). Potentialités de la maïsiculture pluviale en Afrique sub-sahélienne. Rapport au MRES, CIRAD-CA/Montpellier.
10. Affholder F. (1990). Rapport de campagne au Sénégal 1990-1991. CR Atelier ESPACE. CIRAD/Montpellier.

11. Vaksman M., Traoré S. (1993). Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil au Mali. Cas de la zone de Bankass. In : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Paris, John Libbey Eurotext, 113-123.
12. Reyniers F.N. (1991). Diagnostic de l'alimentation hydrique des cultures pluviales. Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, CIRAD : 137-49.
13. Forest F., Reyniers F.N., Lidon B. (1991). Prendre en compte le risque agroclimatique et le coût de l'intensification pour analyser la faisabilité de l'intensification. Savanes d'Afrique, terres fertiles ? Montpellier, CIRAD : 531-41.
14. Reyniers F.N., Netoyo L. (1991). Orientations du plan d'action 1992-1996 du R3S. Montpellier, CIRAD-CA.
15. Affholder F. (1993). Influence de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement sur l'efficacité de l'eau et la production de mil pluvial. In : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Paris, John Libbey Eurotext, 191-203.
16. Chopart J.L., Koné D. (1993). Risque agroclimatique et intensification de la culture du maïs en région centre Côte-d'Ivoire. In : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Paris, John Libbey Eurotext, 39-47.
17. Reyniers F.N., Jacquinet L., Truong B., Nicou R. (1982). Amélioration de la tolérance du riz pluvial à la sécheresse. L'Agron. Trop., 37 (3) : 270-87.
18. Reyniers F.N. (1985). Critères de tolérance à la sécheresse et conditions édapho-climatiques. Cas du riz pluvial. La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée. Montpellier, CIRAD : 199-212.
19. Reyniers F.N., Forest F. (1988). Amélioration de l'alimentation hydrique et de son efficacité en agriculture pluviale au sud du Sahara. Agriculture irriguée en Afrique. CTA/ILRI : 1-24.
20. Vaksman M., Traoré S. (1990). Compte rendu de campagne au Mali 1989. CR Atelier ESPACE. CIRAD, Montpellier.

9

Effets des techniques culturales sur l'alimentation hydrique du sorgho et le bilan minéral du sol dans le plateau central du Burkina Faso

B. OUATTARA, M.P. SEDOGO, F. LOMPO, K. OUATTARA
INERA, 03 BP 7192, Ouagadougou 03, Burkina Faso

Introduction

Dans les régions tropicales semi-arides, l'insuffisance et/ou la mauvaise répartition spatio-temporelle de l'offre en eau pluviale constituent avec le faible niveau de fertilité des sols, les principaux facteurs limitants des productions agricoles [1, 2].

Mais en addition des effets des aléas climatiques, on a tendance à ne pas prendre assez en considération la part imputable aux pertes par drainage profond des précipitations. Ces quantités d'eau qui échappent à l'alimentation hydrique des cultures, entraînent avec elles les éléments minéraux et constituent également une source de baisse de la fertilité des sols par désaturation du complexe d'échange et acidification du profil cultural [3 - 5].

Dans le cas du plateau central du Burkina, Forest *et al.* [6] ont montré que ces phénomènes de perte d'eau par drainage se produisent généralement en début de végétation des cultures ; celles-ci rencontrent en effet beaucoup de difficultés à développer rapidement un enracinement profond dans les sols à structure dégradée. Ces pertes d'eau peuvent

également prendre une ampleur considérable en année de bonne pluviométrie, dont la probabilité d'occurrence est estimée à 2 années sur 10, comme ce fut le cas en 1989.

Aussi, nous nous sommes proposés, dans le contexte d'une année à pluviométrie exceptionnelle, de quantifier l'incidence de certaines techniques culturales (travail du sol associé à la fertilisation organo-minérale) sur l'alimentation hydrique d'une culture de sorgho et le bilan minéral du sol.

Matériel et méthode d'étude

Contexte pluviométrique

L'étude a été menée à la station de recherches agricoles de Saria, située sur le plateau central du Burkina. Le climat est de type nord-soudanien, caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 800 mm, s'étalant généralement sur 4 à 5 mois de l'année.

L'année de l'étude, il a été enregistré un total pluviométrique de 925 mm. Et, selon l'analyse fréquentielle de la pluviométrie sur 60 années, ce volume d'eau est obtenu 2 années sur 10.

Les sols

Le sol du site de l'essai est un remblai alluvial épais à pseudogley de profondeur, bordant un marigot généralement à sec [7]. Pauvre en matière organique (taux inférieur à 1 %) et en phosphore (tableau I), il comporte un recouvrement sablo-limoneux, ce qui le rend sensible au phénomène de prise en masse.

Tableau I. Principales caractéristiques analytiques de l'horizon 0-20 cm du site d'essai

Granulométrie %	
– Argile	9
– Limons totaux	26
– Sables totaux	65
Densité apparente	1,57
Carbone total (mgC/g)	3,4
Azote total (mgN/kg)	245,6
P ₂ O ₅ assimilable (mg P ₂ O ₅ /kg)	2,4
Al ⁺⁺⁺ (méq/100 g)	0,01
pHeau	5,8

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de l'essai qui a servi de support à cette étude est du type bloc de Fisher, comprenant 4 traitements en 6 répétitions.

Les dimensions des parcelles élémentaires (7,2 m x 24 m = 172,8 m²) ont été définies à la suite d'une analyse géostatistique réalisée en collaboration avec l'Institut de mécanique de Grenoble.

Les différents traitements associent le travail de préparation du sol et la fertilisation organo-minérale :

- T1 : grattage du sol à la daba ;
- T2 : grattage du sol à la daba + engrais NPK + urée ;
- T3 : labour à plat aux bœufs + engrais NPK + urée ;
- T4 : labour à plat aux bœufs + engrais NPK + fumier + urée.

L'engrais NPK (14-23-14) est apporté annuellement à raison de 100 kg/ha au moment de la préparation du sol, en même tant que l'apport de fumier (5t/ha tous les 2 ans). La dose d'urée est de 50 kg/ha ; elle est apportée pendant le stade montaison de la culture.

Le sorgho (variété ICSV 1049) a été semé aux écartements suivants : 0,40 m entre les poquets et 0,80 m entre les lignes, et démarqué à 2 plants par poquet. Son cycle semis-maturité est de 120 jours.

Méthodes d'évaluation du bilan hydrique

Le suivi hydrique des parcelles a été réalisé à l'aide de mesures neutroniques et tensiométriques. Des tubes d'accès neutronique (sur 2,05 m de profondeur) et des batteries de tensiomètres (30 cm/115 cm/155 cm) ont été installés à cet effet sur les 4 traitements et sur 5 blocs.

Face à l'éventualité d'une recharge de la nappe, il a été installé des piézomètres de fortune (en sacrifiant des tubes d'accès neutronique) aux cotes 100 cm/150 cm/180 cm.

La détermination du niveau d'alimentation en eau de la culture à travers l'équation générale du bilan hydrique a été rendue possible grâce à certaines hypothèses de calcul sur le drainage et le ruissellement.

Ainsi, l'estimation du drainage à la cote 135 cm a été faite selon des hypothèses de calcul liées à la présence ou non de la nappe (avec la collaboration de M. Vauclin de l'Institut de mécanique de Grenoble) :

– Premier cas : la méthode de la variation du stock a été utilisée lorsque la nappe est au dessous de la cote 200 cm et si l'on y néglige le flux :

$$q_{m/j} = \frac{DS_{135}^{205}}{Dt}$$

– Deuxième cas : application de la loi de Darcy lorsque les tensiomètres indiquent un flux descendant (en absence de nappe) :

$$q_{m/j} = -K(q) \frac{dH}{dZ}$$

Les charges hydrauliques sont celles des cotes : $Z_1 = 115 \text{ cm}$; $Z_2 = 155 \text{ cm}$

– Troisième cas : lorsque la cote 135 cm se trouve dans la nappe, le flux est estimé à partir de la vitesse d'évolution de la nappe :

$$[q_{mf}/j] = V_s \cdot Dq$$

où $V_s = Z_{\text{napp}}(t_2) - Z_{\text{napp}}(t_1) / Dt$

avec Z_{napp} = niveau de la nappe au temps t

Dq correspond à une pseudo-porosité effective estimée par la différence entre la teneur en eau à la saturation et la teneur en eau à l'état le plus sec, pour laquelle on admet que la conductivité hydraulique est négligeable.

Les quantités d'eau ruisselées ont été estimées selon l'algorithme proposé par Vauclin [8].

Estimation du drainage à la limite du front racinaire

Dans le but de quantifier les pertes minérales par lixiviation, le choix de la cote de drainage ($Z_r = 80 \text{ cm}$) a été fonction de la hauteur de la remontée de la nappe et de la profondeur de l'enracinement (figure 1).

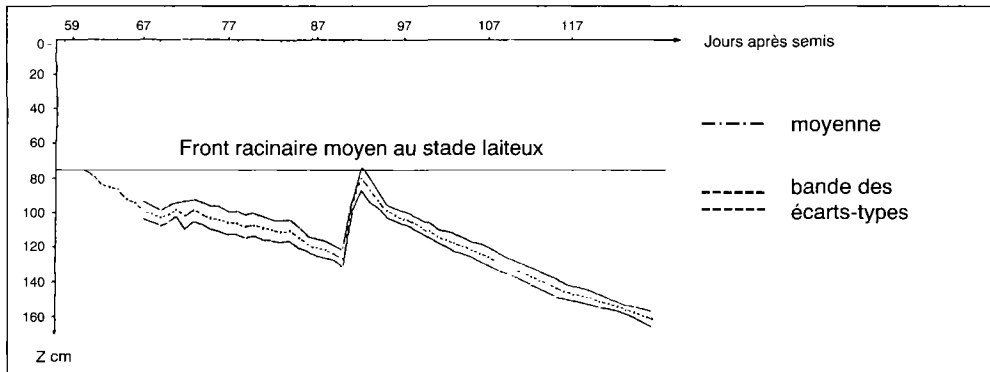


Figure 1. Evolution du niveau moyen de la nappe affecté des écarts-types.

Le drainage a été estimé à partir de l'équation générale du bilan hydrique, en considérant comme nul le ruissellement compte tenu de la topographie plane du site de l'essai. Cela a alors permis de calculer une évaporation réelle apparente, ETRa. En considérant, d'autre part, que les plantes consomment au plus à l'ETM (évapotranspiration maximale), le drainage se produit quand $ETRa > ETM$.

Prélèvements et analyse de la solution du sol

La solution du sol a été extraite à l'aide de bougies poreuses en céramique. Elles ont été placées aux profondeurs suivantes : 20 cm, 40 cm, 80 cm, 150 cm sur chacun des

4 traitements et sur 4 blocs de l'essai. La teneur en calcium et en magnésium de la solution extraite est déterminée par absorption atomique, alors que celles en potassium et en nitrate l'ont été respectivement par émission de flamme et par ionométrie.

La masse d'élément X entraîné par lixiviation, à la côte de drainage, s'obtient par multiplication du volume drainé à cette profondeur par la concentration [X] mesurée dans la solution du sol au cours de la période de drainage considérée.

Quantification des éléments minéraux apportés par le fumier et les météorites, et de ceux exportés par la culture

Outre le calcium, la magnésium et le potassium dosés selon les méthodes citées plus haut, on a également quantifié l'azote apporté par le fumier et les eaux de pluie par la méthode Kjeldahl et le phosphore par la méthode Bray II.

Ces mêmes éléments ainsi que le phosphore ont été dosés dans les grains et les pailles produits.

Résultats et discussion

Dynamique de l'eau, consommation en eau et rendements du sorgho

La dynamique de l'eau dans les parcelles a été fortement influencée par les fluctuations du niveau de la nappe et les engorgements temporaires consécutifs à la forte pluviométrie d'août et de septembre, si bien qu'il n'a pas été possible de déceler les différences de comportement hydrique entre les traitements (figures 2 et 3).

Tout au long de la campagne, les teneurs en eau du sol ont été suffisamment élevées pour satisfaire l'alimentation hydrique de la culture quelle que soit la technique culturale appliquée. Il semble cependant que les parcelles labourées ont beaucoup souffert de phénomènes d'engorgement. Cela n'a évidemment pas permis d'établir de liaisons évidentes entre les rendements du sorgho et son alimentation hydrique en fonction des techniques culturales. Mais, en recoupant les consommations globales en eau avec les rendements obtenus sur les différentes parcelles selon leur état de ressuyage, on aboutit aux résultats consignés dans le tableau II.

Tableau II. Consommation en eau et rendements du sorgho en fonction de la qualité du ressuyage.

Traitements	Mauvais ressuyage			Assez bon ressuyage		
	ETR mm	Rdt grain kg/ha	Rdt paille kg/ha	ETR mm	Rdt grain kg/ha	Rdt paille kg/ha
Grattage du sol	411	1132	2213	357	3346	6380
Grattage + engrais	393	2344	4427	357	4726	7552
Labour + engrais	361	2266	3385	323	4010	7292
Labour + fumier + engrais	398	1003	3255	345	3776	6966

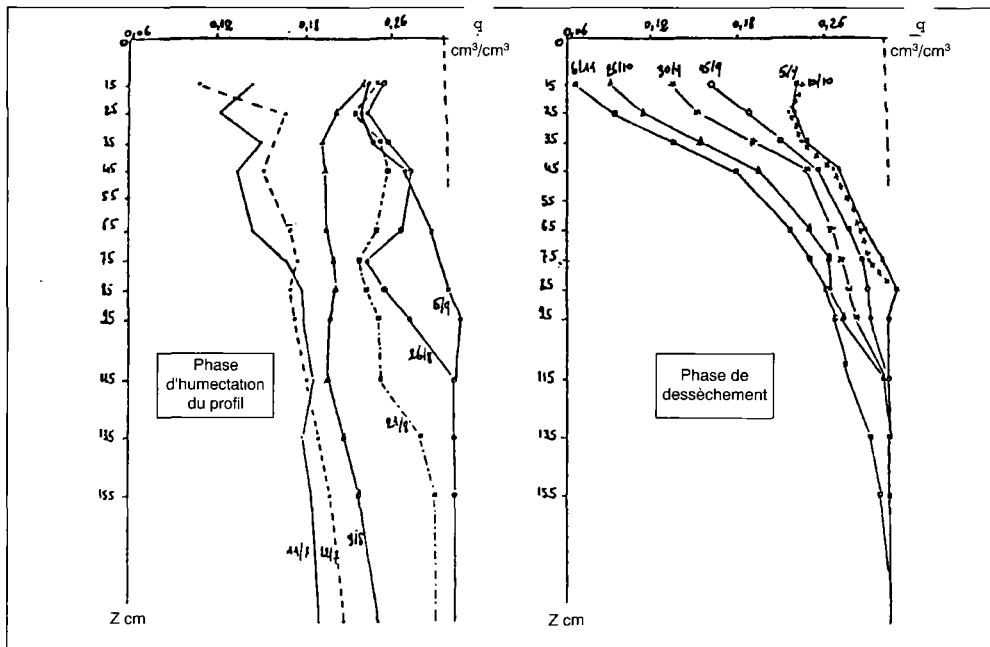


Figure 2. Evolution des profils hydriques sur le témoin.

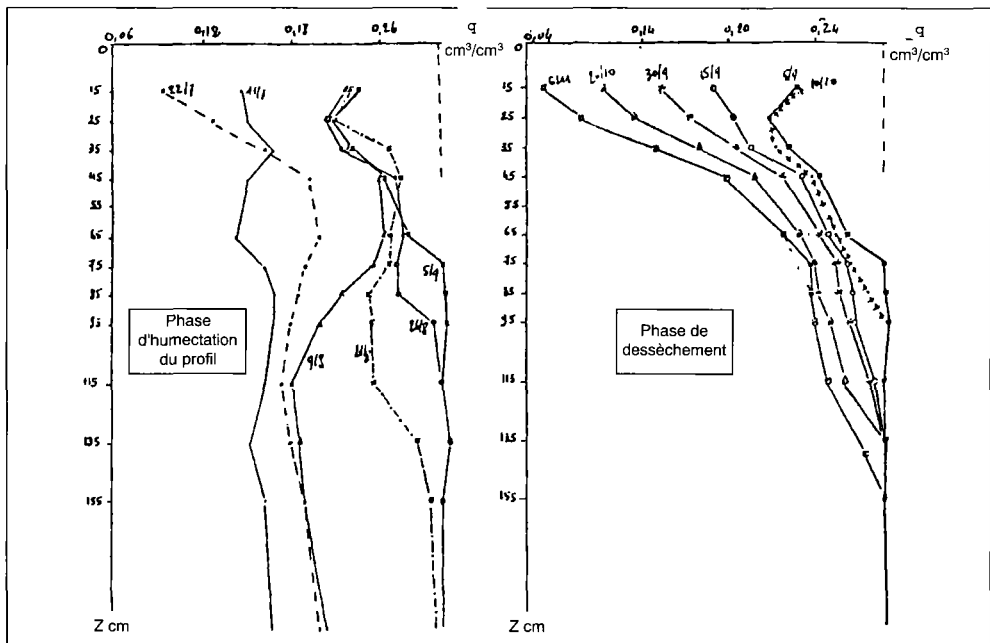


Figure 3. Evolution des profils hydriques sur le traitement 4.

Les parcelles engorgées présentent de faibles rendements avec des consommations d'eau élevées (évaporation d'eau libre). Par contre, lorsqu'elles sont bien drainées, les rendements sont meilleurs et les ETR sont plus faibles.

Il apparaît clairement que l'engorgement a été très préjudiciable pour le développement de la culture et les parcelles labourées semblent en avoir plus souffert que celles non labourées.

Quantité d'eau écoulée au-delà du front racinaire

L'évolution temporelle du drainage moyen estimée à partir des variations de stocks d'eau à la côte 80 cm, est en parfaite adéquation avec celle de la pluviométrie au cours du cycle de la culture (figure 4).

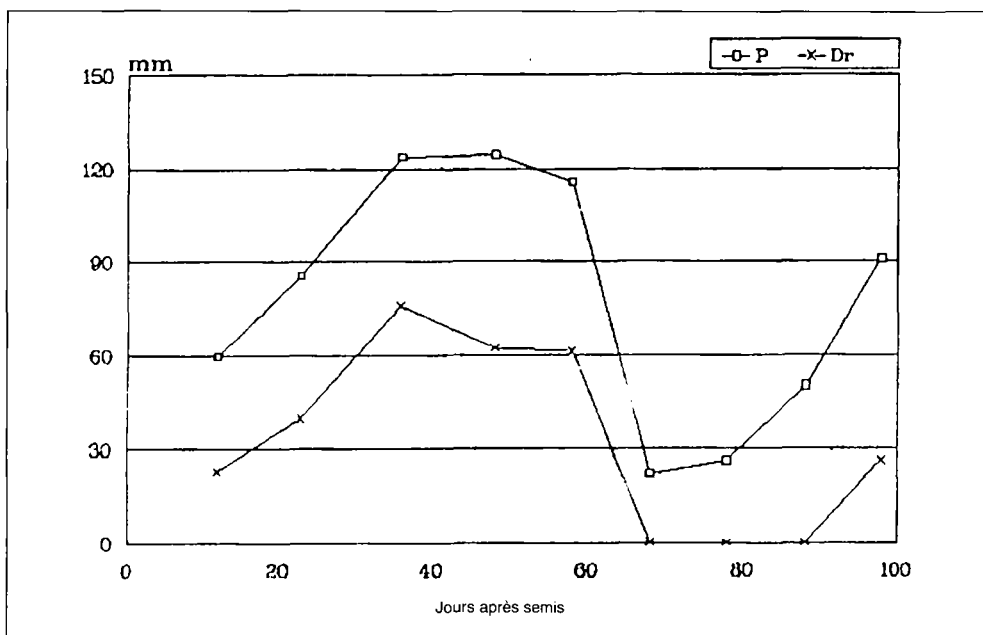


Figure 4. Evolution temporelle de la pluviométrie et du drainage au cours du cycle de la culture.

La pluviosité exceptionnelle observée a été telle qu'on n'a pu déceler de différence quantitative entre les différents traitements. Le rapport global drainage/pluviométrie a été de 0,43, témoignant ainsi de l'ampleur des percolations d'eau au-delà du front racinaire. Ce fort taux de drainage s'explique non seulement par la bonne pluviosité mais aussi par la faible profondeur de sol explorée par les racines (figure 1).

La profondeur de sol enracinable est certes grande mais la culture n'en a exploité que les 80 premiers centimètres puisqu'elle y a trouvé l'eau et les éléments minéraux nécessaires. Cette limitation du front racinaire pourrait également être due aux fluctuations de la nappe dans l'horizon sous-jacent.

L'approche quantitative du drainage que nous avons adoptée présente bien évidemment des imperfections, mais les résultats obtenus se révèlent assez cohérents.

Estimation du bilan minéral des parcelles

Les différents termes quantifiés du bilan minéral du sol sont regroupés dans le tableau III, dont l'examen suscite les commentaires suivants.

Tableau III. Termes du bilan minéral.

1. Bilan de lixiviation (kg/ha)											
Traitement	N				CaO		MgO		K ₂ O		
T ₁ Grattage du sol	5,3				48,4		32,2		4,7		
T ₂ Grattage + NPK + urée	6,1				49,4		50,6		3,7		
T ₃ Labour + NPK + urée	2,7				43,4		43,9		5,7		
T ₄ Labour + fumier + NPK + urée	1,9				22,4		19,6		0,9		
2. Bilan des mobilisations par culture (kg/ha)											
Traitement	Rdt kg/ha		N		CaO		MgO		P ₂ O ₅		
	Grain	Paille	Grain	Paille	Grain	Paille	Grain	Paille	Grain	Paille	
T ₁	1609	3276	5,5	15,1	1,3	17,4	3,5	9,7	7,7	3,4	
T ₂	2721	4588	8,7	21,6	1,6	25,7	6,1	13,3	14,3	4,9	
T ₃	2607	4805	8,6	21,1	1,2	24,9	5,7	12,8	14,3	6,6	
T ₄	2219	4969	7,8	17,4	1,0	25,0	5,2	14,4	12,1	6,0	
3. Bilan des apports minéraux (kg/ha)											
Nature des apports	N				CaO		MgO		K ₂ O		P ₂ O ₅
Engrais NPK + urée	60				-		-		14		23
Fumier	44,2				45,4		24,4		58,6		12,4
Météorites	2,5				35,2		16,2		4,6		-
4. Bilan minéral des parcelles (kg/ha)											
Traitement	N				CaO		MgO		P ₂ O ₅		
Grattage du sol	- 23,4				- 31,9		- 29,2		- 11,1		
Grattage +NPK + urée	+ 24,1				- 41,5		- 53,8		+ 3,8		
Labour + NPK + urée	+ 30,1				- 34,3		- 46,4		+ 2,1		
Labour + fumier + NPK	+ 79,6				+ 32,2		+ 1,4		+ 17,3		

Quel que soit le type de travail du sol, l'absence de fertilisation ou l'utilisation exclusive d'engrais minéral induisent des déficits importants en calcium et en magnésium. Ce déficit provient essentiellement des pertes par lixiviation de ces alcalino-terreux. Leur départ du profil cultural est à l'origine de la désaturation rapide du complexe d'échange des sols tropicaux avec pour corrolaire le déclenchement des processus d'acidification de ces sols dès leur mise en culture [4].

L'apport de fumier, à raison de 5 t/ha permet d'enrayer ce phénomène, car non seulement il apporte des éléments minéraux, mais il prévient leur lixiviation rapide. Cette dose de fumier est considérée sur le plateau central du Burkina comme celle qui permet d'entretenir la fertilité du sol [5].

On observe par contre un bilan azoté excédentaire, même en condition de fertilisation exclusivement minérale. Ce résultat est en accord avec celui de Cissé [9], dans les sableux dégradés du Sénégal. Cependant, les valeurs élevées que nous avons obtenues résulteraient de la non-quantification des pertes azotées par lixiviation pendant les 40 jours qui ont suivi le semis.

Or, on montre qu'à cette période d'installation de la culture, les pertes azotées peuvent être importantes.

C'est généralement à cette époque qu'on enregistre des flux importants de nitrates résultant des phénomènes de minéralisation de la matière organique du sol et cela se produit au moment même où l'enracinement de la culture est encore superficiel.

Le bilan phosphaté devient positif quand on applique la fertilisation minérale (NPK) ou organique, car le phosphore est très peu lixivié dans le sol.

Par ailleurs, la libération du calcium et du magnésium dans la solution du sol est généralement déterminée par la charge anionique de celle-ci. On comprend alors l'importance que pourrait avoir également la lixiviation de ce cation en début de cycle. L'ampleur de ce phénomène est toutefois dépendante de l'apport de fumier, qui semble ralentir la libération des cations et des anions dans la solution du sol. Les fortes teneurs en éléments minéraux de la solution du sol se rencontrent généralement sous les parcelles grattées ou labourées auxquelles on n'aurait apporté que les engrais minéraux (figures 5-8).

Conclusion

En cette première année d'expérimentation, on a enregistré une pluviométrie exceptionnelle (probabilité d'occurrence de 0,2) qui a entraîné une recharge de la nappe. Cela a nécessité l'utilisation de méthodologies appropriées : l'un des moyens les plus efficaces de lutter contre la nature n'est-il pas d'obéir encore à ses lois ?

Les résultats obtenus, malgré certaines imperfections méthodologiques, ont toutefois permis de quantifier le niveau satisfaisant de l'alimentation en eau de la culture. Les plants ont pratiquement consommé à l'ETM. Le labour à plat, technique d'économie de l'eau par excellence, n'a pas pu jouer son rôle

Dans un tel contexte pluviométrique, la fertilité chimique des parcelles est alors apparue comme le facteur le plus limitant de la production végétale. En effet l'établissement de bilans minéraux apparents des parcelles soumises aux différentes techniques culturales a abouti aux conclusions suivantes :

- l'utilisation exclusive de fumure minérale induit des déficits énormes en bases échangeables du sol. Cela provient essentiellement des pertes par lixiviation de ces cations. Elles sont quelquefois élevées sous les parcelles labourées en l'absence d'apport organique.

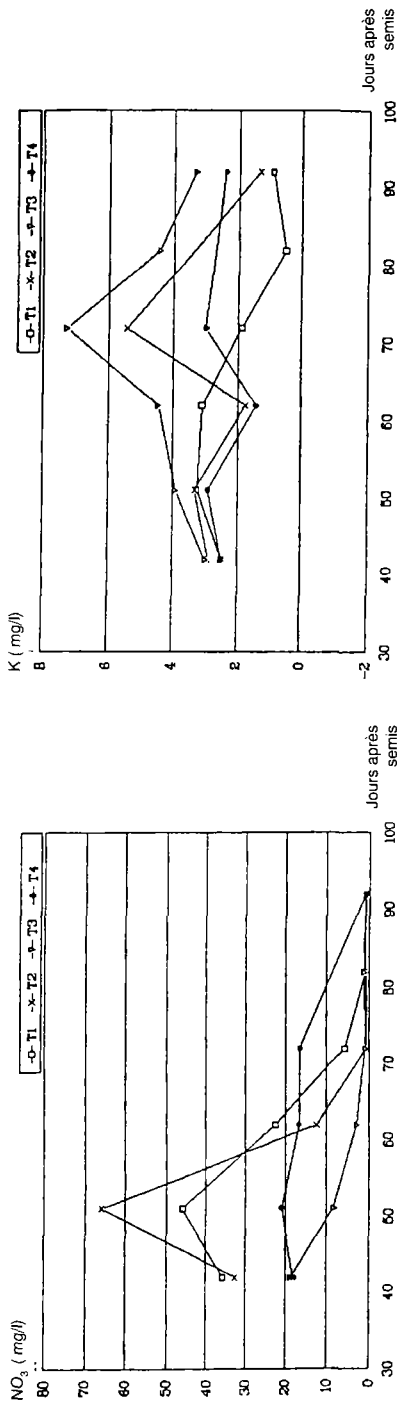


Figure 5. Evolution de la concentration en nitrates de la solution du sol à la cote de drainage 20 cm.

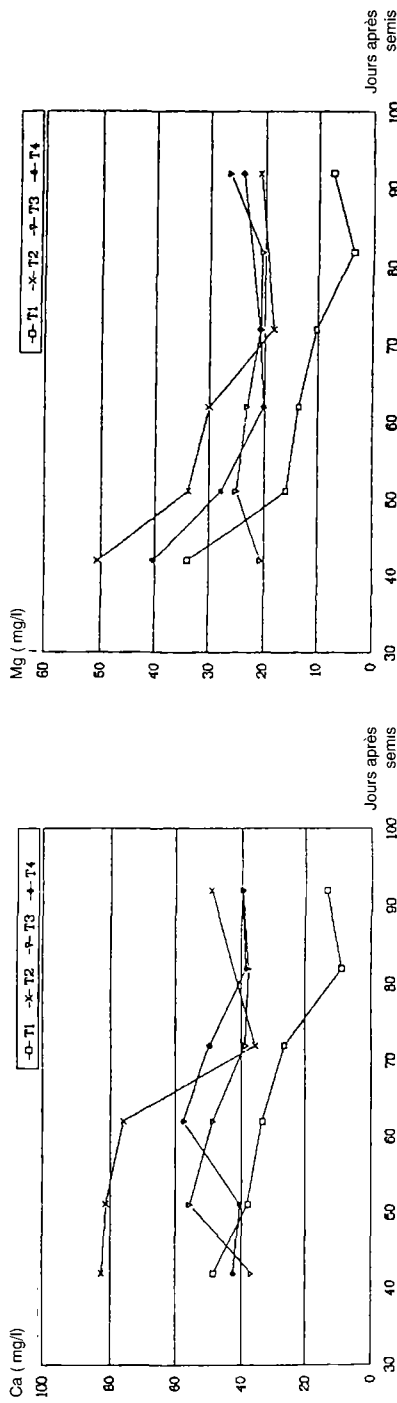


Figure 7. Evolution de la concentration en calcium de la solution du sol à la cote de drainage 20 cm.

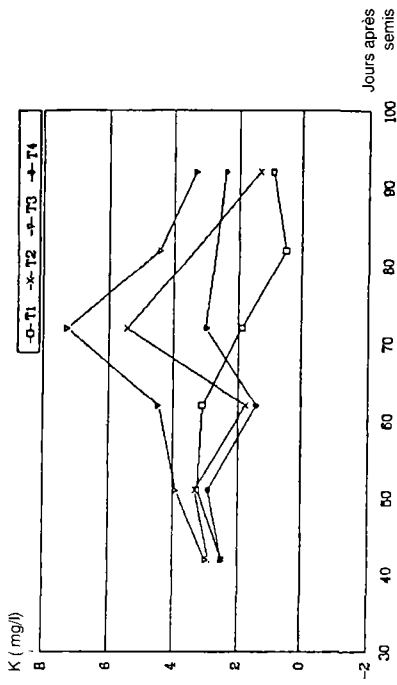


Figure 6. Evolution de la concentration en potassium de la solution du sol à la cote de drainage 20 cm.

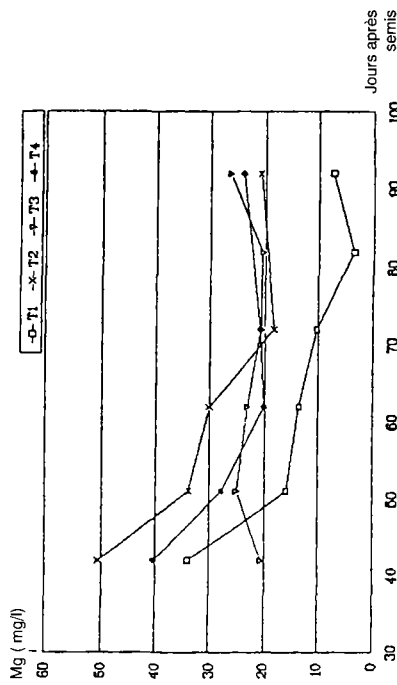


Figure 8. Evolution de la concentration en magnésium de la solution du sol à la cote de drainage 20 cm.

– l'enfouissement du fumier entraîne par contre un bilan minéral globalement positif. Le fumier a tendance à s'opposer à la lixiviation rapide des éléments minéraux du sol.

Cette étude confirme ainsi l'un des résultats antérieurs selon lequel le fumier apporté à la dose de 5t/ha tous les 2 ans constitue la fumure organique de maintien de la fertilité des sols du plateau central du Burkina.

Références

1. Somé L. (1989). Diagnostic agropédologique du risque climatique de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques économiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse doctorat USTL, Montpellier, 268 p.
2. Nicou R., Ouattara B., Somé L. (1990). Effets des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil) au Burkina Faso. Agr. Trop. 45 (1) : 43-57.
3. Piéri C. (1976). L'acidification des terres de cultures exondées au Sénégal. Agr. Trop. 31 (4) : 339-68.
4. Piéri C. (1979). Etude de composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal à l'aide de capteurs en céramique poreuse. Agr. Trop. 34 (1) : 9-22.
5. Sédogo M.P. (1981). Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sols ferrugineux tropicaux et sous climat tropical semi-aride. Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures. Thèse de doct. ing., INPL/NANCY, 195 p.
6. Forest F., Kontonkomdé H. (1979). Influence des conditions et facteurs pédoclimatiques sur la production d'une monoculture de sorgho correctement fertilisée. Interprétation agroclimatique d'un essai de longue durée : Entretien de la fertilité des sols. Doc. multigr., DGRST, LAT/GERDAT, 37 p.
7. Bertrand R. (1989). Mécanisme d'agrégation des sols tropicaux pauvres en argile gonflante. Rapport préliminaire de la mission de reconnaissance morphopédologique des régions de Saria (Burkina Faso) et de Molobala (Mali). IRAT/CER/DRN n° 4, Montpellier, 35 p.
8. Vauclin M. (1989). Bilan hydrique sous culture. Programme R3S/PF2. Atelier R3S/PF2, tenu à Bouaké du 24 au 28 avril 1989.
9. Cissé L. (1985). Etude des effets d'apports de matières organiques sur les bilans hydriques et minéraux et la production de mil et d'arachide sur sol sableux dégradé du centre-nord du Sénégal. Thèse de doct. ingénieur, INPL/NANCY, 184 p.

10

Interaction between water and nutrient supply under semi-arid conditions

D. VETTERLEIN, H. MARSCHNER

Institute of Plant Nutrition, University of Hohenheim, P.O. Box 700567, 7000 Stuttgart 70, Germany

Introduction

In many semi-arid areas of the subtropics, deeply weathered soils dominate with low nutrient content or availability. Especially low phosphorus availability is a common problem [1].

In such areas it is often difficult to identify the major growth limiting factor as it might vary from year to year, depending on which of the mechanisms linking water and nutrient availability and requirement for plant growth will dominate. In this paper some of the important mechanisms are discussed in detail.

Effect of increasing nutrient availability on plant water balance

A very important relationship between nutrient supply and plant water balance is the increase in shoot size due to improved nutritional status and thereby the increase in water requirement of the crop. If this enhanced water requirement cannot be met due to climatic

conditions well fertilized plants will have lower seed or grain yield, despite promotion of vegetative growth during the early growth stages.

Not only water requirement of a crop can be altered by changing the nutritional status but also the capacity of the crop for water uptake, which is closely related to root growth. Low amounts of fertilizer application generally enhance root growth, while higher amounts of fertilizer have no effect on root growth or even inhibit it (figure 1).

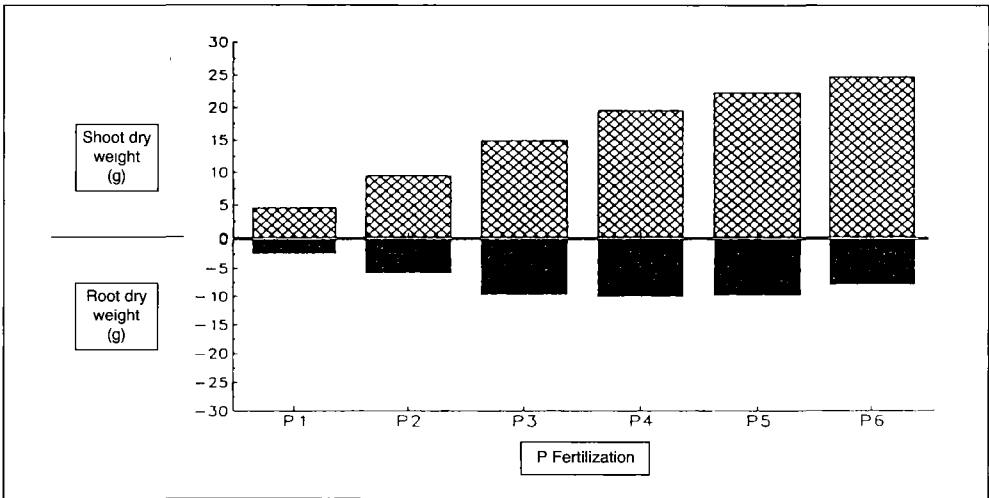


Figure 1. Change of shoot and root dry weight of 6 weeks old pearl millet plans with increasing levels of P fertilization [g/pot].

Not only root mass, but also specific root surface area can be affected by the mineral nutrient concentration in the soil. For example phosphorus is known to favour growth of fine roots. Root surface area can be important for water uptake once soil hydraulic conductivity, which reflects soil resistance to water movement, becomes the limiting factor for water uptake.

P deficiency also decreases hydraulic conductivity of the roots [2], which is an essential component of the equation for water flux according to the Ohm's law analogy.

Carbohydrate partitioning between root and shoot, which reflects to some extent the ratio between capacity for water uptake and water requirement of a crop, can be altered substantially due to changes in nutrient availability.

As an adaptation to low nutrient availability plants do not only form a more intensive root system relative to the shoot, but also a number of mechanisms can be induced which increase the availability of nutrients in the rhizosphere. For example plants can change the rhizosphere pH by release of H^+ , HCO_3^- or organic acids. They can change the redox potential by release of reductants like phenols or by formation of aerenchyma. Other possibilities are the release of complexing agents like phytosiderophores, or of ectoenzymes like phosphatase. Under stress conditions such as nutrient deficiencies, root exudation may account for up to 30 % of the total dry matter production [3]. Increased

exudation favours the microbial activity in the rhizosphere, which in turn influence nutrient availability. Finally symbioses with microorganisms like rhizobium or mycorrhiza are favoured at low N or P concentrations in the soil, respectively.

These mechanisms mentioned above, which are means to increase nutrient acquisition by the plant, are energy consuming and result in a redistribution of carbohydrates in favour of the underground biomass and thereby in a shift of the ratio water requirement : water uptake capacity.

Plant water relations may also be affected directly by the plant nutritional status via stomata regulation. The wilting symptoms in potassium deficient plants being one of the most prominent features [4]. The influence of nutrients on stomata regulation is thought to be connected to transport of ions, especially K^+ from the guard cells to the adjacent cells and back, thereby changing the turgor potential of the guard cells [5]. Recently, there is increasing evidence that stomatal regulation is not, or at least not exclusively, controlled by hydraulic signals, but rather chemical signals from the roots in form of increased ABA transport from the roots to the shoots, induced by decreasing soil matrix potential [6]. There is also evidence from data of Schur and Gollan [7] that the sensitivity of the stomatal regulation for ABA depends on the nutritional status of the plants.

Impact of drought on nutrient availability and requirement

Increased nutrient supply can increase shoot size and thereby water requirement on the one hand, but increased water availability can increase shoot size and thereby nutrient requirement on the other hand. Therefore nutrient deficiencies may occur only in years with high rainfall and fertilizer application may only promote growth in such a year.

Root growth, or more precisely root surface area, which is one of the crucial factors for uptake of nutrients with low mobility in the soil like phosphorus and most of the micronutrients, is generally reduced under drought stress. Main reasons for this reduction are increase in soil resistance, reduced extension growth and increased energy requirement for osmotic adaptation. A decrease of root growth will only result in a decrease of nutrient uptake, if root length density is below a threshold level for competition between roots. The threshold level depends on the nutrient in question and the soil moisture.

Decreasing soil matrix potential does not only decrease the surface for uptake from the soil, but also the transport of the nutrients to this surface, which can be described by the following equation [8]:

$$F = -D_e * \frac{dC}{dr} + v * C$$

D_e effective diffusion coefficient

C_o ion concentration in the soil solution at the root surface

c_i initial ion concentration in the soil solution

r_o root radius + root hair length

r_1 radius of the soil cylinder surrounding each root

v inward water flux

The pathway for diffusion (r) increases as the number of water filled pores decreases, D_e decreases with decreasing soil matrix potential [9] and the inward water flux decreases with decreasing soil matrix potential. Once the flux (F) is insufficient to maintain a crop specific threshold concentration at the root surface, nutrient uptake rate per unit root surface decreases.

Under very severe drought stress roots will dehydrate, which creates a gap between the root surface and the surrounding soil, resulting in a reduction of the soil-root interface.

Spatial variation of water and nutrient availability under field conditions and their impact on plant growth

Under field conditions neither water nor nutrient availability can be regarded as a uniform parameter ; both show considerable variation with soil depth.

Nutrient contents are generally higher in the topsoil, especially for nutrients with low mobility in the soil.

Under drought stress topsoil dries out first, while water may be still available at greater depths.

Under such conditions the roots in the topsoil experience drought stress and nutrient flux in the topsoil is reduced, while the shoot may maintain photosynthesis and transpiration for it is well supplied with water from the roots penetrating into deeper soil layers. Under these circumstances nutrient deficiencies are likely to be induced for nutrient requirement remains constant while nutrient availability is reduced markedly.

It is not clear whether nutrient uptake from the topsoil ceases completely as it dries out. There are still controversial views whether during the night, when transpiration is close to zero, plant roots are able to mediate between soil layers of high water and low nutrient content (subsoil) and soil layers of high nutrient but low water content (topsoil). Such a water transport from wet to dry soil via the roots and a subsequent release of water by the roots was termed hydraulic lift by Richards and Caldwell [10].

Despite the many attempts to measure hydraulic lift experimentally [10-15] there is no proof for it so far due to the difficulty of measuring changes in soil water content directly with high resolution in time and the required precision.

Recently we tried to measure hydraulic lift using micro-tensiometer technique. Micro-tensiometers with a cup diameter of only 2 mm were connected to pressure transducers and a data logging unit registering soil matrix potential continuously without disturbance of the equilibrium as it is known from insertion-tensiometers. Micro-tensiometers were inserted in different soil depths in a root box in which a perlite layer separated topsoil from subsoil preventing capillary rise of water from the subsoil but allowing roots to penetrate to the subsoil (figure 2).

Figure 3 shows the change in soil matrix potential in 3 horizons ; two of which were above the perlite layer and one in 25 cm depth below the perlite layer. Soil matrix potential above the perlite layer continued to decrease after subsoil watering (arrow). No water transport to the topsoil could be observed.

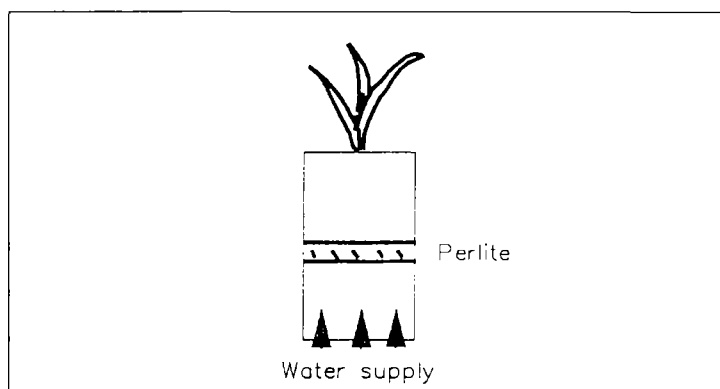


Figure 2.

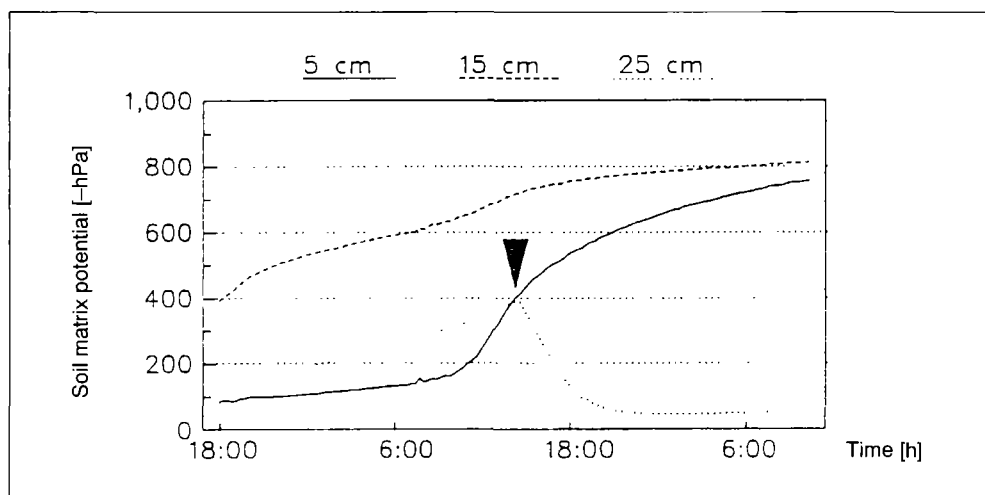
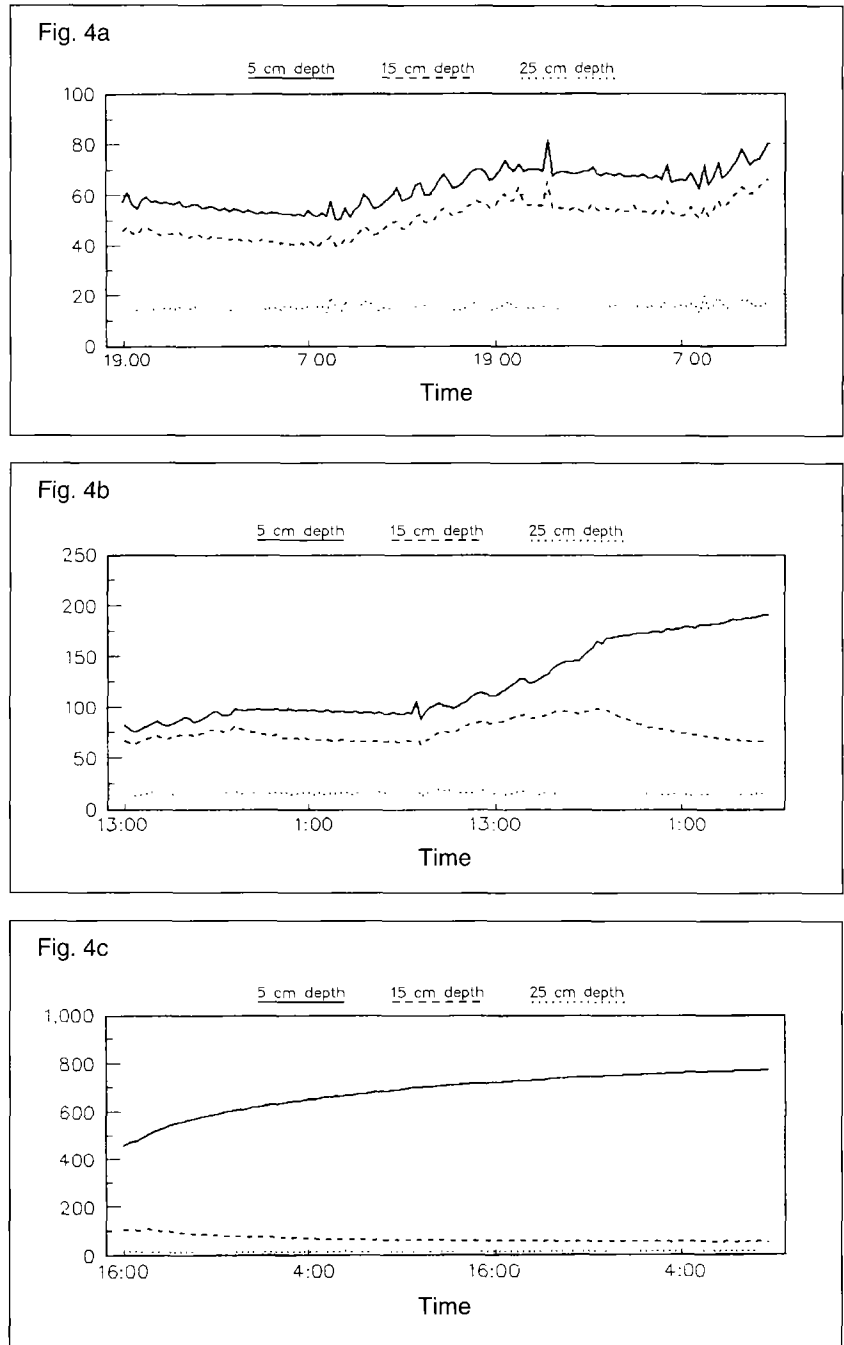


Figure 3. Change of soil matrix potential in 3 horizons after subsoil water supply. The soil profile was separated in 15-16 cm depth by a perlite layer.

The experiment was repeated with a second plant in the same setup. This time the plant was watered from the top as well as from the subsoil to achieve an even water distribution in the rooting zone at the start of the measuring period. In addition, to ensure high water availability in the subsoil, the latter was watered continuously. Figure 4a shows the changes in soil matrix potential for this measuring cycle. There was a clear increase in soil matrix potential in the topsoil during the night which was equivalent to an increase in water content in the topsoil by up to 6 Vol. %. Hydraulic lift was observed on 6 successive days (data not presented) until soil matrix potential decreased to -100 hPa at the end of day 7 in the top horizon (5 cm depth). Thereafter no hydraulic lift could be observed in 5 cm depth while it continued in 15 cm depth (figure 4b). The roots in 5 cm depth obviously lost their ability to release water to the surrounding soil. This ability could not be regenerated, neither by extending the night period (figure 4c), nor by rewetting the topsoil by watering from the top.

Soil matrix potential [-hPa]



Figures 4.

Osmotic adaptation of the roots (table I) was most likely responsible for the loss of hydraulic lift. Root osmotic potential counterbalanced the decreasing soil matrix potential and prevented thereby further water loss from the roots.

Table I. Change of root osmotic potential with decreasing soil matrix potential.

Soil depth [cm]	Root osmotic potential		Soil matrix [– MPa]
	[mOsm]	[– MPa]	
0 - 3	62	0.145	0.080
3 - 6	47	0.117	
6 - 9	38	0.089	
9 - 12	27	0.065	
12 - 15	20	0.052	0.008

As the hydraulic lift already disappeared at soil matrix potential below –100 hPa (pF 2) its ecological importance for nutrient uptake under drought stress conditions is questionable.

Conclusion

Despite a vast knowledge about single mechanisms describing the behaviour of water and nutrients in the soil, at the root surface and in the plants, it is not possible to predict their joint effect on plant growth unless the relation between the features determining requirement and supply are considered. Spatial variation of water and nutrient availability in the soil, which coincides with variation of the mechanisms dominating their interaction, is a key factor for understanding what is really limiting growth and how this limitation can be overcome by management practices.

References

1. Bationo A., Mokwunye A.U. (1991). Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa. The experience in the Sahel. *Fertilizer Research*, 29 : 95-115.
2. Radin J.W., Eidenbock M.P. (1984). Hydraulic conductance as a factor limiting leaf expansion of phosphorus-deficient cotton plants. *Plant Physiol.*, 75 : 372-7.
3. Marschner H. (1991). Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant Soil*, 134 : 1-20.
4. Bergmann W. (1986). *Farbatlas Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen*. Gustav Fischer Verlag Jena, 72-99.
5. Humble G.D., Hsiao T.C (1970). Light-dependent influx of potassium of guard cells during stomatal opening and closing. *Plant Physiol*, 46 : 483-7.

6. Davies W.J., Zhang J. (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biology*, 42 : 55-76.
7. Schurr U., Gollan T. (1989). Composition of xylem sap of plants experiencing root water stress - a descriptive study. In : *Importance of root to shoot communication in the response to environmental stress*. British Society for Plant Growth Regulation Monograph 21, eds. Davies W.J., Jeffcoat B. Proceedings of a meeting at the University of Lancaster, 13-15 September 1989.
8. Bhadoria P.B.S., Kaselowsky J., Claassen N., Jungk A. (1991). Phosphate diffusion coefficients in soil as affected by bulk density and water content. *Pflanzenernähr Z. Bodenk*, 154 : 53-7.
9. Nye P.H., Tinker P.B. (1977). Solute interchange between solid, liquid and gas phases in the soil. In : *Solute movement in the soil-root system*, eds. Nye P.H., Tinker P.B., Blackwell, Oxford, 33-68.
10. Richards J.H., Caldwell M.M. (1987). Hydraulic lift : substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 73 : 486-9.
11. Hagen R.M. (1949). Autonomic diurnal cycles in the water relations of nonexuding detopped root systems. *Plant Physiology*, 24 : 441-54.
12. Schippers B., Schroth M.N., Hildebrand D.C. (1967). Emanation of water from underground plant parts. *Plant Soil*, 27 : 81-91.
13. Lascano R.J., Van Bavel C.H.M. (1984). Root water uptake and soil water distribution. Test of an availability concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 233-7.
14. Baker J.M., Van Bavel C.H.M. (1988). Water transfer through cotton plants connecting soil regions of differing water potential. *Agron. J.*, 80 : 993-7.
15. Caldwell M.M., Richards J.H. (1989). Hydraulic lift : water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 79 : 1-5.

SESSION III

Facteurs variétaux de l'amélioration de l'alimentation hydrique

Animateur : Dr Niangado (IER, Mali)

Rapporteur : M. Diagne

11

Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil Cas de la zone de Bankass au Mali

M. VAKSMANN, S. TRAORE

IER-CIRAD, BP 1813, Bamako, Mali

Le rôle de l'alimentation hydrique dans la production des cultures n'est plus à démontrer, particulièrement en zone soudano-sahélienne sujette à une grande variabilité de la pluviométrie. C'est pourquoi la valorisation de la ressource pluviométrique doit constituer un des objectifs principaux de toute action visant à stabiliser la production agricole. L'objet de cet article est de montrer comment la prise en compte de certaines particularités variétales permet d'affiner les modèles de simulation du bilan hydrique et d'étudier l'adéquation entre climat et variété.

Les critères variétaux d'adaptation à la sécheresse sont nombreux et font appel à des disciplines variées. Toutefois, le principal facteur demeure l'évolution phénologique de la plante dont dépend, pour un lieu donné, la concordance entre les phases sensibles et le risque de sécheresse.

Le déroulement du cycle végétatif (durée, phase sensible) dépend de la date de semis et de la photosensibilité de la plante.

Un des objectifs des programmes d'amélioration du mil a été l'obtention de variétés plus précoces et mieux adaptées à des hivernages plus courts. Toutefois, les résultats des essais agronomiques montrent que le rendement est lié à la longueur du cycle et que les variétés de

cycle long valorisent mieux l'eau [1], d'où l'intérêt d'améliorer nos connaissances dans ce domaine.

Dans un premier temps, nous nous proposons d'établir un modèle de prévision de l'évolution phénologique de quelques variétés de mil utilisées au Mali. En effet, si le phénomène de photosensibilité est bien connu, la caractérisation des variétés sur ce critère est encore fragmentaire et ne permet pas toujours la prévision du devenir de la plante en tenant compte du lieu et de la date de semis.

Dans un deuxième temps, nous avons utilisé ces caractéristiques variétales pour comparer les bilans hydriques simulés et étudier les conséquences de la photosensibilité sur la satisfaction des besoins en eau de différentes variétés de mil. C'est ainsi que quatre variétés ont été testées sous le climat de la zone de Bankass au Mali (pluviométrie moyenne 550 mm). Les conséquences du développement phénologique du mil sur le bilan hydrique sont abordées puis analysées en terme de choix variétal.

Caractérisation de l'évolution phénologique de quelques variétés

En cas de sécheresse, un des principaux risques est de voir coïncider le déficit hydrique avec une phase sensible. Il est donc essentiel d'être capable de prévoir les dates d'apparition de ces phases qui dépendent de la date de semis et du degré de photosensibilité de la variété. Ce dernier phénomène est une des caractéristiques essentielles des variétés traditionnelles d'Afrique de l'Ouest, et peut être considéré comme une adaptation de la plante à la durée de la saison des pluies.

Nous nous limiterons ici à la description du comportement de quelques variétés de mil afin d'élaborer un modèle de prévision de leur évolution phénologique suffisamment simple pour être intégré dans les modèles de simulation du bilan hydrique.

Le cycle du mil peut être divisé en quatre phases de la manière suivante [2] :

- phase juvénile : pendant cette phase, la plante est insensible à la longueur du jour et ne fleurira pas, quelles que soient les conditions extérieures ;
- phase d'attente : cette phase concerne les plantes sensibles à la photopériode ; elle peut se poursuivre indéfiniment si les conditions d'induction de la floraison ne sont pas réunies ;
- phase de réalisation de la morphogenèse florale : lorsque l'induction florale a lieu, le méristème passe de l'état végétatif à l'état floral ;
- phase de floraison et maturation des graines : cette phase s'étend de la sortie de l'épi à la maturité totale.

Suivant ce modèle, la durée du cycle dépend essentiellement de celle de la phase d'attente. En pratique, l'observation du moment de l'induction florale est difficile à réaliser car elle nécessite des prélèvements réguliers et l'observation du méristème. C'est pourquoi nous nous sommes limités à la mesure globale de la durée des trois premières phases, c'est-à-dire du semis à l'épiaison, ce dernier stade étant le plus facilement repérable sur le terrain. On considérera, en première approximation, que la période allant de l'épiaison à la maturité totale est constante suivant la variété.

On peut considérer trois principaux types de comportements vis-à-vis de la photopériode. Les deux premiers correspondent aux extrêmes de la réaction photopériodique.

Certains mils, dans les conditions de culture d'Afrique de l'Ouest (semis juin-juillet), ne présentent pas de sensibilité marquée à la photopériode. La longueur du cycle est constante quelle que soit la date de semis, approximativement 90 jours, la durée semis-épiaison varie peu autour de 40-45 jours. C'est le cas des variétés dites "Souna".

Le deuxième type concerne les mils strictement photosensibles qui n'épient que si la durée journalière d'éclairement est inférieure à 12 heures, ce qui correspond approximativement à la date du 21 septembre. En conditions naturelles, la longueur du cycle de ces mils varie entre 100 et 170 jours. Dans ce cas, un retard de semis provoque un raccourcissement de la durée du cycle de même durée. C'est le cas des variétés dites "Sanio".

Le troisième type correspond aux variétés dites de "cycle intermédiaire". Un décalage de la date de semis provoque un changement de la durée du cycle dont l'amplitude varie avec les variétés. C'est le cas de nombreuses variétés traditionnelles des zones sèches. Les renseignements concernant ces variétés sont encore incomplets et nous avons voulu en préciser le comportement en réalisant des essais avec des dates de semis échelonnés (environ 10 jours entre chaque semis du 20 juin au 30 juillet).

La figure 1a illustre l'évolution de la durée du stade semis-épiaison en fonction de la date de semis pour deux variétés : M9D3, originaire de la zone de Koulikoro, et NKK, variété locale de la zone de Bankass.

Nous pouvons distinguer deux types de comportement en fonction de la date de semis :

- en cas de semis tardif (après le 10 juillet), la durée semis-épiaison reste relativement constante, indépendamment de la date de semis. On peut considérer que pour ces dates de semis, la floraison est induite dès la fin de la phase juvénile, la phase d'attente est inexistante et la plante se comporte comme un mil de type "Souna";

- pour un semis plus précoce, la durée du stade semis-épiaison diminue avec le retard de semis. En première approximation, nous considérons cette décroissance comme linéaire, la pente de la droite fluctuant selon les variétés.

Pour chaque variété, il est alors important de déterminer les paramètres suivants :

- la date de semis limite (DSL), date à partir de laquelle l'induction florale a lieu dès la fin de la phase juvénile. C'est aussi la date de semis à partir de laquelle la durée semis-épiaison (et donc la durée du cycle) peut être considérée comme constante ;

- la durée minimale de la période semis-épiaison (DSEmin) ; ce paramètre correspond à la durée semis-épiaison pour un semis postérieur à la date de semis limite ;

- la valeur de la pente (K) de la droite donnant la durée du stade semis-épiaison en fonction de la date de semis lorsque le semis est réalisé avant DSL ;

- la durée moyenne de la phase allant de l'épiaison à la maturité totale (EPIMAT).

Connaissant ces caractéristiques variétales et la date de semis, il est donc possible, sur un site de latitude proche du site étudié, de prévoir la date d'épiaison et la durée du cycle de la façon suivante :

- si la date de semis est postérieure à la DSL, la longueur du cycle est constante et égale à DSEmin + EPIMAT, et la date d'épiaison a lieu DSEmin jours après la date de semis ;

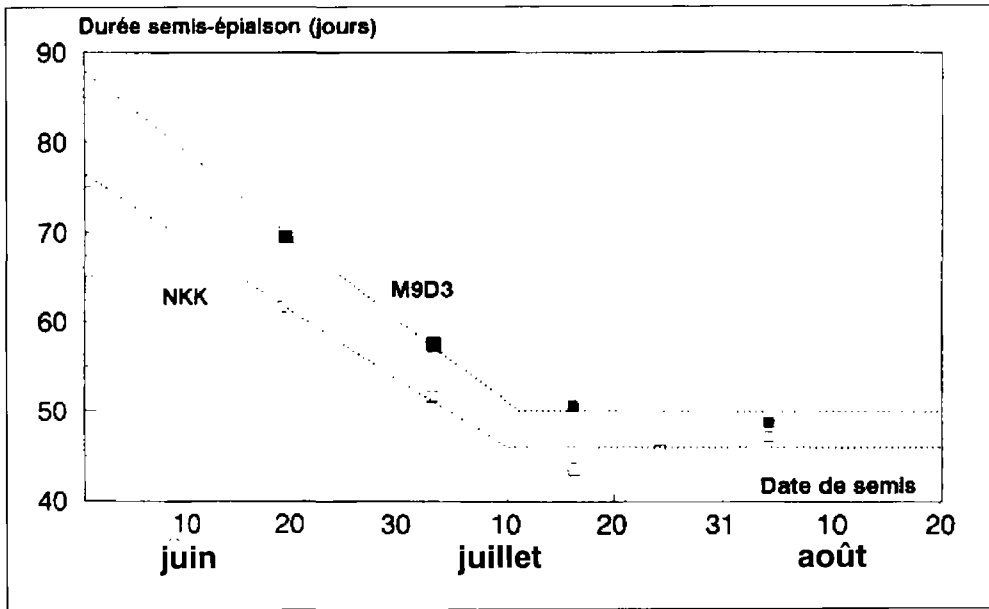


Figure 1a. Durée du stade semis-épiaison en fonction de la date de semis pour les variétés NKK et M9D3.

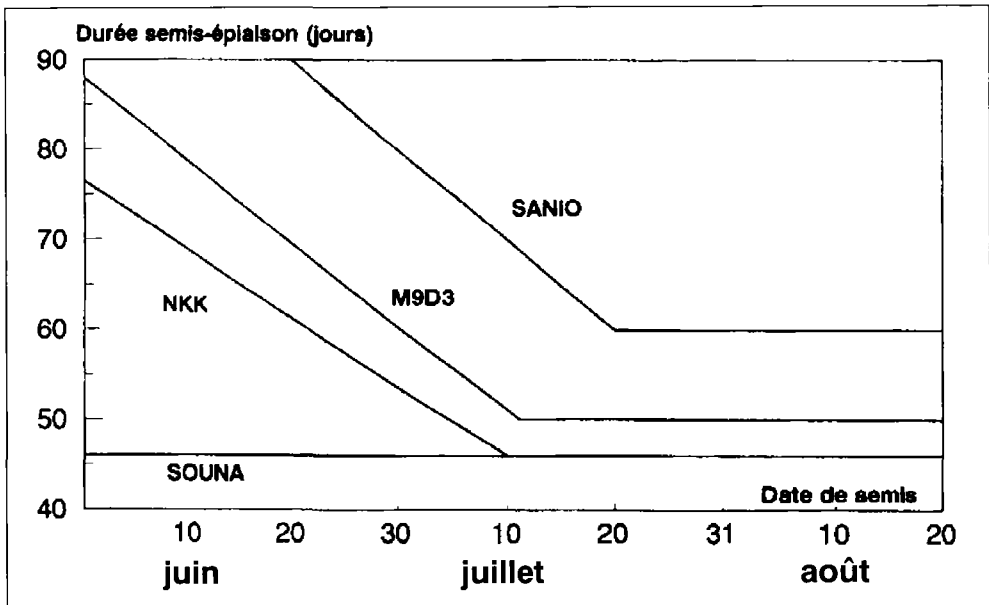


Figure 1b. Modèle établissant la durée du stade semis-épiaison en fonction de la date de semis pour quatre types de variétés de mil.

– pour un semis plus précoce, la durée semis-épiaison (DSE) est donnée par la formule : $DSE = DSE_{min} - K \times d$, où d est le nombre de jours entre la date de semis et la DSL.

Ce modèle est présenté sur la figure 1b pour les deux variétés abordées et pour les mils de type “Souna” et “Sanio”. Le tableau I résume les caractéristiques variétales des différents types envisagés.

A l’avenir, un modèle physiologique plus complet pourrait examiner les durées des différentes phases en somme de degrés jour et se fonder sur la photopériode pour déterminer le moment de l’induction florale. Ces études sont en cours, mais, dans un premier temps, nous nous en tenons à ce premier modèle, suffisamment simple pour être intégré dans nos simulations du bilan hydrique.

Tableau I. Caractères variétaux des quatre types de variétés étudiées.

Type	Variété	K	DSE _{min}	DSL	EPIMAT
1	Souna	0	46	10 juillet	35
2	NKK	0,71	46	12 juillet	35
3	M9D3	0,86	53	9 juillet	35
4	Sanio	1	60	20 juillet	35

K : pente de la droite donnant la durée semis-épiaison en fonction de la date de semis ;

DSE_{min} : durée minimale de la phase semis-épiaison en jours ;

DSL : date de semis limite ;

EPIMAT : durée moyenne de la phase épiaison-maturité totale jours.

Evolution phénologique et bilan hydrique

Nous avons voulu quantifier les conséquences des différents types d’évolution phénologiques sur les termes du bilan hydrique pour les différents types de variétés étudiées précédemment.

Matériel et méthode

Notre étude s’est limitée au poste pluviométrique de Bankass (14°04’ de latitude Nord et 3°31’ de longitude Ouest). Situé en zone sahélienne, la pluviométrie moyenne y est de 573 mm et est soumise à une forte variabilité interannuelle. Les mois les plus pluvieux sont juillet et août, mais le semis est généralement déclenché très tôt, dès les premières pluies, de fin mai à début juin. Sur ce poste pluviométrique, nous disposons des données pluviométriques vérifiées sur 39 années de 1950 à 1988.

Les simulations du bilan hydrique ont été effectuées avec le modèle BIP [3] modifié pour prendre en compte la durée exacte des phases phénologiques à partir des caractéristiques variétales définies précédemment [4].

Quatre types de comportements ont été étudiés :

– variété pas ou peu photosensible de type “Souna” ;

- variété moyennement photosensible de type NKK ;
- variété moyennement photosensible de type M9D3 ;
- variété strictement photosensible de type “Sanio”.

Pour chaque simulation, nous avons étudié la satisfaction des besoins en eau pour les phases suivantes :

- CV (croissance végétative), du semis à 7 jours avant l'épiaison. Cette phase comprend le tallage et la montaison, sa durée varie avec la date de semis ;
- FL (floraison) débute 7 jours avant l'épiaison et sa durée est de 30 jours, c'est la phase de floraison ;
- MATU (maturation), la durée de cette phase est de 15-20 jours, de la formation des graines jusqu'à la maturité totale.

La date de semis pour chaque année allant de 1950 à 1988 a été déterminée en tenant compte des pratiques traditionnelles de la zone de Bankass où le semis a lieu dès les premières pluies, sans travail du sol, sur des buttes réalisées au cours des sarclages de l'année précédente. En cas de période sèche suivant les premières pluies, nous estimons qu'il y a eu ressemis et la date de semis est retardée aux pluies suivantes. Le cas d'un semis plus tardif des mils de type “Souna” fait aussi l'objet d'une étude particulière.

L'évapotranspiration potentielle a été évaluée par la formule de Penman à partir des données de la station de Mopti. Nous avons utilisé une valeur moyenne pour toutes les simulations.

Les coefficients cultureux ont été déterminés en fonction de la latitude du lieu et du découpage du cycle [5]. La réserve utile a été estimée à 90 mm et correspond à un sol sableux profond. Le ruissellement a été négligé.

Résultats

En raison de la variabilité des dates de semis d'une année à l'autre, la durée du cycle des différents types de variétés est soumise à de fortes variations. Le tableau II donne la longueur moyenne du cycle, les extrêmes calculés et l'écart type sur les 39 années envisagées.

Tableau II. Durées du cycle en jour pour les quatre types de comportement variétal du mil.

Variétés	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart type
Souna	90	90	90	/
NKK	110	130	90	14
M9D3	120	145	95	17
Sanio	130	170	100	22

Le tableau III donne les termes moyens du bilan hydrique obtenu pour chaque variété et pour le Souna semé tardivement. La figure 2 montre l'évolution de IDV, FL et ETR pour les quatre variétés concernées.

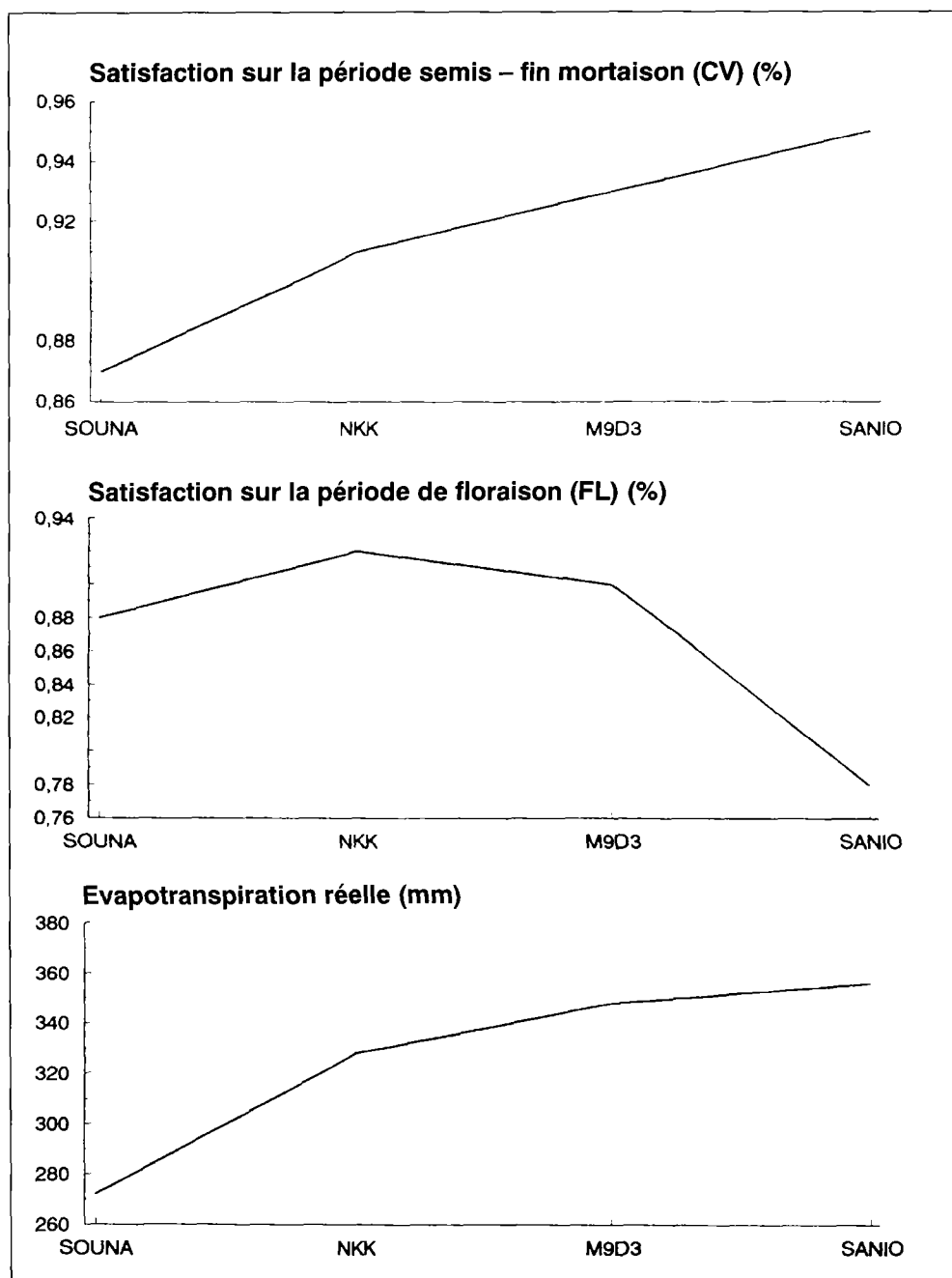


Figure 2. Taux moyens de satisfaction des besoins eau des quatre variétés de mil et évapotranspiration réelle.

Sur la période de croissance végétative (CV), on note une meilleure satisfaction des besoins des variétés tardives, mais, étant donné la forte variabilité interannuelle de la pluviométrie durant ce stade, les différences ne sont pas significatives.

Sur la période de floraison (FL), le taux de satisfaction maximum correspond à la variété locale, ce qui montre clairement son adaptation à cette zone. La variété la plus tardive correspond à la satisfaction la plus faible. Entre le Souna et le NKK, la différence est significative au seuil de 5 %.

L'évapotranspiration réelle (ETR) suit une logique semblable à CV, la différence la plus significative est observée entre la variété de type Souna et la variété locale de la zone (NKK).

Notons qu'en cas de semis tardif du Souna (après le premier juillet), les taux de satisfaction des besoins en eau sont semblables à ceux de la variété locale (NKK).

Tableau III. Taux de satisfaction moyen (CV : croissance végétative ; FL : floraison ; CYC : cycle) et évapotranspiration réelle (ETR) moyenne sur la période 1950-1988.

Variétés	Taux de satisfaction (%)			ETR (mm)
	CV	FL	CYC	
Souna	0,87	0,88	0,87	272
NKK	0,91	0,92	0,89	328
M9D3	0,93	0,90	0,86	348
Sanio	0,95	0,78	0,77	356
Souna tardif	0,96	0,91	0,90	275

Une autre manière d'interpréter ces résultats est d'exprimer les termes du bilan hydrique sous forme de rendements espérés. Pour cela, nous avons utilisé la fonction de production établie dans le cadre du réseau Espace permettant l'évaluation du rendement du mil en milieu paysan à partir de deux des termes du bilan hydrique que nous avons calculés.

Cette formule a été élaborée à partir de données d'enquêtes réalisées depuis 1987 dans les diverses zones agro-écologiques de quatre pays du Sahel (Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger). Elle évalue le rendement moyen des champs sous faible intensification.

On a : $Rdt = 11 \times IRESP + 52$

où **Rdt** : rendement grain en kg/ha ;

IRESP : indice de rendement espéré donné par la formule : $IRESP = CYC \times FL$;

CYC : taux de satisfaction des besoins en eau durant le cycle ;

FL : taux de satisfaction durant la floraison.

Le tableau IV présente, pour les 39 années étudiées, les rendements moyens attendus selon cette formule et leurs écarts types pour les différentes variétés de mil.

À l'exception de la variété tardive dont la production est nettement plus faible, on ne note pas de différences significatives pour le rendement moyen sur 39 ans. En revanche, l'écart type du rendement de la variété locale NKK est significativement inférieur à celui du rendement du Souna (au seuil de 5 %).

Il est donc possible de conclure que, si le potentiel moyen de production de ces deux variétés est comparable, le rendement de la variété locale est plus stable que celui du Souna.

Tableau IV. Rendements moyens espérés à Bankass pour les différents types de comportements phénologiques.

Variétés	Souna	NKK	M9D3	Sanio	Souna tardif
Rendement moyen (kg/ha)	902	955	901	661	958
Ecart type (kg)	169	102	123	153	104

Pour illustrer cette conclusion, la figure 3 donne la probabilité qu'un rendement soit atteint ou dépassé sur le site de Bankass pour les variétés de type Souna, NKK et Sanio.

Pour cela, nous utilisons une méthode d'analyse fréquentielle similaire à celle de la pluviométrie. Les rendements des différentes années sont classés par ordre décroissant et chaque rendement est affecté d'une probabilité donnée par la formule :

$$P = \frac{100n}{(N + 1)}$$

où :

- P est la probabilité d'atteindre ou dépasser le rendement de l'année considérée ;
- N est le nombre de mesures ;
- n est le numéro d'ordre de l'observation (après classement par ordre décroissant).

De cette manière, le rendement correspondant à la probabilité 80 % peut s'interpréter comme le rendement que l'on peut espérer atteindre 8 années sur 10, et celui de probabilité 50 % correspond au rendement médian.

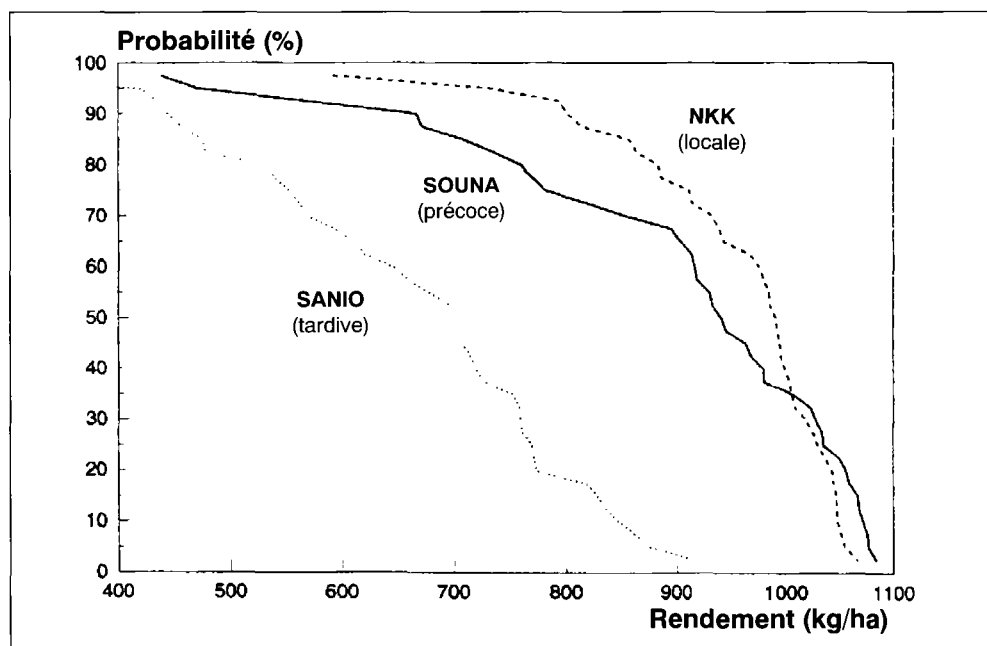


Figure 3. Probabilité d'atteindre ou de dépasser un rendement donné pour 3 variétés de mil à Bankass.

Ces courbes mettent bien en évidence l'inadéquation de la variété tardive pour la zone, le rendement étant systématiquement plus faible à tous les niveaux de probabilité.

Entre la variété précoce (Souna) et la variété locale (NKK), les deux courbes sont proches pour les bonnes années, mais la variété locale est systématiquement meilleure dans le cas des mauvaises années. Cela illustre la variance plus faible du rendement de la variété locale et exprime son caractère plus stable qui justifie la préférence des paysans pour leur variété traditionnelle.

Un semis tardif de la variété précoce améliore la satisfaction des besoins en eau, les rendements espérés devenant comparables à ceux de la variété locale.

Un semis tardif de ce type de variété est certainement à préconiser, d'autant plus qu'une floraison trop précoce les exposerait aux attaques d'oiseaux, mais, pour la zone de Bankass, cette stratégie est difficilement envisageable dans la mesure où :

- les variétés précoces ont souvent un rôle de soudure qui ne se justifie que par un semis suffisamment tôt dans la saison ;
- l'irrégularité des pluies et l'incertitude sur la durée de la saison n'inciteront pas les paysans à renoncer à leur pratique de semis précoce ;
- les semis précoces peuvent profiter du pic d'azote consécutif aux premières pluies. Ce phénomène n'est certainement pas à négliger dans ces conditions de faible fertilité.

Sur ces sols très perméables, un semis tardif et donc une installation tardive du système foliaire et racinaire ne permet pas d'utiliser efficacement les précipitations du mois de juillet. Une grande partie de l'eau peut alors se perdre par drainage dans les horizons profonds, comme le montrent les profils hydriques réalisés en 1991 pour un semis du 12 juin et un semis du 8 juillet (figure 4). La plus grande descente du front d'humectation pour le semis tardif résulte d'un développement plus faible de la plante en juillet ne permettant pas une utilisation optimale de l'eau de pluie.

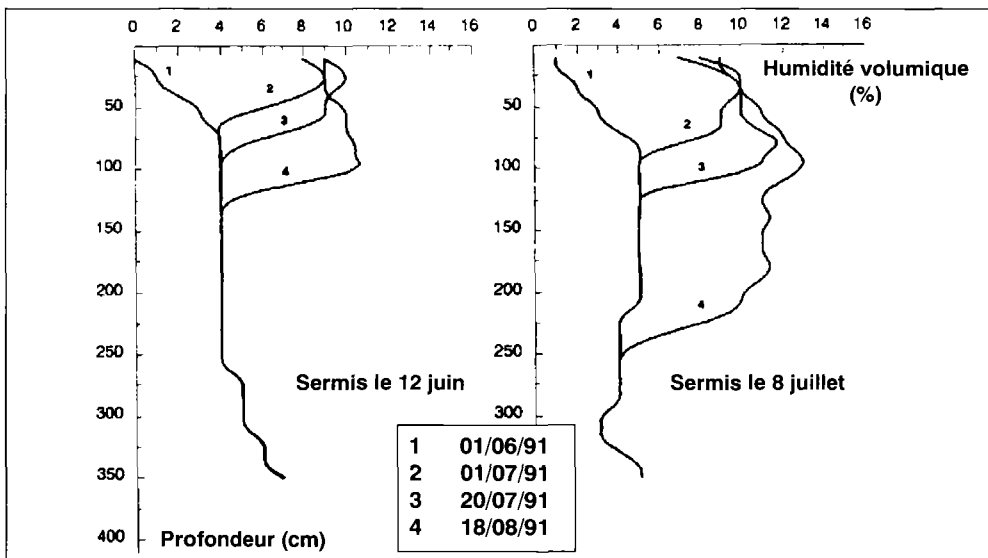


Figure 4. Descente du front d'humectation d'un mil précoce semé à deux dates de semis.

Conclusion

Nous avons montré la nécessité de connaître le comportement phénologique des variétés pour l'étude de leur adaptation à un climat donné. Le modèle proposé n'est qu'une première ébauche et un travail systématique sur les principales variétés rencontrées mériterait d'être réalisé.

On retiendra aussi que la supériorité d'une variété par rapport à une autre se détermine non seulement par le niveau moyen du rendement mais aussi par la stabilité de ce dernier d'une année à l'autre.

Les variétés précoces semées tardivement constituent une alternative à une installation tardive de l'hivernage, mais il existe des contraintes d'ordre agronomique qui limitent leur généralisation dans la zone étudiée.

Ce travail met en évidence l'intérêt de l'utilisation du bilan hydrique dans l'évaluation du bien-fondé d'une stratégie agronomique. Il permet d'utiliser les fonctions de production sur une longue période et donc d'analyser les conséquences d'une action à long terme.

Utiliser le bilan hydrique pour étudier les conséquences à long terme d'une technique culturale n'est possible que si :

- on peut estimer les conséquences de la technique sur le rendement (courbes de réponses...);

- on connaît l'interaction de la technique vis-à-vis du climat.

Le cas abordé ici est relativement simple car, d'une part, la fonction de production dépend directement du climat et, d'autre part, l'interaction est aisément modélisable à partir de la connaissance de la variété et de la date de semis.

La généralisation de cette approche à d'autres facteurs d'intensification (fertilisation, densités de semis...) demanderait des études plus approfondies abordant l'interaction du facteur considéré vis-à-vis du bilan hydrique.

Références

1. Lambert C. (1983 a). Influence de la précocité sur le développement du mil (*P. typhoides* S. et H.) en conditions naturelles. I - Elaboration de la touffe. Agron. Trop. 38 (1) : 16-26.
2. Belliard J. (1982). Analyse génétique et physiologique du système de contrôle photopériodique de la floraison chez le mil africain. Thèse d'état, Université Paris-Sud, centre d'Orsay.
3. Forest F. (1991). BIP-Logiciel de calcul des termes du bilan hydrique des cultures par pentade et phases physiologiques. CIRAD-IRAT/Montpellier.
4. Baron C. (1991). PRODCLIM - Logiciel de calcul des termes du bilan hydrique des cultures par pentade et phases physiologiques. CIRAD-IRAT/Montpellier.
5. Fréteaud J.P., Lidon B., Marlet S. (1984). La détermination des coefficients culturaux en zone soudano-sahélienne, proposition d'une méthode générale et pratique. CIRAD-IRAT/Montpellier, 19 p.

12

Contribution à l'utilisation des paramètres morphophysiologiques et agronomiques pour la sélection de variétés de sorgho résistantes à la sécheresse

A. BRETAUDEAU, B.M. TRAORE, S. TRAORE,
O.S. TOURE, M. KEITA

IPR Katibougou, Koulikoro, BP 06, Mali

Introduction

Il est bien établi que l'une des principales contraintes au développement de la culture du sorgho est le déficit pluviométrique [1]. Pour résoudre ce problème, deux approches sont envisagées : l'amélioration des techniques et pratiques culturales et/ou l'amélioration génétique de la plante pour la résistance à la sécheresse. Dans le premier cas, de nombreux progrès ont été enregistrés qui concernent le labour, le buttage, le sarclobinage, les densités et dates de semis, le paillage, les rotations culturales et enfin l'irrigation [2-6]. L'intérêt de chacune de ces techniques est variable mais elles semblent toutes souvent au-dessus des moyens économiques du paysan. Dans le deuxième cas, les résultats sont plus timides, bien que l'on soit assuré des facilités relatives à la diffusion de variétés résistantes à la séche-

resse tant que celles-ci répondent entre autres aux qualités organoleptiques de grains souhaitées par les consommateurs. En effet, la prise en main de ce problème, à la fois mais séparément, par les physiologistes et les sélectionneurs, a certainement contribué à ralentir les progrès dans le domaine de la création de variétés résistantes à la sécheresse. Zobel [7], ne nous signale-t-il pas que les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse sont génétiquement contrôlés ? Cependant, des résultats fort encourageants ont été obtenus entre autres sur le riz [8]. Du reste, l'essentiel des programmes de recherche sur la résistance à la sécheresse en Afrique et plus particulièrement au Mali [9] consiste en un suivi de variétés fixées dans des essais multilocaux où sont le plus souvent analysés seulement les paramètres agronomiques. Ces derniers, d'une grande importance, ne sont cependant pas suffisants pour caractériser la résistance à la sécheresse d'une variété.

Il est de nos jours bien établi que la régulation stomatique est étroitement liée aux disponibilités en eau du sol [10] ; par ailleurs, un système racinaire profond et dense permet dans certaines conditions une meilleure alimentation en eau de la plante. L'utilisation de ces deux paramètres (le premier physiologique, le second morphologique) dans un schéma classique de sélection variétale n'est pas sans problèmes. La présente étude tente d'associer concepts agronomiques et morphophysiologiques pour contribuer à la solution du délicat problème de l'amélioration génétique du sorgho vis-à-vis de la sécheresse.

Matériels et méthodes

Matériel végétal

Dans chacune des deux expériences qui suivent, 3 variétés ont été étudiées : la MIG SOR 86.30.3, mutant issu du Gadiaba (type Durra), avec des grains vitreux, une taille courte ($\approx 1,6$ m) ; l'ICSV 1063, variété de l'ICRISAT (type Caudatum), productive, de taille courte avec des grains farineux sensibles aux moisissures ; l'IPS0001, variété locale améliorée (type Guinea), avec une très haute taille ($\approx 4,5$ m) et une longue panicule (65 cm) lâche retombante à maturité.

Dispositif essai en fûts

Cet essai comportait 40 fûts, chacun ayant une hauteur de 1,32 m et 58 cm de diamètre. Les fûts sont remplis de terre argilosableuse et les 3 variétés sont semées en triangle équilatéral de 10 cm de côté dans chacun des fûts. Chaque fût a reçu environ 100 kg/ha de phosphate d'ammoniaque au semis et 50 kg/ha d'urée à la montaison. Les fûts sont disposés à 1 m les uns des autres pour faciliter les observations et recouverts d'un film plastique pendant l'application du stress la nuit et avant les pluies journalières. Le début du stress est situé en période de pré-épiaison (50^e jour après semis) et le stress dure environ 5 semaines (≈ 32 jours). Les fûts non stressés reçoivent une quantité égale d'eau les jours non pluvieux. L'essai est interprété comme un bloc en randomisation totale.

Dispositif essai sur terrain

C'est un split-plot avec 2 traitements principaux (T1 = irrigué, T2 = stressé), et en facteur secondaire 3 variétés, chacune répétée 3 fois. Chaque répétition comporte 4 lignes, dont 2 lignes utiles de 6,4 m de longueur chacune et 0,8 m entre les lignes. Ainsi, chaque répétition correspond à 20,48 m². Les parcelles sont fertilisées à 100 kg/ha de phosphate d'ammoniaque au semis et 50 kg/ha d'urée à l'épiaison ; le stress est appliqué en pré-épiaison par l'installation d'un film plastique sur les parcelles stressées toutes les nuits et avant les pluies journalières.

Critères d'observation et méthodologie

Les facteurs physiologiques (teneur en eau des feuilles, du sol, conductance stomatique, enroulement des feuilles, systèmes racinaires) ne sont étudiés que sur les plants installés sur fûts. Dans les deux cas, les rendements et ses composantes seront analysés.

Pour la teneur en eau des feuilles, les prélèvements effectués sont ensachés et transportés au laboratoire où ils sont pesés avec une balance précise à 0,001 g. Après 4 heures de mesures successives, les feuilles sont plongées dans une boîte de Pétri contenant de l'eau pour environ 12 heures avant d'être encore pesées. La conductance stomatique est mesurée avec un appareil Delta T MK3. L'enroulement des feuilles est apprécié par cotation visuelle de 1 (feuille non enroulée) à 5 (feuille très fortement enroulée à 100 %).

Principales observations

Etude comparée du système racinaire de 3 variétés

Le tableau I indique que le poids sec racinaire de l'ICSV 1063 est plus élevé que les deux autres variétés, alors que la MIG-SOR 86-30-3 possède le système racinaire le plus profond. Quant à l'IPS 0001, ses racines ne sont ni profondes ni trop importantes (poids sec). L'intérêt de chacun des systèmes racinaires est discutable et dépendra du type de sol et de sécheresse. Ainsi, pour nos sols relativement profonds et la sécheresse au stade floraison qu'on rencontre le plus souvent dans notre région (la plus dévastatrice), on peut accepter que la MIG-SOR 86-30-3 possède un meilleur système racinaire.

Le nombre de racines fonctionnelles a été calculé en faisant la somme des poids secs des racines se trouvant dans les horizons de sol dont l'humidité est encore utilisable par les plantes (le point de flétrissement des sols argilosableux est d'environ 10 %).

On constate à partir des résultats du tableau II que la MIG-SOR 86-30-3 présente la plus grande quantité de racines fonctionnelles de la 1^e à la 3^e semaine du stress.

Tableau I. Masse des racines d'ancrage et secondaires par horizon (g) en début de stress et profondeur d'enracinement (cm).

Horizons	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	130-140	140-160	Total	Racine d'ancrage	Long. moyen (cm)
IPS 0001	7,40	4,16	0,50	—	—	—	—	—	12,21	5,30	69,66
ICSV 1063	7,60	5,10	3,90	1,56	0,23	—	—	—	15,39	5,20	94,33
MIG-SOR 86-30-3	6,10	5,05	2,50	1,16	0,80	0,80	0,70	0,30	17,30	4,25	115,66

Chaque mesure représente la moyenne de 3 à 5 répétitions.

Tableau II. Poids sec des racines secondaires fonctionnelles au cours du stress.

Dates	Variétés		
	MIG-SOR 86.30.3	ICSV	IPS 0001
1 ^{re} semaine de stress	2,27	1,67	0,55
2 ^e semaine de stress	1,67	0,3	0
3 ^e semaine de stress	0,83	0,3	0
4 ^e semaine de stress	0	0	0
5 ^e semaine de stress	0	0	0

Effet du stress sur la morphologie et la phénologie des plants de sorgho

L'effet de la sécheresse se traduit au niveau des feuilles par leur enroulement suivi d'un assèchement progressif du limbe, d'où une réduction progressive du nombre de feuilles et de la surface foliaire verte fonctionnelle. L'enroulement des feuilles est apprécié par cotation visuelle de 1 (ouverte) à 5 (fermée) et représenté par les tableaux III et IV. On constate que la MIG-SOR 86-30-3 conserve ses feuilles fonctionnelles jusqu'à 3 semaines de stress, alors que l'ICSV 1063 a tendance à fermer ses feuilles même sous irrigation aux heures chaudes de la journée. Quant à l'IPS0001, son comportement est intermédiaire.

Tableau III. Evolution de l'enroulement des feuilles une semaine après stress.

Conditions hydriques	Variétés	Heures			
		10,30	11,30	13,30	14,30
Irrigué	IPS0001	1,00	1,33	1,70	1,66
	ICSV 1063	1,00	1,00	1,33	1,00
	MIG-SOR 86-30-3	1,00	1,00	1,00	1,00
Stressé	IPS0001	1,66	2,66	2,66	2,66
	ICSV 1063	3,00	4,00	4,33	4,00
	MIG-SOR 86-30-3	1,33	1,66	2,33	2,33

Tableau IV. Evolution de l'enroulement des feuilles trois semaines après stress.

Conditions hydriques	Variétés	Heures			
		10,30	11,30	13,30	14,30
Irrigué	IPS0001	2,00	2,00	2,33	2,00
	ICSV 1063	1,66	1,00	1,33	1,33
	MIG-SOR 86-30-3	1,00	2,00	1,33	1,00
Stressé	IPS0001	2,66	3,33	3,66	3,66
	ICSV 1063	3,66	3,66	4,33	3,33
	MIG-SOR 86-30-3	1,33	2,66	2,66	2,33

Effet de la sécheresse sur la production de matière sèche (croissance en g/jour)

Le taux de croissance a été estimé par l'augmentation de poids de matière sèche produite par jour du début à la fin du stress hydrique.

L'analyse de la variance permet de déceler une différence significative entre les traitements. La décomposition des effets de traitement montre que cette différence significative est due à l'influence des variétés et des conditions d'alimentation hydrique.

Le manque d'eau entraîne une réduction de taux de production de matière sèche.

Nous notons également que MIG-SOR 86.30.3. produit plus de matière sèche par jour que les variétés ICSV 1063 et IPS 0001.

Effets de la sécheresse sur quelques paramètres physiologiques

Effet sur la conductance stomatique

La régulation de la conductance stomatique peut constituer un facteur important dans la résistance des plantes à la sécheresse. Elle permet de réduire la perte d'eau par transpiration. Ce mécanisme trop poussé entraîne une réduction de la production, aussi est-il nécessaire de déterminer un seuil de fermeture des stomates aussi compatible que possible avec la gestion de l'eau et le maintien du rendement de la culture. Les figures 1 et 2 indiquent l'ouverture moyenne des stomates aux environ de 13 h pendant les trois semaines du stress. On constate :

- qu'en condition irriguée, les stomates restent toujours ouverts jusqu'à la fin des études et qu'aucune différence n'est décelable entre les variétés ;
- qu'en condition stressée, la variété ICSV 1063 referme complètement ses stomates dès la 1^{re} semaine, tandis que les variétés IPS 0001 et MIG-SOR 86.30.3 gardent leurs stomates partiellement ouverts jusqu'à la 3^e semaine de stress.

Ce constat suggère l'existence d'un mécanisme de résistance à la sécheresse par évitement à la déshydratation chez ICSV 1063.

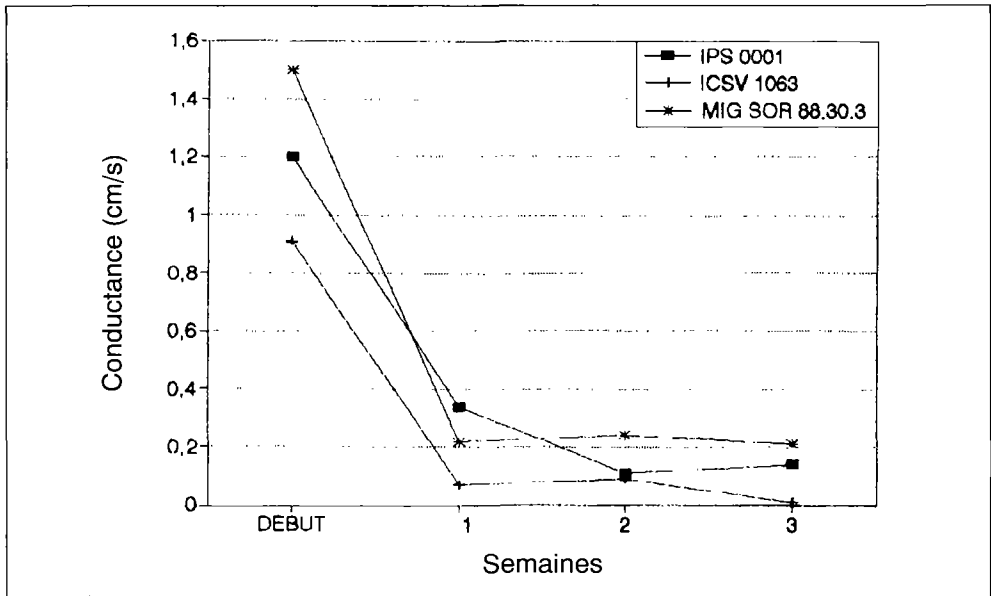


Figure 1. Evolution de la conductance stomatique des 3 variétés sous irrigation : on peut constater, même dans ces conditions, la plus grande fermeture des stomates de l'ICSV.

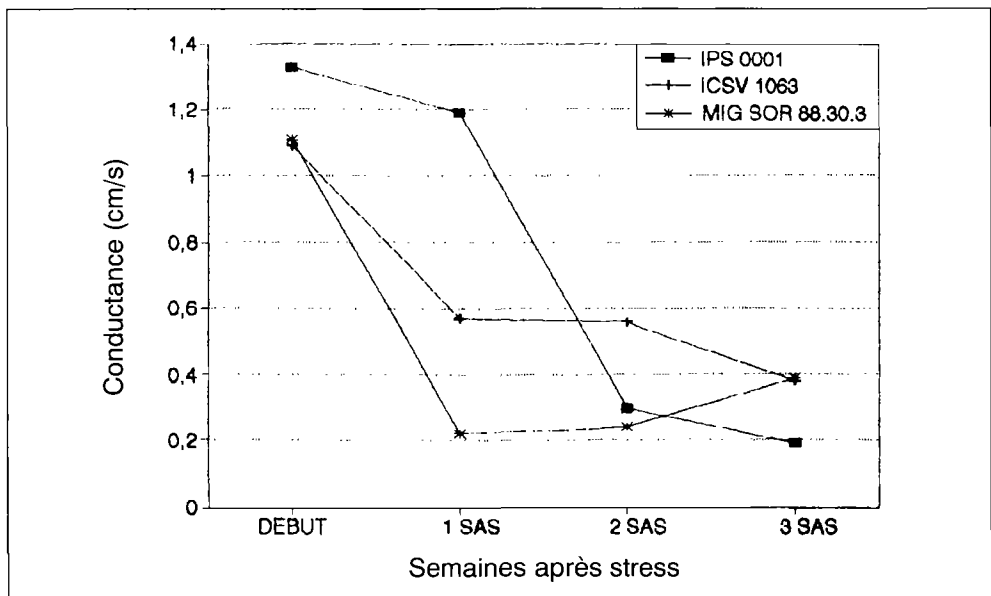


Figure 2. Evolution de la conductance stomatique des 3 variétés sous stress.

Effet sur la transpiration stomatique et cuticulaire et la teneur relative en eau des feuilles de sorgho détachées

La perte en eau par transpiration est réalisée en grande partie par les stomates et en faible quantité par la cuticule. Sur feuilles détachées, ces pertes ont été évaluées et représentées par les figures 3a et 3b qui nous permettent de dire :

– que MIG-SOR 86.30.3. et IPS 0001 possèdent une résistance stomatique et cuticulaire beaucoup plus faible que celle de ICSV 1063 ;

– que ICSV 1063 ferme très tôt ses stomates (avant 30 mn), alors que IPS 0001 et MIG-SOR 86.30.3 semblent garder ouverts leurs stomates jusqu'à environ 1 h après détachement.

Ce résultat explique que les variétés IPS 0001 et MIG-SOR 86.30.3 soient capables de laisser ouverts leurs stomates à une faible teneur en eau des feuilles (figure 2) et que ces deux variétés perdent plus d'eau que ICSV 1063. On constate par ailleurs que ICSV 1063 ferme ses stomates en condition de stress même si les feuilles possèdent une teneur relative en eau assez élevée. Ce qui confirme de plus sa résistance à la déshydratation.

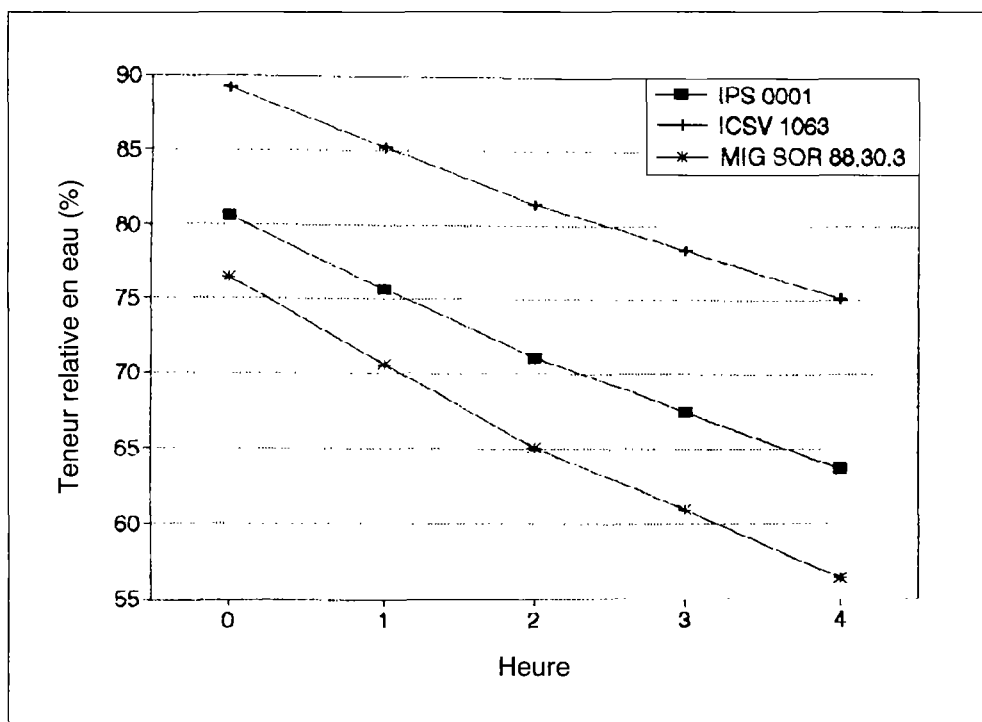


Figure 3a. Pertes en eau de feuilles détachées de 3 variétés de sorgho.

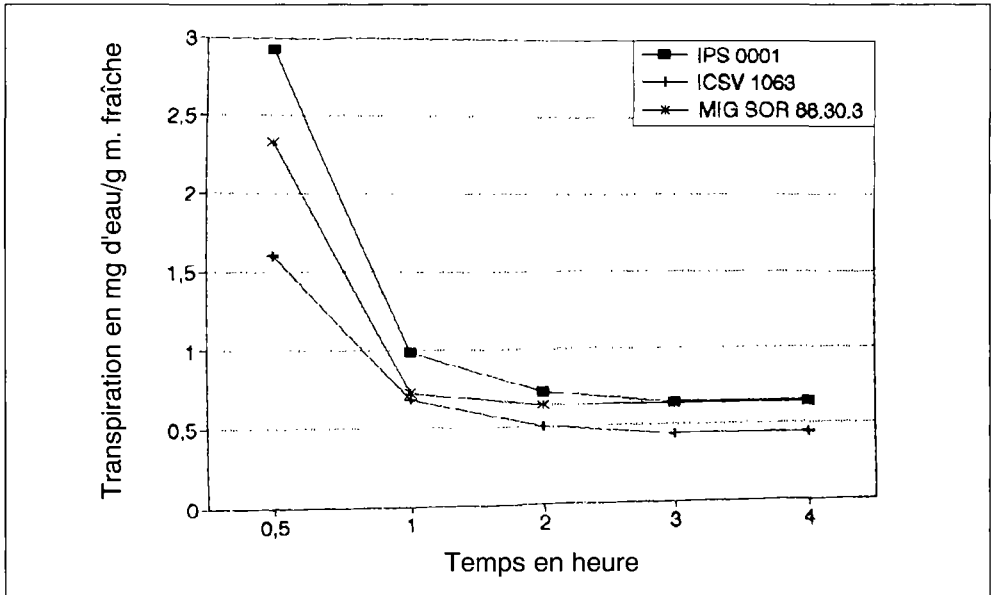


Figure 3b. Transpiration stomatique et cuticulaire des feuilles détachées de 3 variétés de sorgho.

Effet de la sécheresse sur le rendement et ses composantes

Les tableaux V et VI ci-dessous résument les résultats obtenus sur le rendement et ses composantes en fûts et sur le terrain.

L'analyse de la variance des résultats permet de déceler des différences significatives entre les traitements. La décomposition des effets des traitements montre que cette différence est due à l'effet des conditions hydriques et aux variétés d'une part ; et à l'interaction positive entre conditions hydriques et variétés d'autre part. Le poids moyen paniculaire et le nombre moyen de grains par panicule semblent ne pas être influencés par le stress dans les fûts. Par ailleurs, les interactions conditions hydriques et variétés sont négatives concernant toutes les caractéristiques du rendement sur terrain.

On peut alors dire :

- que toutes les variétés utilisées produisent plus en conditions irriguées qu'en conditions de stress. Cette meilleure production est soutenue par la supériorité des caractéristiques de rendement du sorgho irrigué par rapport au sorgho sous stress ;

- que la variété IPS 0001 (sans ses talles) donne un rendement supérieur à celui de MIG-SOR 86.30.3 et ICSV 1063, qui fournissent des rendements identiques dans les fûts. Par contre, sur terrain, c'est l'ICSV 1063 qui donne le meilleur rendement en irrigué et en stressé. Cette supériorité de rendement est soutenue par une longueur moyenne de panicule et un poids moyen de grains par panicule plus élevés de la variété IPS 0001 au niveau des fûts.

Sur terrain, c'est surtout le poids moyen des grains par panicule de ICSV 1063 qui est supérieur à celui des deux autres variétés.

Tableau V. Récapitulatif des données sur le rendement et ses composantes dans les fûts.

	Rt/poquet/g	Long. moyen. panicule (cm)	Pds moyen panicule (g)	Pds grains panicule (g)	Nbre moyen grains/panicule	Pds 1000 grains	Rapport grain/paille
Conditions hydriques							
Stressé	30,40	33,13	37,52	26,50	702,93	34,94	–
Irrigué	85,51	38,87	86,34	61,54	1 654,53	38,70	–
Signification	HS	HS	HS	HS	HS	HS	
Variétés							
IPS 0001	75,48	59,30	76,42	33,67	898,70	35,72	
ICSV 1063	46,04	18,50	62,81	46,01	1 173,80	40,21	–
MIG-SOR 86.30.3	53,38	30,40	68,44	52,38	1 663,70	34,56	–
Signification	HS	HS	NS	S	NS	HS	–
Interaction conditions hydriques et variétés							
Stressé :							
IPS 0001	18,25	52,00	33,40	6,54	192,20	32,08	0,015
ICSV1063	25,36	17,00	34,90	25,30	573,40	40,00	0,196
MIGSOR 86.30.3	47,66	30,40	57,62	47,66	1 343,20	32,70	0,218
Irrigué :							
IPS 0001	132,72	66,60	89,04	60,80	1 605,20	39,36	0,205
ICSV1063	66,72	20,00	90,72	66,72	1 774,20	40,42	0,373
MIGSOR 86.30.3	57,10	30,40	79,27	57,10	1 584,20	36,42	0,304
Signification	HS	HS	HS	HS	HS	NS	
CV %	25,59	11,20	33,30	28,25	18,37	8,19	
PPDS %	19,57	7,25	21,42	22,38	389,59	3,81	

En condition de stress, sur fûts, la MIG-SOR 86.30.3 fournit le meilleur rendement par plante, tandis que sur le terrain c'est plutôt ICSV 1063 qui donne le meilleur rendement. Nous remarquons cependant que le stress réduit de beaucoup le rendement de variétés ICSV 1063 et IPS 0001, aussi bien dans les fûts que sur le terrain.

Les panicules des talles de l'IPS 0001 en conditions stressées portent des glumes blanches, alors que la panicule principale porte des glumes noires. Par ailleurs, sous stress, les talles sont moins productives.

Enfin, nous observons :

- que ICSV 1063 présente un meilleur rapport grains sur paille que les deux autres, IPS 0001 et MIG-SOR 86.30.3 ;
- que l'irrigation améliore le rapport grain/paille ;
- que le stress réduit de rapport grain/paille et que cette réduction est moins accentuée chez MIG-SOR 86.30.3 que chez IPS 0001 et ICSV 1063.

Tableau VI. Récapitulatif des données sur le rendement et ses composantes sur le terrain.

	Rt en kg/ha	Long. moyen. panicule (cm)	Pds moyen panicule (g)	Pds grains panicule (g)	Nbre moyen grains/panicule	Pds 1000 grains
Conditions hydriques						
Stressé	1 027,55	33,11	46,80	31,22	755,10	37,15
Irrigué	1 428,66	36,26	62,34	47,97	993,01	42,18
Signification	S	HS	NS	HS	HS	HS
Variétés						
IPS 0001	970,66	47,29	47,29	31,69	663,88	35,35
ICSV 1063	1 670,83	65,72	65,72	49,53	1 088,96	43,60
MIG-SOR 86.30.3	1 042,83	50,70	50,70	37,46	914,26	40,06
Signification	S	HS	NS	NS	S	NS
Interaction conditions hydriques et variétés						
Stressé :						
IPS 0001	627,66	51,53	31,96	18,76	521,66	32,80
ICSV1063	1 498,00	19,20	63,13	42,48	1 002,00	41,10
MIGSOR 86.30.3	957,00	28,60	45,31	32,44	831,53	37,56
Irrigué :						
IPS 0001	1 313,66	59,26	62,63	44,62	806,10	39,90
ICSV1063	1 843,66	19,60	68,31	56,58	1 175,93	46,10
MIGSOR 86.30.3	1 128,66	23,93	56,10	42,71	997,00	42,56
Signification	S	NS	NS	NS	NS	NS
CV _A %	22,56	1,78	29,98	20,00	6,80	1,13
CV _B %	25,95	7,58	28,15	29,55	13,55	11,30
PPDS %	335,78-472,99	6,12		15,05	114,97	0,50

HS = Hautement significatif ; PPDS = Plus petite différence significative ; CV = Coefficient de variation ;
 NS = Non significatif ; S = significatif ; CVA = CV pour stressé ; CVB = CV pour irrigué.

Discussion et conclusions

Les résultats obtenus dans nos conditions expérimentales sur fûts et sur le terrain corroborent bien les hypothèses d'étude et permettent de tirer les conclusions suivantes.

Considérant la résistance à la sécheresse comme étant la capacité du matériel végétal à limiter la chute de son rendement sous stress, nous pouvons retenir la MIG-SOR 86.30.3 comme étant plus résistante que ICSV 1063 et IPS 0001. Nous notons également que ICSV 1063 et MIG-SOR 86.30.3 se comportent différemment vis-à-vis d'un stress terminal. Ceci

nous permet de mettre en évidence deux types de mécanisme d'évitement de la sécheresse selon la classification de Turner [11] :

- un mécanisme d'évitement de la déshydratation, qui se manifeste surtout chez ICSV 1063 par une fermeture et un enroulement précoces des feuilles suivis d'une réduction importante de la surface foliaire fonctionnelle ;
- un mécanisme de tolérance de la déshydratation chez MIG-SOR 86.30.3, caractérisé par un système racinaire profond et une ouverture des stomates même en présence de teneur relative en eau faible des feuilles.

Il est important de noter que le mécanisme d'évitement de la déshydratation qui permet une meilleure gestion de l'eau, présente l'inconvénient de réduire de beaucoup le rendement et ses composantes.

Par ailleurs, on constate une différence de comportement de l'ICSV 1063 sur fût et sur terrain. En effet, cette variété qui donne un rendement en grains inférieur à celui de MIG-SOR 86.30.3. en fournit plus que cette dernière sur le terrain. Cette situation s'explique par un potentiel initial de rendement plus élevé de ICSV 1063, mais aussi et surtout par une intensité de sécheresse moins sévère et de faible durée sur le terrain par rapport à celle des fûts.

Ces résultats confirment ceux de Brétaudeau *et al.* [12] et mettent en évidence la complexité de la stratégie de résistance du sorgho à la sécheresse. Ils nous permettent de retenir comme meilleur critère de résistance du sorgho à un stress terminal les mécanismes d'évitement et de tolérance de la sécheresse. Par ailleurs, l'aptitude de la MIG-SOR 86.30.3 à supporter le stress serait due à une meilleure résistance protoplasmique [13].

Le mutant ainsi sélectionné, même s'il est résistant à la sécheresse, ne présente pas les qualités organoleptiques de grains souhaitées par les consommateurs. Aussi serait-il souhaitable de l'utiliser comme donneur de gènes de résistance à d'autres variétés cultivées. Il semble possible d'utiliser dans une population en disjonction certains paramètres visuels (enroulement des feuilles par exemple) pour amorcer un premier choix des têtes de lignées (2^e ou 3^e génération) dont la résistance à la sécheresse serait appréciée par l'analyse des autres paramètres.

Références

1. ICRISAT (1987). Manuel pour la sélection du sorgho.
2. Huda A.K.S. (1988). Simulating growth and yield responses of sorghum to changes in plant density. *Agro. J.* 80 : 541-47.
3. Chopart J.L. (1980). Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse doc. INP, Toulouse, France : 160 p.
4. Maertens C. (1964). La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. Agro.* 15-5 : 539-54.
5. Blanchet M. Bosc, C. Maertens, J. Puech (1974). Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. *Ann. Agro.* 25 (5) : 681-96.

6. Blum A. (1970). Effect of plant density and growth duration on sorghum yield under limited water supply. *Agro. J.* 62 : 333-36.
7. Zobel R.W. (1983). Crop manipulation for efficient use of water : constraints and potential techniques in breeding for efficient water use. In limitation of efficient water use in crop production. Amer. Soc. Agro., Crop Science Society of Amer., Soil Sces Society of America. H.M. Taylor, Jordam., T.R Sinclair (eds) : 381-92.
8. Reyniers F.N., J.M. Kalms, J. Ridders (1976). Différence de comportement d'un riz pluvial et d'un riz irrigué en condition d'alimentation hydrique déficitaire. 1. Etude des facteurs permettant d'esquiver la sécheresse. *Agron. Trop.*, XXXI-2 : 177-87.
9. Traoré M.D. (1990). Rapport commission technique spécialisée SRCVO/IER. Bamako, Mali.
10. Turner N.C., J.E. Beeg (1974). Stomatal behaviour and water status of maize, sorghum and tobacco under field conditions. *Plant Physiol*, 53 : 360-65.
11. Turner N.C. (1986). Adaptation to water deficit : a changing perspective. *Aust. J. Plant Physiol*, 13 : 175-90.
12. Brétaudeau A., B.M. Traoré (1991). Caractérisation de quelques paramètres morphophysiologiques de deux variétés de sorgho (*Sorghum bicolor*, Moench) soumises à un stress hydrique. *Rev. Res. Amélior. Agri. Milieu Aride*, 3 : 21-34.
13. Louguet P. (1990). Amélioration de la résistance à la sécheresse et de la productivité du mil et du sorgho. Rapport, Paris XII.

13

Approche physiologique de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées pour l'amélioration de la production en zones sèches

D. ANNEROSE¹, B. CORNAIRE²

1. CERAAS/ISRA, BP 59, Bambey, Sénégal

2. DRA/SRPH, BP 884, Cotonou, Bénin

Depuis de nombreuses années, l'amélioration et la stabilisation de la production des espèces cultivées constituent un des objectifs principaux des pays situés en zones semi-arides. L'amélioration de la capacité d'adaptation du matériel végétal cultivé en condition de sécheresse peut constituer un moyen performant d'atteindre cet objectif. De plus, dans les pays en développement, cette démarche offre l'avantage de ne pas faire supporter directement le coût de ce progrès par l'agriculteur. La mise en place de cette démarche nécessite un effort de recherche multidisciplinaire contribuant à bien décrire les formes de sécheresse, à caractériser les formes de réaction qui existent chez l'espèce étudiée, à identifier celles contribuant à améliorer le niveau d'adaptation du matériel végétal étudié face à la forme de sécheresse qu'il subit et enfin à sélectionner et créer sur ces critères du matériel amélioré.

Dans la majorité des cas, et particulièrement en zones semi-arides caractérisées par une forte hétérogénéité des formes de sécheresse rencontrées [1-3], l'observation unique des variations pluriannuelles des rendements observés chez l'espèce ne permet pas de déterminer précisément les formes de réactions qu'elle développe. L'analyse doit alors être complétée par une meilleure compréhension des mécanismes du fonctionnement de la

plante (mécanismes physiologiques et biochimiques, caractères anatomiques, morphologiques et phénologiques) dont les interactions complexes déterminent les niveaux et la stabilité des rendements observés [4, 5]. Cette approche physiologique, intégrée dans le cadre d'un effort pluridisciplinaire pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse, se développe progressivement dans les pays en développement. Le Centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (CERAAS) constitue, depuis sa création en 1989 au Sénégal (CNRA/ISRA) par le R3S, un des principaux pôles de son extension en Afrique.

A la lumière des résultats obtenus au CERAAS sur les principales espèces annuelles de la région, nous allons discuter des mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse existant chez les plantes cultivées, en nous référant à la classification des formes d'adaptation généralement acceptée depuis les travaux de Levitt *et al.* [6], Hsiao [7], Turner [8] et Levitt [9]. A partir de ce bilan partiel des résultats obtenus, nous tenterons aussi de préciser les thèmes physiologiques importants à travailler pour l'amélioration de la productivité des principales espèces cultivées de la région. L'intégration de ces connaissances pour la sélection et la création de matériel adapté fait l'objet d'une autre communication présentée par Khalfaoui dans cet ouvrage.

Mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse

On distingue, chez les plantes, trois grandes formes d'adaptation à la sécheresse [6-9] :

- les plantes capables d'esquiver la sécheresse (*drought escapers*)

et les deux catégories de plantes supportant la sécheresse :

- les plantes ayant l'aptitude à éviter la sécheresse, c'est-à-dire capables de supporter la sécheresse grâce à des mécanismes leur permettant de conserver des niveaux élevés d'hydratation de leurs tissus (*drought avoiders*) ;
- les plantes pouvant tolérer la sécheresse, c'est-à-dire capables de supporter la sécheresse avec de faibles niveaux d'hydratation dans leurs tissus hydriques (*drought tolerants*).

L'isolement de ces formes d'adaptation à la sécheresse a permis d'établir un certain ordre dans la complexité et la diversité des types de réponses à la sécheresse et facilite l'étude des grands groupes de mécanismes ainsi identifiés. Cependant, la grande variabilité des formes de sécheresse permet rarement d'expliquer le niveau d'adaptation d'un matériel végétal donné par la seule considération d'un mécanisme pris isolément. Chacune de ces formes d'adaptation présente des avantages mais aussi des inconvénients, et une variété adaptée à un environnement semi-aride doit nécessairement présenter un équilibre entre les réponses d'esquive, d'évitement et de tolérance, afin de maintenir des niveaux satisfaisants de productivité.

Esquive de la sécheresse

Les plantes pouvant esquiver la sécheresse ont la capacité de réaliser leur cycle complet de développement avant la manifestation d'importants déficits hydriques du sol. Elles ne

peuvent donc être considérées comme de véritables xérophytes, qui se caractérisent par un développement phénologique rapide dès que l'eau est disponible et par un étalement de la phase reproductive jusqu'à la réapparition de conditions hydriques favorables. Leur origine est le résultat de la domestication des espèces sauvages à des fins productives et se traduit généralement par un raccourcissement des phases de floraison, de fructification et de maturation. La précocité se retrouve aisément chez la plupart des espèces cultivées. Elle correspond à l'existence de variétés dont la phase sensible de développement coïncide avec les périodes de meilleure disponibilité en eau [10]. Les indices de sélection pour la recherche de la précocité correspondent à des critères d'observation relativement simples. Un exemple de l'utilisation de ces critères est fourni par le travail de Khalfaoui [11], qui a conduit à la réduction d'une dizaine de jours de la longueur du cycle des variétés d'arachide les plus précoces (90 jours) cultivées en zone semi-aride. Cependant, si la précocité assure de meilleurs rendements durant les années sèches, elle s'accompagne d'une baisse de productivité lorsque les conditions hydriques sont favorables [10]. L'intérêt d'un tel caractère doit donc être évalué précisément en tenant compte des conditions pluviométriques, de l'évaporation, des caractéristiques hydrodynamiques du sol, des effets des pratiques culturales sur la disponibilité en eau et des réactions de la plante à cet environnement. Le développement de modèles intégrant ces différents concepts fournit des outils indispensables pour le choix du cycle à rechercher lorsque les données climatiques correspondantes sont disponibles [12, 3 ; communication de Diagne et Annerose à ce symposium].

Evitement de la sécheresse

Pour éviter la sécheresse, c'est-à-dire maintenir à des niveaux élevés le potentiel hydrique de leurs tissus durant des périodes sans pluies significatives, les plantes doivent développer des mécanismes leur permettant à la fois d'augmenter l'absorption en eau et de réduire les pertes en eau.

Croissance racinaire et absorption hydrique

Il est généralement admis qu'un système racinaire bien développé constitue un caractère important pour l'amélioration de l'absorption hydrique. De nombreuses études conduites au champ ou en conditions contrôlées montrent l'existence d'une grande diversité variétale des caractéristiques d'enracinement de différences espèces cultivées en conditions hydriques favorables (arachide, mil, sorgho, maïs, niébé) (voir communication de J.L. Khalfaoui). Cette diversité peut être exploitée, comme dans le cas de l'arachide, afin de sélectionner du matériel possédant l'architecture racinaire la mieux adaptée à un type de sécheresse donné.

Cependant, la détermination des caractéristiques optimales du système racinaire dépend étroitement de l'allure de la pluviométrie et des caractéristiques hydrodynamiques du sol, qui déterminent la disponibilité en eau pour la plante.

Les études conduites au CERAAS ont révélé une capacité considérable d'ajustement de la croissance et du développement racinaire des espèces étudiées aux conditions hydriques du sol. Batcho *et al.* [13], chez le mil (figure 1), Nwalozié [14], chez le niébé (figure 2) et

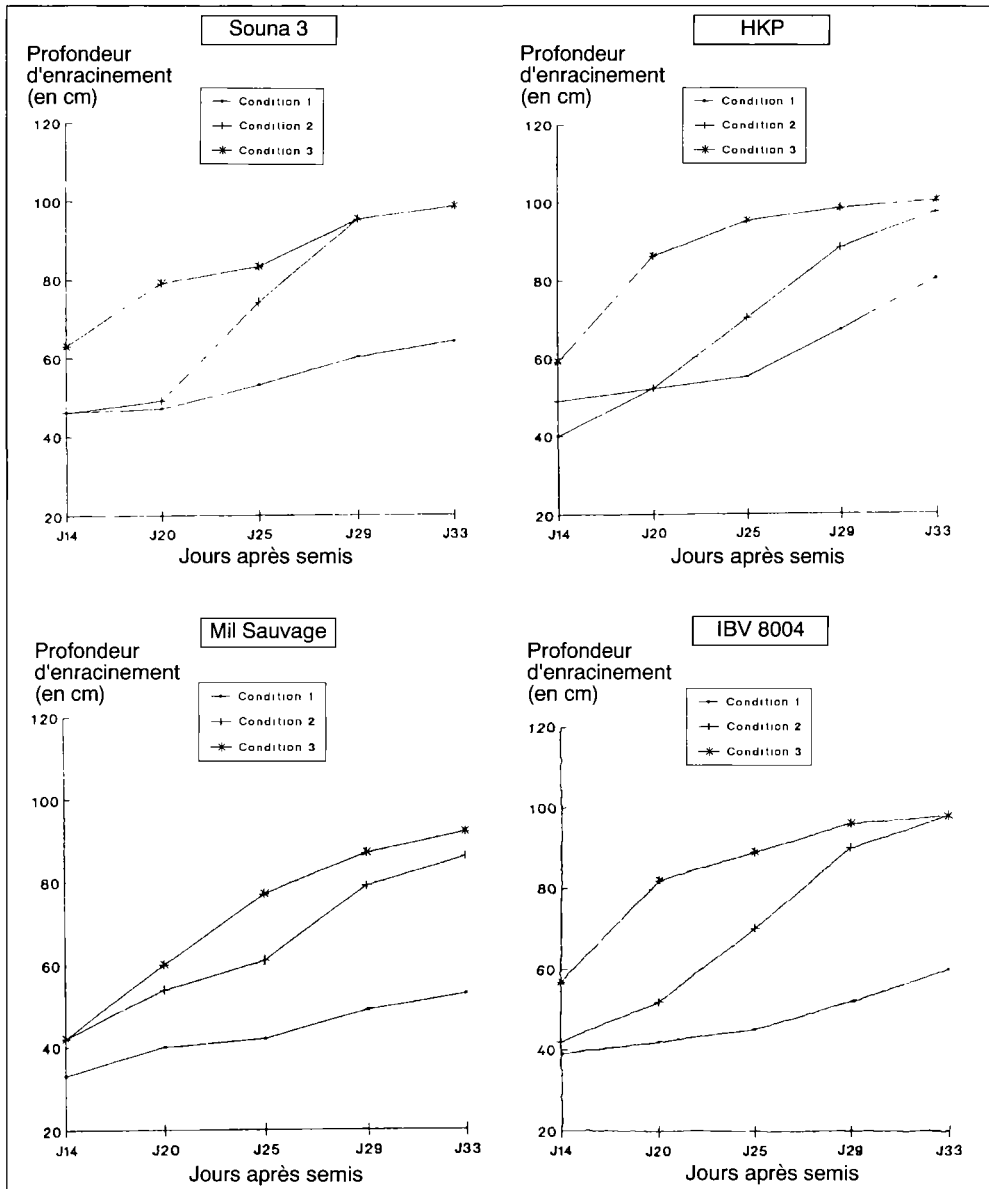


Figure 1. Evolution de la profondeur d'enracinement de 4 variétés de mil en fonction des conditions d'alimentation hydrique.

Condition 1. Témoin bien irrigué.

Condition 2. Arrosage à capacité au champ avant semis et arrêt arrosage.

Condition 3. Capacité au champ dans les horizons inférieurs et 50 % de la capacité au champ dans les horizons supérieurs.

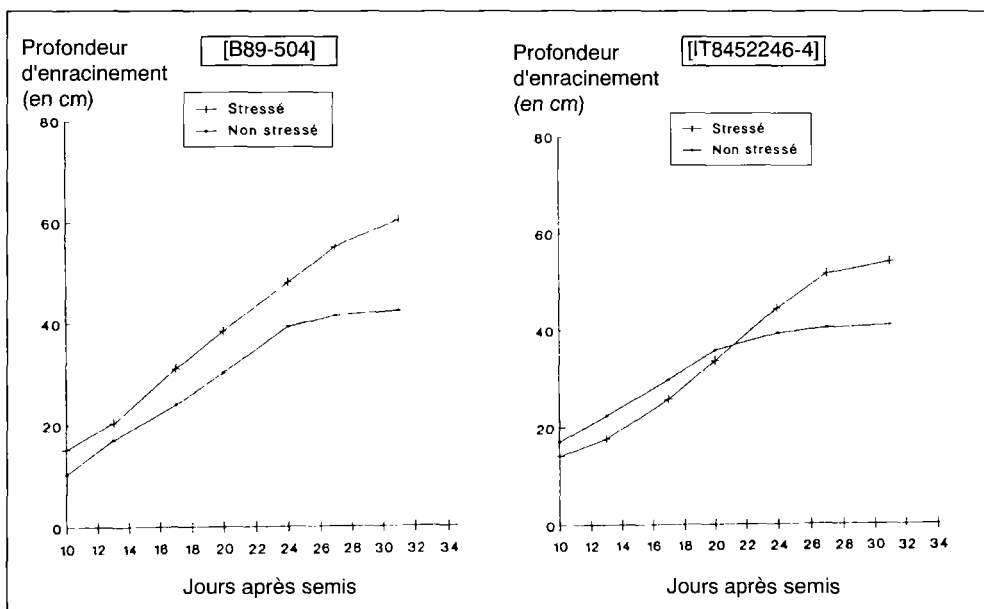


Figure 2. Evolution de la profondeur d'enracinement de 2 variétés de niébé en fonction des conditions d'alimentation hydrique.

Annerose [10], chez l'arachide, observent une augmentation de la profondeur d'enracinement en conditions hydriques limitantes. Chez l'arachide, l'augmentation de la vitesse d'enracinement observée en conditions hydriques limitantes s'accompagne d'une redistribution du système racinaire (figure 3), avec la formation de racines plus longues et plus fines en profondeur et de plus gros diamètre et plus courtes en surface [10]. Batcho *et al.* [13] mettent aussi en évidence l'existence d'une diversité variétale dans la nature et l'importance du phénomène de redistribution racinaire chez le mil cultivé en conditions hydriques limitantes. Dans le cas de l'arachide, cette modification de l'enracinement et l'augmentation du volume de sol colonisé qui en résulte, s'effectuent sans investissement supplémentaire d'assimilats en direction des racines et donc sans coût métabolique au détriment des autres organes [10].

Ces travaux apportent déjà un certain nombre d'informations originales sur le rôle du système racinaire en conditions de sécheresse.

1. Il apparaît bien que la capacité d'ajustement du développement racinaire en fonction des conditions hydriques du sol peut contribuer de manière significative à augmenter la disponibilité en eau, et par conséquent la capacité supposée d'évitement de la sécheresse d'une variété donnée (figure 4).

2. Ces premiers résultats indiquent aussi que, dans la recherche et la sélection de matériel adapté, la plasticité intravariétale du système racinaire devra être prise en considération et exploitée au même titre que la diversité intervariétale de développement racinaire observée en conditions normales.

3. L'étude des interactions état hydrique du sol-croissance et développement racinaire-

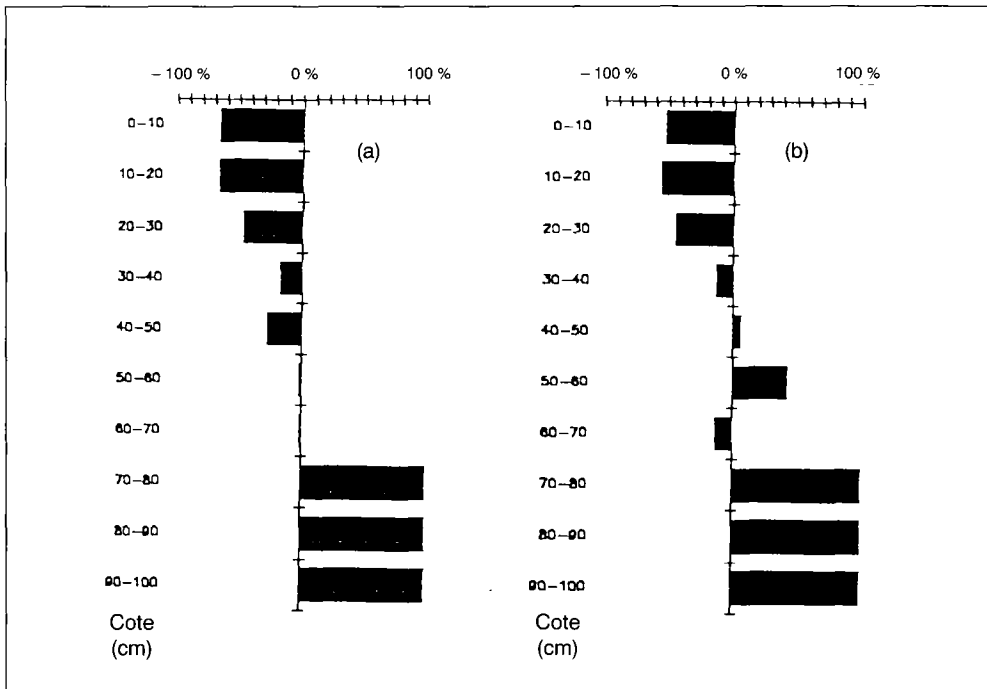


Figure 3. Effet de la sécheresse sur la distribution linéaire (a) et volumique du système racinaire de l'arachide exprimée en % par rapport au témoin.

absorption racinaire indique qu'il est nécessaire de fixer une limite dans la détermination des caractéristiques racinaires les plus performantes afin d'éviter une péjoration du rendement utile [4, 15]. Ainsi, dans le cas de l'arachide, Annerose [10] montre qu'une densité racinaire maximale comprise entre 0,6 et 0,8 cm/cm³ de sol est suffisante pour extraire l'eau d'une couche de sol bien humectée (figure 5). Au-dessus de ces valeurs, il est probable que la proportion de racines actives diminue et que des résistances au passage de l'eau à l'interface sol-racines se développent.

4. Lorsque l'étude de ces interactions est conduite en conditions contrôlées, le choix et la taille des dispositifs utilisés doivent être ajustés en fonction de l'espèce afin d'éviter un développement trop rapide du stress qui ne favorise pas la mise en place des caractères adaptatifs existant au niveau racinaire (pour exemple [16-17]).

L'intérêt d'un maintien de l'absorption hydrique doit aussi être évalué en fonction de l'efficacité de l'utilisation des quantités supplémentaires d'eau mises à la disposition de la plante. Celles-ci sont souvent très faibles par rapport à la consommation totale de la culture et, en fonction du stade de développement de la plante, ces mécanismes peuvent se révéler insuffisants pour lui permettre de maintenir l'état hydrique de ses tissus. Dans de tels cas, il devient nécessaire d'accompagner l'amélioration de l'absorption hydrique d'une régulation des pertes en eau.

Figure 4. Consommation en eau d'une culture d'arachide mesurée en fin de cycle (période de 7 jours) durant la même campagne. Le semis n° 1 correspond à un semis sur la première pluie utile et le semis n° 2 à un semis tardif (+ 15 jours).

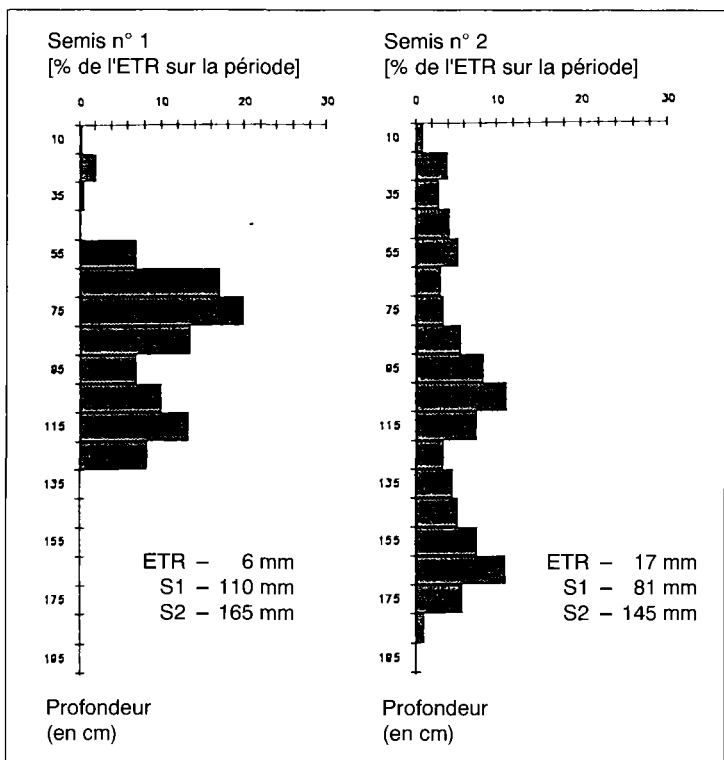
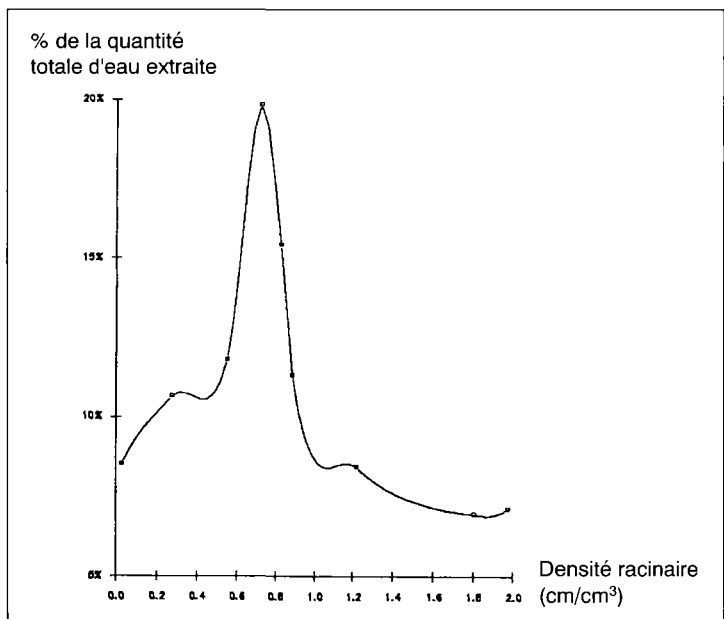


Figure 5. Relation entre la densité racinaire et la quantité d'eau extraite chez l'arachide cultivée sur sol bien alimenté en eau.



Réduction des pertes en eau

Différents mécanismes et caractères morphologiques contribuent à la réduction des pertes en eau durant le développement d'un stress hydrique ([18] pour une revue). Cependant, la fermeture hydroactive des stomates, lorsqu'elle est associée à une faible transpiration cuticulaire, constitue le mécanisme de régulation des pertes en eau le plus performant [19]. La valeur adaptative de ce mécanisme a pu être vérifiée au cours des études conduites au CERAAS sur l'arachide [10], le maïs [20], le niébé [14], le sorgho [21-23] et le manioc [24]. Bretaudeau *et al.* [21], sur deux variétés de sorgho (Mali) cultivées en conditions contrôlées, montrent ainsi que la variété contrôlant mieux ses pertes en eau par la fermeture des stomates maintient plus longtemps l'état d'hydratation de ses tissus en conditions de sécheresse.

Les méthodes et techniques disponibles permettent d'identifier aisément du matériel capable de réguler ses pertes en eau. Cependant, il est nécessaire de considérer que l'efficacité du contrôle stomatique dans la limitation des pertes en eau varie notamment en fonction du stade de développement de la plante. Chez le sorgho, Labare [22] et Dossou-Yovo [23] observent à la montaison une bonne sensibilité des stomates à la sécheresse contribuant à maintenir l'état hydrique foliaire à des valeurs élevées (-13 bars après 13 jours de sécheresse), tandis qu'au stade reproductif, ce mécanisme est moins efficace pour limiter la déshydratation (-28 bars après 10 jours de sécheresse). En réalité, la régulation des pertes en eau contribue à maintenir ou à augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau, notamment aux heures de plus forte demande évaporative. Elle est aussi, par conséquent, responsable d'une diminution de la productivité résultant de la diminution des échanges gazeux. Ainsi, une réduction des pertes en eau en début de cycle par l'intermédiaire de ces mécanismes pourrait augmenter la réserve utile d'eau durant la période de formation du grain, alors qu'une répression des mécanismes de régulation des pertes en eau durant les phases de fructification et de remplissage permettrait d'améliorer les rendements grâce à un maintien des échanges gazeux et notamment de la photosynthèse. La notion de limite dans l'intérêt d'un mécanisme adaptatif s'exprime à nouveau et le comportement le mieux adapté, "évasif" dans le cas du sorgho au stade reproductif ou "conservatif" dans le cas du niébé [4, 14], dépendra essentiellement du type de sécheresse rencontré.

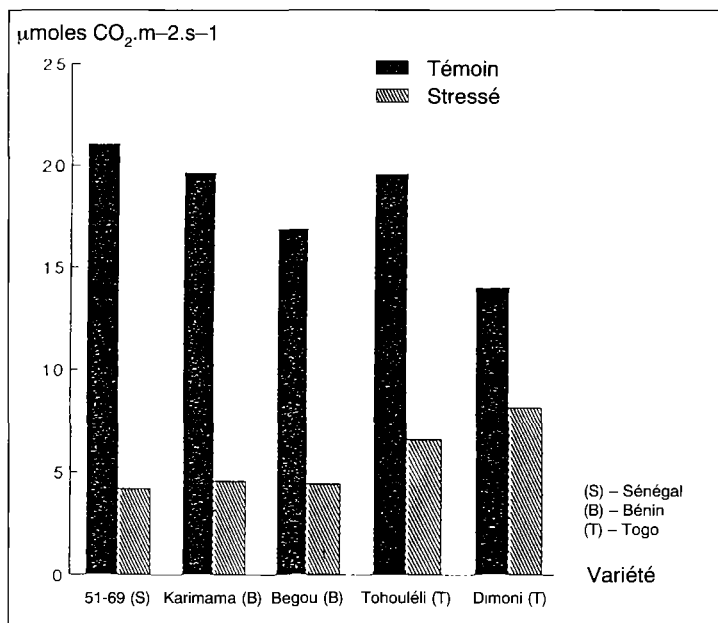
D'autres facteurs de l'environnement ont aussi des effets directs ou indirects sur le contrôle du degré d'ouverture des stomates et la transpiration, telles l'énergie lumineuse, la demande évaporative, la température foliaire, la concentration de CO_2 ou la vitesse de déshydratation. Cependant, l'état hydrique du sol au niveau de la zone racinaire constitue un des principaux facteurs contrôlant le degré d'ouverture des stomates. Les racines, lors d'une déshydratation du sol, agissent comme des "informateurs d'état de stress" et sont le siège de modifications hormonales qui, via le flux xylémien, sont responsables d'une diminution du degré d'ouverture des stomates et de la photosynthèse indépendamment de l'état hydrique foliaire [18, 25].

Les mécanismes d'évitement sont souvent considérés comme constituant la forme la plus évidente d'adaptation à la sécheresse. Néanmoins, ils se révèlent parfois insuffisants dans le cas de sécheresses intenses et prolongées, où il est aussi nécessaire que la plante puisse poursuivre son développement tout en supportant une déshydratation importante de ses tissus.

Tolérance à la sécheresse

On regroupe sous ce terme les mécanismes qui permettent à la plante de maintenir l'intégrité de ses fonctions métaboliques tout en endurant un déficit hydrique de ses tissus. Une illustration de l'importance de ces mécanismes est fournie par les travaux de Labare [22] sur la réponse à la sécheresse de cinq variétés de sorgho. L'auteur montre qu'à un même niveau de déshydratation des tissus foliaires, certaines variétés ont la capacité de maintenir des niveaux plus élevés d'activité photosynthétique foliaire (figure 6). Des résultats équivalents ont été obtenus sur arachide [10].

Figure 6. Photosynthèse foliaire mesurée sur 5 variétés de sorgho bien irriguées et stressées par suspension d'arrosage. Les pieds stressés de toutes les variétés ont un potentiel foliaire de 13 bars.



Les principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse sont le maintien de la turgescence et la tolérance à la déshydratation.

Maintien de la turgescence

La diminution de la turgescence des tissus est considérée, depuis les travaux de Lockhart [26] et Hsiao [7], comme l'une des causes principales des effets négatifs d'un stress hydrique sur les fonctions de la plante [9]. L'accumulation de solutés dans les tissus cellulaires déshydratés, l'augmentation de l'élasticité des parois cellulaires et la diminution de la taille des cellules contribuent à maintenir la pression de turgescence cellulaire. La maintenance de la turgescence permet de maintenir l'ouverture des stomates, la photosynthèse, la croissance racinaire et l'absorption hydrique ; elle diffère l'enroulement des feuilles et leur sénescence lors d'un déficit hydrique des tissus (pour une revue, [18]). Dans une étude comparant le degré d'adaptation à la sécheresse de races primitives de sorgho et de mil originaires du

Mali, du Soudan et de l'Inde, Blum et Sullivan [27] observent que le degré d'ajustement osmotique dans les feuilles est le seul caractère physiologique corrélé au niveau d'adaptation chez le sorgho ; les races originaires des régions les plus sèches présentent les niveaux d'ajustement osmotique les plus élevés et les vitesses de croissance végétative les plus fortes. Les premiers travaux menés au CERAAS dans ce domaine montrent l'existence d'une régulation osmotique de faible importance (3 bars) chez l'arachide [28] et confirment la forte capacité de régulation existant chez le niébé [14]. Plusieurs auteurs indiquent que l'ajustement osmotique a un effet positif sur le bilan en carbone de la plante puisqu'il permet la poursuite de la photosynthèse à des potentiels très bas [29, 31]. Cependant, peu d'informations sont réellement disponibles sur le coût métabolique associé à l'accumulation de solutés [32], surtout dans le cas des carbohydrates qui contribuent à l'ajustement osmotique et ne sont donc pas disponibles pour la formation de biomasse nouvelle ou pour l'entretien de celle déjà existante. Par ailleurs, comme l'indiquent les travaux de Turner [18], Davies *et al.* [33] et Zhang *et al.* [34] l'estimation précise de l'importance du mécanisme d'ajustement osmotique est compliquée par l'existence d'effets réciproques et interactifs entre les mécanismes de tolérance et d'évitement à la sécheresse.

Tolérance protoplasmique à la dessiccation

La tolérance à la déshydratation dépend de la capacité des membranes cellulaires, des protéines membranaires et cytoplasmiques, à résister à la dégradation et à la dénaturation.

Pham Thi *et al.* [35], Pham Thi [36], Vieira da Silva *et al.* [37, 38], Vieira da Silva [39] et Adjahossou [40] chez le cotonnier, le palmier à huile, le haricot et le niébé, observent que la contrainte hydrique entraîne une fragilisation des membranes des organites cellulaires accompagnée d'une modification de leur composition lipidique ainsi que d'une perte de compartimentation enzymatique. Ces auteurs observent aussi que ces modifications sont à l'origine d'un bouleversement des activités enzymatiques, et notamment d'une augmentation de l'activité des enzymes hydrolytiques responsables de la libération de produits inhibiteurs des réactions de la photosynthèse, comme le phosphate inorganite libéré sous l'action des phosphatases (Champigny *et al.* [41] ; Pham Thi *et al.* [42]).

Cependant, la tolérance à la déshydratation reste un terme général recouvrant à la fois la résistance mécanique des tissus au déficit hydrique ainsi que la résistance biochimique des enzymes et des protéines à la dénaturation. L'évaluation de son importance est de fait complexe et les méthodes simples souvent basées sur une estimation globale du maintien de l'intégrité des tissus restent encore les plus utilisées. Le dosage des électrolytes libérés sous l'effet d'un choc osmotique ou thermique a été ainsi utilisé pour l'étude de la tolérance protoplasmique de différentes espèces au CERAAS (tableau I).

Les études les plus avancées, sur l'arachide et le sorgho, indiquent que la capacité de tolérance à la dessiccation augmente avec l'âge du matériel [10, 43]. L'intérêt de ce comportement est donc particulièrement important à considérer, notamment chez les espèces ayant un comportement évasif en fin de cycle.

Tableau I. Valeurs d'intensité du choc osmotique ou thermique provoquant 50 % de dégâts membranaires chez quelques espèces étudiées au CERAAS.

Espèce	Dessiccation	Chaleur	Auteurs
Sorgho	– 23,0 bars	49 °C	Labare (1991a) [43]
Mil	– 23,0 bars	49 °C	Labare (1991b) [43]
Maïs	– 24,0 bars	52 °C	Akanvou (1991) [44]
Niébé		49 °C	Nwalozie (1991) [14]
Arachide	– 24,5 bars	52 °C	Annerose (1990) [10]
Manioc	– 37,0 bars	53 °C	Mbaye <i>et al.</i> (1991) [45]

Conclusions, perspectives

Dans leur stade actuel, ces résultats ont permis de mettre en évidence l'importante variété des formes de réactions à la sécheresse chez les plantes cultivées. La caractérisation de cette diversité, qui n'apparaît pas nécessairement si l'on se réfère uniquement aux rendements finaux obtenus, permet de mieux apprécier les possibilités réelles d'adaptation d'un matériel à une sécheresse donnée. Cependant, de nombreux thèmes physiologiques doivent être étudiés afin d'améliorer notre compréhension des mécanismes d'adaptation.

Les études sur la croissance, le développement et la fonctionnalité des racines doivent nécessairement intégrer l'étude de leurs interactions avec l'état hydrique et la nature du sol. Une attention équivalente doit donc être portée aux effets de la sécheresse sur les parties aériennes et sur les parties racinaires pour pouvoir mieux prendre en compte la capacité d'adaptation à la sécheresse existant à ce dernier niveau.

Les études sur la régulation des pertes en eau et notamment le contrôle stomatique ne peuvent être dissociées des objectifs réels, qui sont d'abord d'assurer une bonne production et pas, à tout prix, d'économiser l'eau. A cet égard, l'étude des interactions biophysiques ou biochimiques existant entre les racines et les parties aériennes constitue un domaine de recherche important.

Une meilleure compréhension des mécanismes de tolérance est nécessaire. Beaucoup de plantes sont récoltées en sec et finissent donc leur développement dans des conditions très limitantes en eau. A l'exemple du manioc cultivé en zone sèche, elles ne peuvent produire suffisamment que si leur niveau de tolérance est satisfaisant. Il faudra porter une attention particulière aux mécanismes de maintien de la turgescence, en caractérisant notamment leurs relations avec le maintien du développement et de la croissance en conditions de sécheresse. Les techniques déjà utilisées pour les études sur la tolérance protoplasmique présentent l'avantage de la simplicité. Il est maintenant nécessaire que la coopération déjà établie avec les laboratoires du Nord aboutisse rapidement à des méthodes et des techniques d'évaluation largement utilisables dont les relations avec les processus de productivité apparaissent de manière plus évidente.

Enfin, ces mécanismes ne doivent pas être considérés uniquement de manière séparée. De fortes relations de cause à effet existent entre les mécanismes d'esquive, d'évitement et de tolérance. Et les effets, positifs ou négatifs, d'un mécanisme donné sur la production ne peuvent être clairement appréciés hors d'une description précise de ces relations.

Références

1. Cochemé J., Franquin P. (1967). An agroclimatology survey of a semi-arid area in Africa South of Sahara. Tech Note World Meteorol Organ, 86 : 1-136.
2. Dancette C., Hall A.E. (1979). Agroclimatology applied to management in the soudanian and sahelian zones of Africa. In : Agriculture in semi arid environments : 98-118. Ecological studies 34. Hall A.E., Cannell G.H., Lawton A.W.(eds). Berlin-Heidelberg-New-York ; 340 p.
3. Annerose D.J.M. (1991). Caractérisation de la sécheresse agronomique en zone semi-aride. II. Evaluation des formes de sécheresse agronomique de l'arachide au Sénégal par simulation du bilan hydrique de la culture. Oléag, 46 : 61-5.
4. Hall A.E. (1981). Adaptation of annual plants to drought in relations to improvements in cultivar. Hortscience, 16 : 37-8
5. Robelin M. (1984). Méthode d'approche pour la hiérarchisation des critères de jugement de la résistance à la sécheresse. In : La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée. Dakar, septembre 1984. CIRAD/ISRA ; 591 p.
6. Levitt J., Sullivan C.Y., Krull E. (1960). Some problems in drought resistance. Bull Res Coun Israël, 80 : 173-80.
7. Hsiao T.C. (1973). Plant response to water stress. Annu Rev Plant Physiol 24 : 519-70.
8. Turner N.C. (1979). Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. In : Stress physiology of crop plants. Mussel H., Staples R.C. (eds). Wiley Interscience, New-York : 343-72.
9. Levitt J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt and other stresses. Academic Press, Inc. ; 606 p.
10. Annerose D.J.M. (1990). Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse. Université de Paris VII ; 282 p.
11. Khalfaoui J.L.B. (1988). Approche de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées en zones semi-arides. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) destinée à la région sèche du Sénégal. Thèse, Université d'Orsay ; 297 p.
12. Annerose D.J.M., Diagne M. (1990). Caractérisation de la sécheresse agronomique en zone semi-aride. I. Présentation d'un modèle simple d'évaluation appliqué au cas de l'arachide cultivée au Sénégal. Oléag, 45 : 547-54.
13. Batcho E., Daouda O.S., Do F., Annerose D.J.M., Khalfaoui J.L., Fofana A., Laffray D., Louguet P. (1991). Etude de la croissance racinaire de six cultivars de mil (*Pennisetum Americanum* L.). Bulletin APAMA, 6 : 51-63.
14. Nwalozi M.C. (1991). Adaptation of cowpeas to drought : Physiological aspects, Rapport CERAAS.
15. Passioura J.B. (1982). The role of root system characteristics in the drought resistance of crop plants. In : Drought resistance in crops with emphasis on rice. Irri (eds.) 71-82.

16. Sharp R.E., Davies W.J. (1979). Solute regulation and growth by roots and shoots of water stressed maize plants. *Planta*, 147: 43-9.
17. Sharp R.E., Davies W.J. (1985). Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *J Exp Bot*, 170 : 1441-56.
18. Turner N.C. (1986). Adaptation to water deficits : A changing perspective. *Aust J Plant Physiol*, 13 : 175-90.
19. Louguet P. (1984). Interrelations entre les mouvements des stomates et la résistance à la sécheresse chez les végétaux cultivés : cas du mil. In : La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée. Dakar, septembre 1984, CIRAD/ISRA : 591 p.
20. Hema I. (1990). Adaptation à la sécheresse du maïs. Rapport CERAAS.
21. Bretaudeau A., Traoré B., Simpara B. (1990). Amélioration de l'adaptation à la sécheresse du sorgho. Rapport CERAAS ; 17 p.
22. Labare K. (1991a). Amélioration de l'adaptation du sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) à la sécheresse : étude de quelques mécanismes physiologiques chez cinq génotypes soumis à un stress hydrique à la montaison. Rapport CERAAS.
23. Dossou-Yovo S. (1991). Adaptation à la sécheresse du sorgho. Rapport CERAAS (à paraître).
24. Mbaye A. (1990). Etude sur l'adaptation à la sécheresse du manioc. Rapport CERAAS.
25. Gollan T., Turner N.C., Schulze E.D. (1985). The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. III. In the sclerophyllous woody species *Nerium Oleander*. *Oecologia*, 65 : 356-62.
26. Lockhart J.A. (1965). An analysis of irreversible plant cell elongation. *J Theor Biol*, 8 : 264-76.
27. Blum A., Sullivan C.Y. (1986). The comparative drought resistance of landraces of sorghum and millet from dry and humid regions. *Annals of Botany*, 57 : 835-46.
28. Marone E. (1990). La régulation osmotique dans les tissus foliaires de l'arachide. Thèse d'ingénieur, INDR ; 35 p.
29. Jones M.M, Rawson H.M. (1979). Influence of rate of development of leaf water deficits upon photosynthesis, leaf conductance, water use efficiency, and osmotic potential in sorghum. *Physiol Plant*, 45 : 103-11.
30. Ackerson R.C. (1981). Osmoregulation in cotton in response to water stress II. Leaf carbohydrate status in relation to osmotic adjustment. *Plant physiol*, 67 : 489-93.
31. Mc Cree K.J., Kallsen C.E., Richardson S.G. (1984). Carbon balance of sorghum plants during osmotic adjustment to water stress. *Plant Physiol*, 76 : 898-902.
32. Hitz W.E., Ladyman J.A.R., Hanson A.D. (1982). Betaine synthesis and accumulation in barley during field water stress. *Crop Sci*, 22 : 47-54.
33. Davies W.J., Metcalfe J., Lodge T.A., Da Costa A.R. (1986). Plant growth substances and the regulation of growth under drought. *Aust J Plant Physiol*, 13 : 105-25.
34. Zhang J., Davies N.J. (1987). Increased synthesis of ABA in partially deshydrated root tips and ABA transport from roots to leaves. *J Exp Bot*, 38 : 2015-23.
35. Pham Thi A.T., Vieira da Silva J.B. (1975). Action d'un traitement osmotique sur l'ultrastructure des feuilles de cotonniers (*Gossypium hirsutum* L. et *G. anomalum* Waw. et Peyr.). *C R Acad Sci Paris*, 280 : 2857-60.
36. Pham Thi A.T. (1984). Action de la sécheresse sur les lipides polaires des feuilles de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.). *Bull Soc Bot Fr*, 131 : 89-97.
37. Vieira da Silva J.B., Naylor A.W., Kramer P.J. (1974). Some ultrastructural and enzymatic effects of water stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaves. *Proc Nat Acad Sci. USA* : 3243-47.

38. Vieira da Silva J.B., Pham Thi A.T., Zuily-Fodil Y. (1990). Résistance à la sécheresse. "Aspects Cellulaires". Rapport CCE.
39. Vieira da Silva J.B. (1976). Water stress, ultrastructure and enzymatic activity. In : Water and plant life : problems and modern approaches. Lange OL, Kappen L., Schluze E.D. (eds.) Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. Ecological studies, 19 : 207-24.
40. Adjahossou D.F. (1983). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le palmier à huile (*Elaeis Guineensis Jacq.*) Thèse d'Etat, université Paris VII ; 203 p.
41. Champigny M.L., Miginiac-Malow M. (1971). Relation entre l'assimilation photosynthétique de CO₂ et la photophosphorylation de chloroplastes isolés. I. Stimulation de la fixation de CO₂ par l'antimycine A., antagoniste de son inhibition par le phosphate. Bioch Biophys Acta, 243 : 335-43.
42. Pham Thi A.T., Vieira da Silva J.B. (1976). Action des déficits hydriques sur la photosynthèse et la respiration des feuilles du cotonnier. In : Les processus de la productivité végétale primaire. Moyse A. (ed.). Gauthiers-Villars : 183-202.
43. Labare K. (1991b). Etude sur la résistance protoplasmique du mil (*Pennisetum Americanum L.*) à la chaleur et à la dessiccation. Rapport CERAAS.
44. Akanvou L. (1991). Résistance protoplasmique du maïs à la dessiccation et à la chaleur. Rapport CERAAS.
45. Mbaye A., Marie F., Annerose D. (1991). Etude sur la résistance protoplasmique du manioc (*Manihot Esculenta Crantz*) à la chaleur et à la dessiccation. Rapport CERAAS.

14

Premiers acquis du CERAAS sur la génétique et la sélection de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées. Cas de l'étude des paramètres du système racinaire

J.-L. B. KHALFAOUI

*Centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse,
CERAAS, ISRA-CNRA*

Depuis une vingtaine d'années, la sécheresse constitue le principal facteur limitant la production agricole de vastes zones des tropiques tel que le Sahel ou le Nord-Est brésilien. Au total, 220 millions d'hectares de terres cultivables sont touchées [1].

Face à ce problème, l'amélioration génétique constitue une voie de lutte efficace dont les atouts sont encore mal utilisés, en particulier les progrès de la physiologie dans la compréhension des mécanismes adaptatifs et l'exploitation d'une importante variabilité génétique inter- et intra-espèce [2].

Actuellement, les limitations à l'utilisation en sélection des progrès de la physiologie se situent à quatre niveaux [3, 4] :

- des lacunes dans la caractérisation de la variabilité génétique des mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse chez la plupart des espèces ;
- un manque de connaissances sur l'hérédité des caractères adaptatifs ;

- une information insuffisante sur la nature des corrélations entre caractères adaptatifs et productivité en conditions de sécheresse;
- un faible nombre de méthodes de criblage mises au point pour sélectionner les caractères physiologiques.

Depuis sa création en 1989, les premiers travaux de génétique menés au CERAAS¹ ont essentiellement visé à compléter le premier point, c'est-à-dire à caractériser la variabilité génétique des caractères adaptatifs chez les variétés utilisées dans différents programmes de sélection africains.

Les premiers résultats obtenus sur la variabilité génétique des paramètres du développement racinaire, qui ont été particulièrement prospectés, feront l'objet de cette communication. Elle permettra dans le même temps d'illustrer certains des travaux réalisés pour mettre au point des méthodes de criblage adaptées à la sélection.

Matériels et méthodes

Jusqu'à présent au CERAAS, les deux principales méthodes de suivi des paramètres du développement racinaire sont basées sur l'utilisation de rhizotrons et l'injection d'herbicide dans le sol. Elles permettent la mise en place de dispositifs statistiques d'étude des effets géotypes et des effets d'interaction géotypes/régime hydriques et géotypes/conditions de sol.

D'autres techniques sont en cours de développement, telles que les cultures en hydroponie et en aéroponie.

Etudes en rhizotrons

Les rhizotrons sont des tubes de PVC de 100 cm de haut et 15 cm de diamètre comportant une surface plane transparente en plexiglas [5]. Ils sont installés en position inclinée selon un angle de 30° par rapport à la verticale. Par géotropisme, les racines suivent la surface transparente, ce qui permet de les observer et d'effectuer un suivi régulier de l'évolution de leur croissance. Les tubes sont remplis d'un sol tamisé, afin d'assurer une bonne homogénéité à l'ensemble du profil, correspondant à un sol de culture. L'alimentation hydrique est contrôlée, ce qui permet d'appliquer des régimes hydriques secs ou humides.

Plusieurs études ont été menées en rhizotrons sur des variétés de maïs [6-7], de mil [8], de sorgho [9], d'arachide et de niébé [10].

Etude *in situ* par injection d'herbicide dans le sol

Un herbicide (Métribuzine) est appliqué en présemis dans le sol à une profondeur de 50 cm et 60 cm grâce à des buses de pulvérisation montées à l'arrière et à la base d'une

1. Les travaux présentés sont financés par le programme CCE-STD2.

dent de sous-soleuse. L'application est faite par un passage au niveau des entre-lignes [11]. La vitesse d'enracinement est évaluée par la rapidité d'apparition après le semis des symptômes foliaires dus à l'herbicide, qui correspond à la rapidité avec laquelle les racines atteignent la zone traitée.

Cette technique a été utilisée pour comparer des variétés de niébé et d'arachide dans deux types de sol [12, 13]. Elle a également été adaptée au cas du maïs [14].

Résultats et discussions

Effets espèces

Une étude bibliographique montre que le nombre des études comparatives de variétés d'espèces différentes est limité. Or, celles-ci sont riches d'enseignements pour comprendre les avantages adaptatifs de certaines espèces et pour préciser les progrès à obtenir.

En effet, une comparaison des espèces indique l'existence d'une variabilité génétique interspèce. C'est ainsi qu'un essai en rhizotrons a été mené en conditions hydriques non limitantes et stressées, associant quatre variétés de mil et de sorgho. Dans le cadre de la variabilité étudiée, le mil présente (tableau I) un meilleur comportement vis-à-vis des différents paramètres racinaires.

Tableau I. Variabilité génétique de paramètres racinaires 44 jours après le semis chez quatre génotypes de mil et de sorgho en conditions sèches (S) et non limitantes (NS).

Espèces	Génotypes	LMR ⁽¹⁾		Dens. 0-20 ⁽²⁾		Dens.60-80 ⁽³⁾	
		S	NS	S	NS	S	NS
Mil	ICMVIS-85327	97,4	90,3	2,8	1,8	2,8	1,3
	IBV 8004	91,5	90,8	3,0	2,5	2,5	1,1
	<i>Moyennes</i>	<i>94,5</i>	<i>90,6</i>	<i>2,9</i>	<i>2,1</i>	<i>2,7</i>	<i>1,2</i>
Sorgho	612A x 75-17	88,5	57,7	3,3	1,3	1,8	0,3
	75-1	77,6	52,9	1,5	1,0	0,3	0,0
	<i>Moyennes</i>	<i>83,1</i>	<i>55,3</i>	<i>2,4</i>	<i>1,2</i>	<i>1,1</i>	<i>0,2</i>
Effets :							
<i>Génotypes</i>		<i>0,0001</i>		<i>0,01</i>		<i>0,0001</i>	
<i>Régimes hydriques</i>		<i>0,0001</i>		<i>0,001</i>		<i>0,001</i>	
<i>Géno X Rég</i>		<i>NS</i>		<i>NS</i>		<i>NS</i>	
<i>CV (%)</i>		<i>18,7</i>		<i>46,4</i>		<i>87,3</i>	

(1) Longueur maximale racinaire en centimètres.

(2) Densité racinaire entre 0 et 20 cm par note visuelle de 0 à 5.

(3) Densité racinaire entre 60 et 80 cm par note visuelle de 0 à 5.

Une comparaison de variétés de niébé et d'arachide *in situ* par injection d'herbicide montre (tableau II) que les deux espèces ont en moyenne des vitesses d'enracinement très voisines, bien que la meilleure variété de niébé (Bambey 21) soit nettement supérieure à celles d'arachide (73-33 ou 57-422 suivant le sol).

Tableau II. Variabilité génétique de la vitesse d'enracinement de génotypes de niébé et d'arachide évaluée par le pourcentage ⁽¹⁾ de pieds atteints par l'herbicide au 32^e jour après semis dans deux sols sableux (Dior) et argileux (Deck).

NIÉBÉ	Sol Dior	Sol Deck	ARACHIDE	SolDior	Sol Deck
Bambey 21	66,8 a	75,0 a	73-33	46,2 a	51,2 ab
IC86-275 N	48,5 b	47,0 b	59-127	42,5 ab	41,8 abc
B 89-504	40,0 b	34,8 b	TS-32-1	37,0 bc	49,7 abc
58-57	39,3 b	47,7 b	57-422	35,5 bcd	59,5 a
Gorom-G	31,0 b	34,7 b	47-16	29,7 cd	39,5 bc
TVX 32-36	29,3 b	30,8 b	79-40	26,2 d	35,7 bc
TN 8863	28,0 b	23,0 b	55-437	26,1 d	31,5 c
			68-111	26,1 d	42,3 bc
<i>Moyennes</i>	<i>40,4</i>	<i>41,9</i>		<i>37,1</i>	<i>43,9</i>
	<i>41,2</i>			<i>40,5</i>	
<i>Effet variétés</i>	<i>0,0001</i>			<i>0,0001</i>	
<i>Effet sols</i>	<i>NS</i>			<i>NS</i>	
<i>Effet variétés x sols</i>	<i>NS</i>			<i>0,05</i>	
<i>CV (%)</i>	<i>24,6</i>			<i>17,3</i>	

Les moyennes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes au test de Newman Keuls à $P > 0,05$.

(1) Les données en pourcentage sont transformées par Arc Sin $\sqrt{V\%/100} \times 100$ avant analyse.

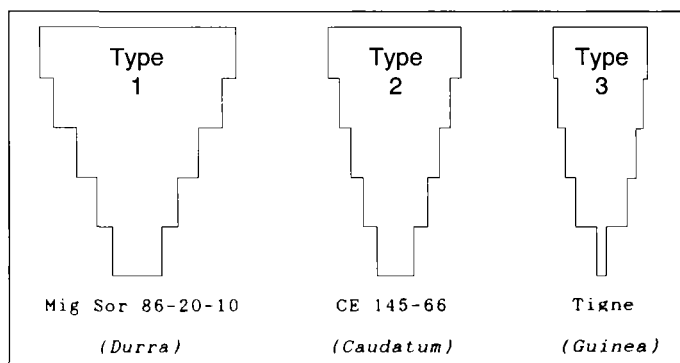
Effets variétés

Les espèces étudiées présentent une variabilité génétique intra-espèce importante pour de nombreux paramètres racinaires : longueur, vitesse, densité... Le tableau III montre des résultats obtenus en rhizotrons pour la longueur maximale racinaire à deux dates chez des variétés de mil [8], de sorgho [9] et de maïs.

L'étude des résultats obtenus pour les différents paramètres permet de fixer le choix des meilleures variétés et dans certains cas l'identification de types variétaux. C'est notamment le cas des variétés de sorgho présentées au tableau III. Trouche *et al.* montrent que l'étude des profils racinaires permet de distinguer trois groupes (figure 1) : les variétés à fort enracinement sur l'ensemble du profil, celles à enracinement moyen et celles à enracinement faible, en particulier en profondeur. Le premier groupe correspond aux variétés de la race botanique Durra et les deux autres réunissent les variétés des races

Tableau III. Variabilité génétique de la longueur maximale racinaire à deux dates de génotypes de Mil, de Sorgho et de maïs en conditions hydriques non limitantes.

Espèces	Génotypes	LMR 13° - 14° jr		LMR 25° - 27° jr	
MIL	ICMVIS-85327			64,2	a
	HKP			56,0	ab
	Souna 3			54,2	ab
	ICMVIS-86330			50,5	bc
	IBV 8004			45,3	bc
	Sauvage			40,8	c
Signification	$P >$			0,0001	
CV (%)					
SORGHO	Mig Sor 86-20-10	45,0	a	85,2	a
	Fellah	36,7	b	76,8	ab
	Mig Sor 86-30-3	37,0	b	74,9	abc
	CMS 219	34,0	b	73,2	abc
	CE 145-66	36,6	b	70,7	bc
	CE 196-7-2-1	34,6	b	70,6	bc
	Mig Sor 86-25-11	35,9	b	69,7	bc
	CE 145-66	36,6	b	68,0	bc
	Tigne	34,2	b	61,8	bc
	CE 90	30,4	b	60,4	cd
	Ngor Gatna	32,6	b	59,9	cd
	ICSV 1063 BF	28,9	b	51,8	d
Signification	$P >$		0,0001	0,0001	
CV (%)		11,0	9,5		
MAÏS	9450	19,2	a		
	9499	18,2	ab		
	5057	14,7	ab		
	9848	11,7	bc		
	9030	7,7	c		
Signification	$P >$		0,0001		
CV (%)			33,2		

Figure 1. Représentation des masses sèches racinaires par horizons pour 3 génotypes/types de sorgho.

botaniques Caudatum et Guinea. Chez une espèce, lorsqu'un tel rapprochement entre un comportement adaptatif et l'appartenance à une race botanique est mis en évidence, le choix des variétés et des géniteurs est simplifié.

Dans le cas où une variabilité génétique se manifeste, ces études permettent, nous l'avons vu, un choix de génotypes et de géniteurs. Elles permettent également la mise en place d'une sélection créatrice basée sur ces paramètres. Ce travail peut être illustré par le programme mené chez l'arachide, où une sélection récurrente sur test S_1 a débuté sur une population de base créée à partir d'un brassage génétique entre huit variétés [15]. Le tableau IV présente les résultats obtenus pour les caractères d'enracinement de la première série de 12 familles F_2 , lors du deuxième cycle de sélection récurrente. Elles sont testées par rapport à deux témoins d'adaptation et de sensibilité à la sécheresse. Les différences sont hautement ($P > 0,01$) et très hautement significatives ($P > 0,0001$) pour les différents paramètres. Afin de permettre le choix des meilleures familles, les résultats des paramètres racinaires sont regroupés dans un index de sélection qui fournit une note intégrant également le comportement des familles aux autres caractères adaptatifs que sont l'optimisation de la transpiration et la résistance protoplasmique. Les génotypes présentent des différences hautement significatives ($P > 0,01$) pour cet index, qui autorisent un choix de familles.

Tableau IV. Variabilité génétique de différents paramètres racinaires chez 12 familles F_2 d'une sélection récurrente sur arachide et 2 témoins.

Génotypes	LMR 14 ^e jour (cm)	LMR 28 ^e jour (cm)	Longueur moyenne racines secondaires (cm)	Densité ⁽¹⁾ racinaire	Index ⁽²⁾
57-422 ⁽³⁾	35,0 a	78,5 ab	1,8 ab	1,8 b	7,6 ab
SR-7	33,6 a	82,1 ab	1,9 ab	2,1 ab	8,4 ab
SR-12	32,4 a	86,3 a	1,6 ab	1,6 ab	4,2 abc
SR-2	32,1 a	76,2 ab	1,8 ab	2,0 ab	6,6 ab
SR-5	31,8 ab	79,6 ab	1,9 ab	1,5 ab	6,0 abc
SR-10	31,7 ab	79,8 ab	1,4 ab	1,4 ab	- 3,7 abc
SR-11	31,7 ab	74,4 ab	2,0 ab	2,0 ab	5,0 abc
SR-1	31,2 ab	80,1 ab	2,2 a	1,4 ab	- 0,4 abc
SR-3	30,1 ab	75,5 ab	1,3 ab	0,9 b	- 5,2 abc
SR-6	26,8 ab	68,5 abc	2,5 a	3,0 a	11,9 a
SR-9	24,3 ab	70,8 abc	2,1 ab	1,8 ab	- 1,3 abc
SR-4	24,0 ab	66,4 bc	1,4 ab	1,4 ab	- 9,2 abc
SR-8	20,1 bc	55,3 cd	0,7 b	0,5 b	-17,4 c
KH149A ⁽⁴⁾	14,1 c	42,3 d	1,8 ab	1,6 ab	-13,8
Signification	0,0001	0,0001	0,01	0,01	0,01

(1) Note visuelle de 0 à 5.

(2) Index de sélection intégrant les paramètres racinaires et ceux de transpiration et de résistance protoplasmique.

(3) Témoin d'adaptation à la sécheresse.

(4) Témoin de sensibilité à la sécheresse.

Dans certains cas, les études permettent de diagnostiquer un manque de variabilité génétique dans le matériel pressenti et ainsi de le corriger avant le début d'un programme de sélection. Togola [7] montre ainsi chez quatre écotypes de maïs un manque de variabilité génétique pour différents paramètres racinaires (tableau V).

Tableau V. Variabilité génétique de paramètres racinaires chez 4 écotypes de maïs en conditions hydriques non limitantes

Génotypes	27 ^e jour			41 ^e jour		
	LMR	Dens. 0-20	Dens. 20-40	LMR	Dens. 0-20	Dens. 20-40
Ikenne	30,6	4,1	1,8	39,0	4,0	2,3
Safita 2	32,4	3,9	2,1	41,8	4,1	2,3
Tiementie	27,2	4,0	1,3	33,8	4,1	1,9
Kogani B	27,0	4,1	1,3	36,7	4,1	2,1
<i>Signification</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
<i>CV (%)</i>	<i>21,3</i>	<i>15,3</i>	<i>40,6</i>	<i>25,2</i>	<i>18,8</i>	<i>51,2</i>

Effets d'interactions variétés/alimentation hydrique et variétés/types de sol

Les études racinaires montrent des cas d'interactions entre les variétés et les régimes hydriques. Batcho *et al.* [8] obtiennent, pour les variétés de mil présentées au tableau III, de nombreux cas d'interactions génotypes/régimes hydriques significatives, par exemple au 33^e jour pour la longueur maximale racinaire ($P > 0,001$) et les densités racinaires aux horizons intermédiaires entre 40 cm et 80 cm ($P > 0,001$). Selon le type de sécheresse subie, les variétés ne réagissent pas de la même façon. Batcho *et al.* [8] montrent, par exemple, que certaines variétés (ICMVIS-85-327 et IBV 8004) ont un développement racinaire qui est peu influencé par le régime hydrique, alors que des conditions de sécheresse provoquent chez d'autres (Souna 3 et HKP) un développement racinaire en profondeur. De telles interactions entre les génotypes et les régimes hydriques impliquent de choisir les variétés et les génotypes, et de conduire la sélection dans des conditions de sécheresse les plus proches de celles où elles seront vulgarisées.

En ce qui concerne l'influence du type de sol sur la croissance racinaire, l'étude comparative dans deux types de sol de variétés de niébé et d'arachide *in situ* par injection d'herbicide (tableau II) a montré une absence d'effet sol sur les vitesses d'enracinement des deux espèces. En revanche, un effet d'interaction variétés/sols significatif ($P > 0,05$) a été mis en évidence chez l'arachide alors qu'il ne se manifeste pas pour le niébé. Entre les deux sols, la hiérarchie des variétés d'arachide n'est pas la même. Là encore, l'existence d'une interaction entre les variétés et les types de sol pour l'arachide implique chez cette espèce de conduire la sélection dans les conditions de sol les plus proches. Cependant, une sélection menée sur le niébé dans un sol pourra être efficace dans d'autres sols. Ceci est confirmé par une hiérarchie variétale comparable pour des variétés de niébés étudiées au CERAAS et celle obtenue avec la même technique d'injection dans un sol californien de Riverside [16], notamment en ce qui concerne la variété Bambey 21.

Conclusion

Les études génétiques menées au CERAAS sur la croissance racinaire de certaines espèces ont permis de confirmer l'existence d'une variabilité inter-/ et intra-espèce importante et de préciser sa nature. Ceci constitue une étape préalable à la mise en place de programmes maîtrisés de sélection de l'adaptation à la sécheresse.

En deuxième lieu, ces études ont permis de mettre en évidence l'existence d'interactions entre les génotypes et les conditions édapho-climatiques qui ont été peu étudiées au niveau des caractères adaptatifs, bien qu'elles conditionnent directement la conduite des programmes de sélection et leur efficacité.

En troisième lieu, ces études ont été l'occasion de mettre au point ou d'adapter aux espèces étudiées différentes techniques de criblage des paramètres racinaires.

A l'avenir, l'important travail réalisé sur la variabilité génétique de la croissance racinaire devra être approfondi chez les espèces étudiées et étendu aux autres espèces. Un travail similaire devra être réalisé sur les autres caractères adaptatifs.

Enfin, il est clair que la mise en place de programmes de sélection performants implique que les autres thèmes génétiques, hérédités et corrélations génétiques, soient abordés par le CERAAS, cela impliquant un investissement en recherches supérieur à celui qui a pu être réalisé durant ses trois premières années d'activité.

Références

1. F.A.O. (1986) Production year book. Food and Agric. Org. of the United Nations, Rome, Italie.
2. Khalfaoui J.-L. (1985). Conduite de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse en fonction de ses mécanismes physiologiques. In : Actes "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical", septembre 1984, Dakar. Oléagineux 40 : 329-34.
3. Khalfaoui J.-L. (1990). Genetic of adaptation to drought of cultivated species and consequences on plant breeding. Bull Soc bot Fr, 137, Actual bot, 1 : 125-137.
4. Khalfaoui J.-L. (1991a). Génétique et sélection de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées. In : Actes "Physiologie, génétique et sélection pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées". Novembre 1990, Bambe, ISRA/CNRA.
5. Annerose D.J. (1990). Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse de doctorat en sciences naturelles. Université Paris VII : 282 p.
6. Hema D (1991). Etude des caractères physiologiques de quelques génotypes de maïs. Doc. CERAAS/INERA.
7. Togola D (à paraître). Rapport de mission. Doc. CERAAS/IPR.
8. Batcho E., Daouda O.S., Do F., Annerose D.J., Khalfaoui J.-L., Fofana A., Laffray D., Louguet P. (1990). Etude de la croissance racinaire de six cultivars de mil. Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride, 2 : 51-65.
9. Trouche G., Bretaudeau A., Evain D. (à paraître). Etude de la croissance racinaire de 12 génotypes de sorgho en rhizotron. In : Actes "Physiologie, génotype et sélection pour

- l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées". Novembre 1990. Bambey, ISRA/CNRA.
10. Nwalozie M. (1990) Adaptation of cowpeas to drought : physiological aspects. Doc. CERAAS/IMO State University, Nigeria.
 11. Robertson B.M., Hall A.E., Foster K.W. (1985). A field technique for screening for genotypic differences in root growth. *Crop Sci*, 25 : 1084-90.
 12. Cissé N., Khalfaoui J.-L. (à paraître). Etude de la variabilité génétique de la croissance racinaire de variétés de niébé et d'arachide étudiée dans deux types de sol. Doc. CERAAS/ISRA.
 13. Khalfaoui J.-L., Havard M (1992). Screening peanut cultivars in the field for root growth : a test by herbicide injection in the soil. *Field Crop Research* (sous presse).
 14. Havard M., Khalfaoui J.-L., Gay J.-P. (à paraître). Description d'une technique de traitement herbicide localisé en profondeur dans le sol pour l'étude de la croissance racinaire sur arachide, niébé et maïs. Doc. CERAAS/INERA.
 15. Khalfaoui J-L (1991b). Approche de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse. Cas de l'arachide au Sénégal. In : Actes II^{es} journées scientifiques du réseau biotechnologies végétales : "L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides". Décembre 1990, Tunis, Ed. AUPELF-UREF, Actualité Scientifique, John Libbey Eurotext, Paris : 51-63.
 16. Hall AF, Patel PN (1985). Breeding for resistance to drought and heat. In : Cowpea research, production and utilization, S.R. Singh and K.O. Rachie (eds.) John Wiley and Sons Ltd : 137-51.

15

Identification and characterization of Winter cereal cultivars tolerant to the stress conditions of the Mediterranean climate

B. BORGHI

*Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura, Via Mulino, 3, 20079 S. Angelo Lodigiano,
Milan, Italy*

In a recent and interesting publication of CIMMYT and ICARDA, Morris *et al.* [1] indicate that in rainfed marginal environments of West Asia and North Africa, about 15 million ha are located in zones receiving less than 500 mm annual rainfall. Moreover an additional 12 million ha are planted with barley in lower rainfall zones. Reading this paper may lead to the conclusion that marginal environments are confined to the African and Asian countries bordering the Mediterranean sea. On the contrary drought and heat stress are a recurrent phenomenon throughout the Mediterranean basin and thus also in Southern European countries such as Italy, Spain, France, Yugoslavia, Greece.

In recent years we have become aware of the fact that the yield potential of modern Italian cultivars largely depends on their better adaptation to drought and heat stress conditions. This hypothesis was confirmed when we established a network of variety trials throughout the Italian peninsula, from the fertile zones of the Po Valley, where annual rainfall is around 800 mm, to the semi-arid zones in Apulia and Sicily with less than 300 mm of rain. In spite of the remarkable differences in climatic conditions, the best cultivars bred in the Po valley performed equally well all over Italy, including the extreme South (figure 1). The results of the durum trials likewise indicate that a variety bred in Rome gives positive results in all environmental conditions (figure 2) and similar conclusions have been reached with regard to barley [2].

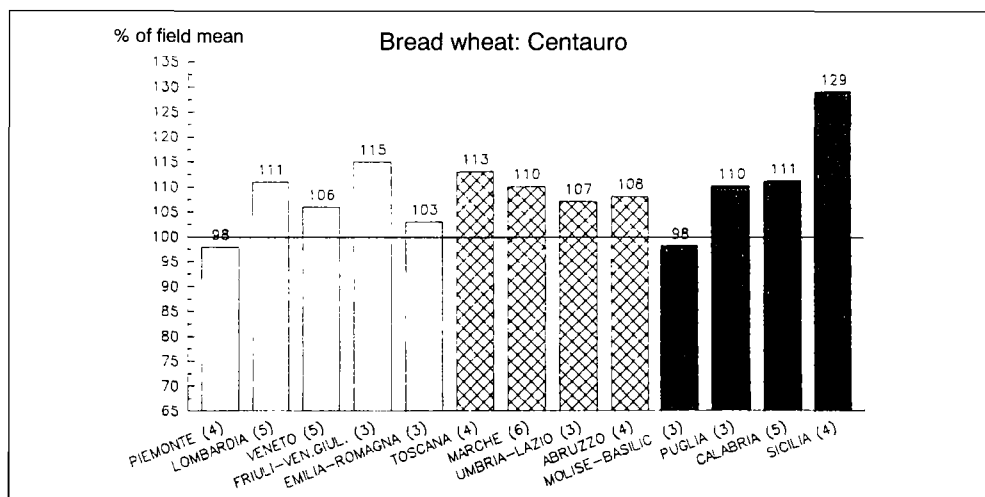


Figure 1. Grain yield of the variety Centauro cultivated in 1987 in different regions of Italy. The regions are listed from North to South. In brackets the number of locations in each region.

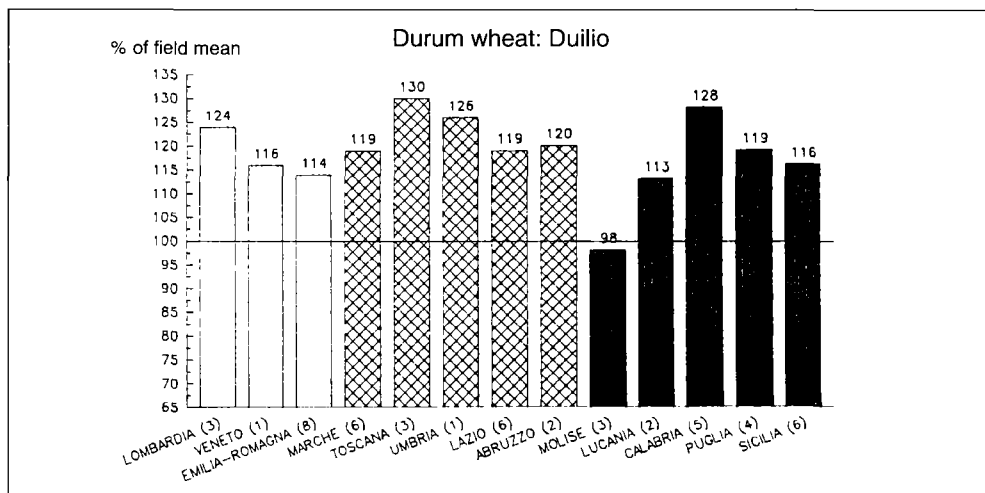


Figure 2. Grain yield of the variety Duilio cultivated in 1987 in different regions of Italy. The regions are listed from North to South. In brackets the number of locations in each region.

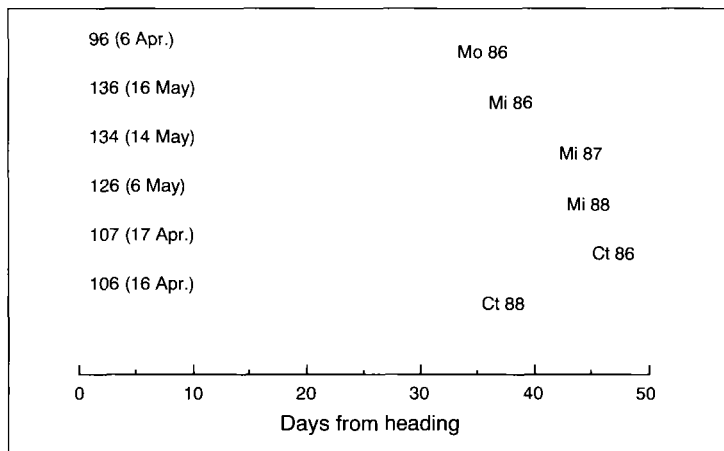
The evaluation of yield under stress is rendered difficult, however, by the extensive genotype X environment interactions. This calls for a larger number of trials repeated in time and space than in more fertile areas [3-6]. A complementary approach is to calculate susceptibility indices based on the comparison of yield performance in the presence and absence of events causing stress, as suggested by Fischer and Maurer [7]. We have therefore calculated susceptibility indices for the varieties of bread wheat, durum wheat

and barley included in the national trials. This experimental approach has made it possible to characterize the cultivars in relation to the stress conditions typical of the Mediterranean climate and to find genotypic differences sufficiently stable over the years [8].

Physiological studies have shown that the traditional Italian varieties appear to be “programmed” for a fast filling of the grain : in less than 4 weeks after flowering they reach the maximum seed weight [9-11]. The plant model of Italian varieties, essentially based on stress avoidance, thus appears to be of potential interest with regard to zones where terminal heat and drought stress are yield limiting factors.

We have no direct evidence that these varieties can perform equally well in the African conditions. However, in the context of a joint program with INRA Morocco, supported by the European Economic Community (EEC), we have tested about 200 cultivars in three locations situated between 45 and 32 degrees of latitude in the Northern hemisphere : S. Angelo Lodigiano in the Po Valley near Milan (MI), Catania in Sicily (CT) and Settati in the Marrakech region of Morocco (MO). Heading time of the cultivars fluctuated greatly in different years and locations: the average interval between the two furthest-apart locations (MI/MO) was of about 50 days for the fall sowing. At CT heading time occurred 24 days before MI. In this location the spring sowing headed, on average, 18 days later than the fall sowing. Differences between locations in heading time affected the duration of GFP, the length of which, however, did not differ much between locations (figure 3). Also the temperatures in which grain filling took place in locations so far apart were quite similar (figure 4). Correlation studies on sets of data of different locations revealed significant correlations between the different environments for several traits. In particular heading time showed a close association between the two spatially nearest locations. Culm weight, a trait affected by plant height, was found highly correlated between locations. Kernel weight turned out to be closely associated in both years in the two furthest-apart locations. Our results clearly show that an important source of genetically improved material potentially suitable for the semi-arid zones of North Africa can derive from the numerous breeding programmes started more than half a century ago in the South European countries [12].

Figure 3. Duration of grain filling period and heading time in different locations and years.



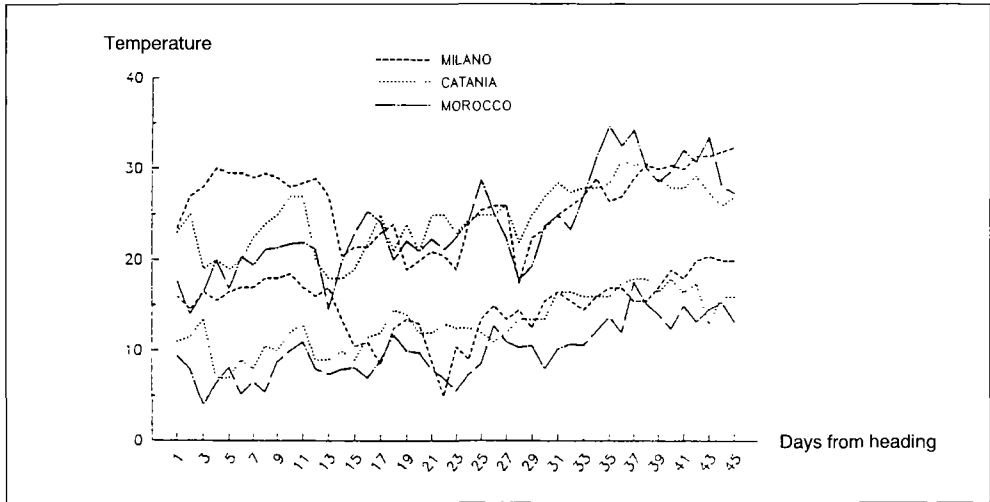


Figure 4. Maximum and minimum daily temperatures during grain filling in three locations in 1986.

The history of the genetic improvement of bread wheat in Italy is a classic example of the different steps to be followed in order to improve yield potential in a given area and will be briefly described. At the beginning of this century several factors, genetic and agronomical, were responsible for the poor yields of Italian wheats. The cultivated varieties, very old local populations, were tall, late and highly susceptible to lodging and rust attacks. After the pioneer work of Strampelli, probably the author of the first “green revolution”, in the thirties new semi-dwarf varieties became available, which were also early enough to escape the late rust attacks. The government policy of self-sufficiency in wheat supplies, led geneticists and agronomists to study different aspects of wheat cultivation and, between 1929-1933, there was an exceptional increase in the average national yield (21% more than the average yield of the previous 5 years period).

The comparison of varieties selected in different periods throws an interesting light on the evolution of the morphological, physiological, agronomic and qualitative characteristics of the wheat cultivars. This approach is of particular interest in the case of a country like Italy where an intense breeding activity started as early as the beginning of this century. The varieties bred in Italy have been classified in 7 groups. The first includes local populations and the varieties selected from them. The second group includes the first varieties obtained by crossing Italian germplasm with foreign varieties such as Akagomughi (Japan), Wilhelmina Tarwe (Holland), Massy and Hatif Inversable (France), Prince Albert (United Kingdom). Each of the other groups was set up with varieties whose parents belonged to the previous group.

A selected set of varieties from different groups was grown in the Po valley for three years in replicated plot trials according to two husbandry conditions: “OLD”, similar to those of the first part of the century (sowing with 300 kernels/m² in 6 rows drilled 20 cm apart, 30 kg of N in 2 top dressings, no herbicide) and “MODERN” (sowing with

500 kernels/m² in 8 rows drilled 15 cm apart, 150 kg of N in 3 top dressings, chemical control of weeds and foliar diseases). Lodging was prevented with nets.

Observing the results summarized in table I, it can be seen that the first step was to obtain early ripening varieties in order to avoid the late rust attacks which, together with the anticipated closure of the life cycle caused by high temperatures and depletion of the water available in the soil (a complex phenomenon called “stretta” in Italy, “echaudage” in France, “hay-curing” in the United States), were responsible of severe yield losses. Harvest index increased from 0.34 in the old landraces up to 0.43 in the most recent varieties; concomitantly plant height decreased from 117 cm to 80 cm. Grain yield of the modern varieties, compared with the old, was only 14% higher in the low-input field (“OLD”) but more than 50% higher where the modern agrotechniques were applied. This is a clear indication that genetic improvement alone cannot lead to a great increase of yield potential without a parallel improvement of the growing conditions.

Table I. Agronomic characteristics of groups of varieties bred in Italy since 1990 (see text for more explanations).

Varietal Group	n of var.	Plant height (cm)	H.I. (%)	Heading (days from 1–4)	Grain Yield				
					“OLD” (t/ha)	“MODERN” (t/ha)	% Var. OLD vs MOD	% Var. OLD	% Var. vs group 0 MOD
0	5	111	34	42	3.14	4.51	+44	–	–
2	3	117	37	37	3.05	4.57	+50	– 3	+ 1
3	8	108	38	36	3.53	5.16	+46	+12	+14
4	4	94	39	37	3.25	5.51	+70	+ 4	+22
5	9	89	42	37	3.48	6.01	+73	+11	+33
6	5	80	43	36	3.58	6.63	+85	+14	+47
Mean		98.5	39.2	37.2	3.39	5.49			
DMS (p = .05)		3.2	5.1	0.6	0.49	0.54			

References

1. Morris M.L., Belaid A., Byerlee D. (1991). Wheat and barley production in rainfed marginal environments of the developing world. Part 1 of 1990-1991 CIMMYT World wheat facts and trends: Wheat and Barley production in rainfed marginal environments of the developing world. Mexico, D.F.: CIMMYT.
2. Borghi B. (1989). Breeding for heat and drought stress in small grain cereals. In: U. Leone, G. Rialdi, R. Vanore (eds). Advanced Technologies for Increased Agricultural Production. CNR-USG, Genova, 157-66.
3. Simmonds N.W. (1984). A note on the strategy of breeding clonal crops. Heredity, 53: 397-401.
4. Parlevliet J.E. (1987). Strategies for breeding for tolerance to abiotic stress factors that occur heterogeneous in time and space such as drought. In: L. Monti and E. Porceddu (eds). Drought resistance in plants, Physiological and genetic aspects. CEC Publ. EUR 10700 EN, 277-85.

5. Smith E.L. (1987). A review of plant-breeding strategies for rainfed areas. In: J.P.Srivastava, E. Porceddu, E. Acevedo and S. Varma (eds). Drought tolerance in Winter cereals. John Wiley and Sons Ltd, 79-87.
6. Srivastava J.P. (1987). Barley and wheat improvement for moisture-limiting areas in West Asia and North Africa. In J.P. Srivastava, E. Porceddu, E. Acevedo, S.Varma (eds). Drought tolerance in Winter cereals. J. Wiley and Sons, 65-78.
7. Fischer R.A., Maurer R. (1978). Drought resistance in Spring wheat cultivars. I. Grain yield response. Aust. J. Agric. Res., 29: 897.
8. Gavuzzi P., Delogu G., Boggini G., Wittmer G., Borghi B. (1992). The use of drought tolerance indices to evaluate cultivars of bread wheat, durum wheat and barley for adaptation to the stress conditions of the Mediterranean environments (submitted).
9. Borghi B., M. Monotti, M. Guiducci, F. Pierotti, G. Boggini, M. Corbellini (1982). Environmental and genetical effects on plant growth, grain filling and productivity in bread wheat. In: Limites de potentialité de production du blé dans différents systèmes de culture et dans différentes zones méditerranéennes. CEE-AGRIMED. Séminaire, Bari 30-9/2-10-1981.
10. Borghi B., M. Corbellini, G. Boggini, Pogna N.E. (1983). Kinetics of dry matter accumulation and composition changes in developing bread wheat kernel. Pflanzenbau 152: 224-37.
11. Monotti M., B. Borghi, M. Guiducci, G. Boggini, Gambelli M.L. (1982). Effects of irrigation and other agronomic practices on wheat grain yield. In: Limites de potentialité de production du blé dans différents systèmes de culture et dans différentes zones méditerranéennes. CEE-AGRIMED. Séminaire, Bari 30-9/2-10-1981.
12. Borghi B., Corbellini M., Gavuzzi P. (1991). The use of laboratory and field screening tests for identification of bread wheat cultivars tolerant to heat and drought stress. In: Acevedo E., Conesa A.P., Monneveux P., Srivastava J.P. (eds). Physiology-Breeding of Winter cereals for stressed Mediterranean environments. INRA Publ., 435-48.

16

Effects of water stress on pearl millet

G. MARACCHI¹, M. MARTINI¹, L. BACCI¹, M. BOULAMA²,
M. DAUDA², G. POPOV³

*1. Institute of Environmental Analysis and Remote Sensing for Agriculture
(IATA-CNR), Florence, Italy*

2. Direction de la météorologie nationale du Niger, Niamey, Niger

3. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy

Introduction

Soil water deficit limits the yield of crops in many regions of the world. In crop species the problem concerns not simply with the ability of the crop to survive periods of water shortage but also to produce a harvestable yield (this contrasts with the definition of drought resistance in ecological terms, viz. the ability of a plant to stay alive during periods of low water supply).

It is well documented that crops have different sensitivity to water deficits at different growth stage, as measured by grain yield losses [1]. In rainfed crops, drought can occur at any time during crop growth and the crop susceptibility to drought stress is a continuously variable function rather than a discrete function [2].

Pearl millet (*Pennisetum americanum* [L.] Leeke) is known to grow in the droughty areas of the world where there is low annual rainfall amount and its distribution is highly variable from year to year. In semi-arid tropics of Africa and Asia, rainfed farming of pearl millet constitutes the main pattern of land use and about 95 % of the world's millet is grown in these regions [3]. These areas are generally characterized by short rainy seasons, high mean temperatures, high potential evapotranspiration rate and sandy soils. Periods of water deficits in such environment vary in timing, duration and intensity. In pearl millet drought stress occurring early in crop growth has little effect on grain yield [4] and the susceptibility to stress increases at and after flowering [5].

Millet crop is adaptive to both variable and low amounts of rainfall; however, the specific mechanisms of its drought resistance are not yet clearly known. There is evidence that millet possesses some physiological adaptation mechanisms that permit it to resist drought stress [3].

Field experiments on water stress carried out in semi-arid zones, characterized by a rainy season, are affected by many difficulties: during the rainy season the timing and the duration of water stress period are unforeseeable and uncontrollable; staggered plantings, in order to obtain water stress period corresponding to different phases of the growing cycle, are subjected to strong insect damages; crops grown during the dry season, with artificial water supply, are subjected to higher air temperature, higher evapotranspiration demand and different photoperiod length.

The subject of this paper is to study water deficit effects both in vegetative phase and in post-flowering on growth and yield of millet plants grown in a controlled environment.

Materials and methods

The experiments were conducted during the period between February and June in 1990 and in 1991 at the Institute of Environmental Analysis and Remote Sensing for Agriculture, Florence (Italy).

Pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke) seeds of cv. 3/4 H.K., obtained from the INRAN center in Niger, were sown in a 50-l prewatered pots of fine sandy soil at about 3 cm depth in a glasshouse. During planting, 10 to 15 seeds were put on each pot and 20 Days After Sowing (DAS), plants were thinned to four per pot. Subsequent weekly harvests were made until one plant per pot in 1990's experiment and two plants per pot in 1991's experiment were achieved.

Temperature of the glasshouse was uniformly high during growth and the temperature was 34 °C during the day and 24 °C during the night. Photoperiod throughout the growing period was 12 h/12 h day/night.

Plant fertilizer was added to irrigation water at regular intervals before the stress period.

Experiment 1990

A group of 60 plants was stressed by withholding water beginning from 55 Days After Emergence (DAE). Stress was imposed at the end of flowering and the time to flowering was recorded when stigmas were fully emerged on the main shoots of 50 % of the plants. At 72 DAE, stress was released for some plants to study plant's recovery ability from drought condition. Control plants were grown under well-watered condition normally irrigated to Field Capacity (FC).

Beginning from the seedling stage of plants up to flowering (i.e. last day of irrigation), weekly measurements were made on 30 plants including culm height, total leaf area, dry weight of stems, leaves and roots. Leaves on the main stem and tillers of the two groups of plants were counted on each measurement day.

After 3, 7 and 14 days from the last irrigation, morphological measurements were made on five plants of each treatment and they included height, dry biomass weight of each plant component (i.e. stem, leaves, panicles and roots) and leaf number and leaf area of plants. Leaf area was measured using a leaf area meter LICOR mod. 3000. Harvested plant parts were oven dried at 80 °C for 48 h to determine their dry weights.

Yield of plants was determined by counting the number of grains on the panicles and by taking the weights of 1000 seeds.

Experiment 1991

The experiment included four treatments of 40 plants each; one of them was grown under well-watered conditions (control treatment) while the other groups were subjected to different durations of water deficit: 7, 14, 21 days respectively (7-day stress, 14-day stress, 21-day stress treatments). Water withholding was applied during vegetative phase at 49 DAE. At the end of each stress period the plants were rewatered and maintained at field capacity until the harvest.

Weekly morphometric measurements were taken throughout the season. They included: height, green leaf number and leaf length.

At the end of the growing season the plants were harvested and oven dried at 80 °C for 48 h to determine dry weights of stems, leaves and panicles.

Yield of plants was determined by counting the number of grains on the panicles and by taking the weights of 1 000 seeds.

Numerical data were elaborated by ANOVA method.

Results

Experiment 1990

Seedling emergence occurred 3 DAS and at 32 DAE tillering began. Mainstems flowered at 53 DAE while no tillers reached reproductive phase.

When stress was imposed on plants at flowering stage (55 DAE), most of the plants had achieved the maximum culm height (85 cm) and the maximum number of leaves (8-9 leaves on the mainstem).

Plant growth was not affected by stress when measurements were made three days after the plants have been subjected to water stress.

As shown in figure 1 leaf area of the control plants increased linearly with time between 58 and 72 DAE, that is in a stage of growth marked by the appearance and expansion of successive leaves, both on mainstem and on tillers, and by corresponding growth of the root system. On the contrary, stressed plants suffered greatly from a rapid leaf senescence as moisture stress developed and after 17 days of stress the average leaf area was about 19 % of the control plant leaf area. Most of the tillers were dry.

The timing of stress initiation had a great effect on the yield to biomass ratio and on the distribution of dry matter in the various plant parts. Plant total dry weight increased with time even when plants were under stress, mainly as a result of a rapid development of the panicles early in the growth period (table I). However, at 72 DAE the total dry matter of the control plants was found to be twice that of the stressed plants.

After 10 days of stress (65 DAE), panicle dry weight was significantly different between the two treatments. Stressed plants tended to have a greater rate of dry matter accumulation in the panicles (compare 1 g/plant x day with 0.6 g/plant x day) earlier in the growing

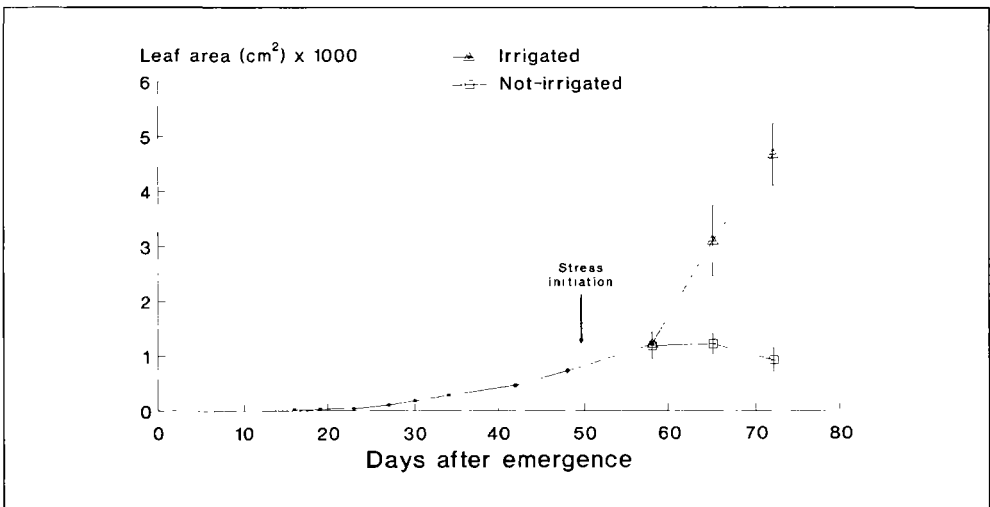


Figure 1. Experiment 1990: seasonal distribution of leaf area for both treatments.

period than the control plants. No significant difference was found in total dry biomass weight in all the measurement days except at the 72 DAE (17 days of stress). The panicle to total biomass ratio after 17 days of stress was found to be 0.23 and 0.54 for the control and the stressed plants respectively but there was no significant difference between the panicle weights.

Table I. Treatment means ($n = 5$) for total dry matter and panicle weight in control and stressed plants during the stress period.

	Control plants		Stressed plants	
	Total biomass weight (g/pt)	Panicle weight (g/pt)	Total biomass weight (g/pt)	Panicle weight (g/pt)
58 DAE	17.1 a	2.7 a	16.1 a	3.7 a
s.e.	2.5	0.6	5.0	0.6
c.v.	0.14	0.22	0.31	0.16
65 DAE	29.7 a	7.4 a	21.3 a	10.8 b**
s.e.	4.5	0.5	1.4	0.5
c.v.	0.15	0.06	0.06	0.04
72 DAE	58.0 a	13.6 a	27.4 b*	14.9 a
s.e.	8.2	3.2	3.2	1.1
c.v.	0.14	0.23	0.11	0.07

Means not followed by the same letter differ at $P < 0.05$ (*) and $P < 0.01$ (**) level.

Grain number per panicle was not affected by water stress in this experiment as it was expected to be (table II) and results show that grain weight measurements of 1000 seeds for both the control and stressed plants were not different.

Table II. Treatment means ($n = 10$) for yield components.

Treatments	Number of grains per panicle	Grain weight (g/1000 seeds)
Control plants	2131 a	5.4 a
s.e.	314	0.6
c.v.	0.14	0.11
Stress plants	1920 a	6.4 a
s.e.	330	0.4
c.v.	0.17	0.06

Means not followed by the same letter differ at $P < 0.05$ (*) and $P < 0.01$ (**) level.

Root development of stressed plants was affected by water stress and the effect was highly pronounced after 10 days of water deficit but significant difference ($P < 0.05$) was found only after 17 days of water stress. When stress was released, roots of recovered plants began to grow very extensively (table III) and new basal tillers were emitted (data not shown).

Table III. Treatment means (n = 5) for root dry matter weights of control, stress and recovered plants.

	Control plants	Stress plants	Recovered plants
58 DAE	9.21 a	10.2 a	–
s.e.	0.52	2.6	
c.v.	0.05	0.25	
65 DAE	55.41 a	13.4 a	–
s.e.	17.2	3.5	
c.v.	0.31	0.41	
72 DAE	44.89 a	13.6 b*	–
s.e.	11.6	4.9	
c.v.	0.26	0.36	
79 DAE	–	11.5 a	53.7 b*
s.e.		0.8	14.2
c.v.		0.7	0.26

Means not followed by the same letter differ at $P < 0.05$ (*) and $P < 0.01$ (**) level.

Experiment 1991

Seedling emergence occurred at 4 DAS.

The presence of two plants per pot prevented the tiller emission because, as other authors [6] have already found, the root development of millet plants in pot is repressed and unable to support tillering.

Water stress was applied during vegetative phase.

Plants flowered later in stressed treatments than in control plants: 1 week later in 7-day stress and 14-day stress treatments and 2 weeks later in 21-day stress treatment.

7-day stress did not affect the plant height and the emission of new leaves.

The plants subjected to a 14-day stress showed a reduction of the height in comparison with control plants only after a week from the end of the stress and for 14 days. Then their height reached control plant height. At the end of the first week of stress the plants had emitted one leaf and at the end of the second week of stress they had lost two green leaves. After rewatering new leaves were emitted.

The last stressed group (21 days of stress) showed a height significantly different in comparison with control plants starting from the third week of stress. They recovered completely after 3 weeks from rewatering. At the end of stress plants had lost 2-3 green leaves but after rewatering they emitted 3-4 new leaves. Anyway the stress caused the death of seven plants.

Figure 2 shows the height trend during all the growing season. The number of green leaves is illustrated in table IV.

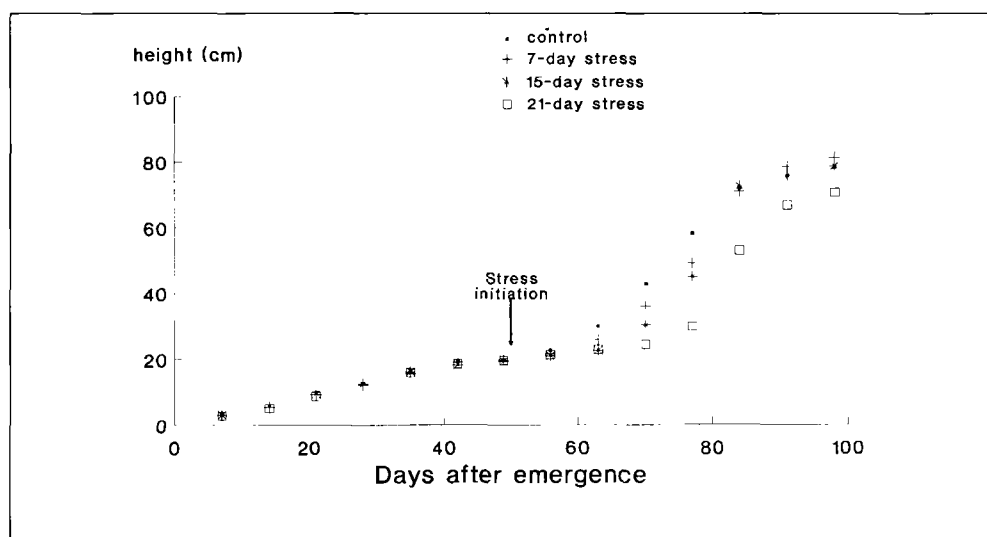


Figure 2. Experiment 1991: seasonal distribution of plant height for all treatments.

Table IV. Number of green leaves per plant (n = 40) during stress and recovering periods (s.i. = stress initiation; s.t. = stress termination).

DAE	Treatments				Dead Plants
	Control	7-day stress	14-day stress	21-day stress	
49	10-11	7-8 (s.i.)	7-8 (s.i.)	7-8 (s.i.)	0
56	9-10	8-10 (s.t.)	8-9	6-8	0
63	9-10	8-9	6-7 (s.t.)	6-7	0
70	9-10	8-9	8-9	5-7 (s.t.)	7
77	9-10	8-9	9-10	9-10	0

Table V shows the final dry matter weight separated in the different parts of plant. Significant differences were only found for the 21-day stress treatment.

Yield components are shown in table VI. Losses of grain yield in the shortest periods of stress (7 days and 14 days of stress) were not significant, but increased and became significant as the length of the stress period increased (21-days of stress). The grain number per panicle and grain weight showed a linear decreasing as the duration of water stress increases.

The variability within the groups increased strongly in 21-days stress treatment.

Relative grain yields during stress declined approximately linearly with the increasing duration of the stress period (figure 3A) because of the change both in relative number of grains and in relative grain size (figures 3A and 3B).

Table V. Treatment means (n = 40 for the first three treatments and n = 33 for the last one) for dry matter distribution.

Treatment	Dry matter (g/pt)			
	Stem	Leaf	Panicle	Total
Control	9.6 a	6.7 a	11.5 a	27.9 a
s.e.	0.7	0.3	0.6	1.3
c.v.	0.07	0.04	0.05	0.04
7-day stress	9.2 a	6.7 a	10.4 a	26.4 a
s.e.	0.7	0.3	0.6	1.3
c.v.	0.07	0.04	0.05	0.05
14-day stress	8.3 a	6.0 a	10.5 a	24.9 ab
s.e.	0.5	0.2	0.5	1.0
c.v.	0.06	0.03	0.04	0.04
21-day stress	7.6 b*	6.4 a	8.4 b*	22.4 b*
s.e.	0.5	0.4	0.6	1.2
c.v.	0.11	0.09	0.11	0.09

Means not followed by the same letter differ at $P < 0.05$ (*) and $P < 0.01$ (**) level.

Table VI. Treatment means (n = 40 for the first three treatments and n = 33 for the last one) for grain yield, yield components and harvest index.

Treatment	Grains per panicle	Grain weight (g × 1000)	Yield (g per panicle)	Harvest index
Control	1804.3 a	5.8 a	10.1 a	0.37 a
s.e.	108.7	0.1	0.6	0.01
c.v.	0.06	0.01	0.06	0.02
7-day stress	1801.4 a	5.4 a	9.2 ab	0.34 a
s.e.	112.6	0.2	0.5	0.01
c.v.	0.06	0.04	0.05	0.03
14-day stress	1668.1 a	5.6 a	9.1 ab	0.36 a
s.e.	85.1	0.2	0.4	0.01
c.v.	0.05	0.03	0.04	0.02
21-day stress	1530.9 a	5.2 a	7.6 b*	0.28 b*
s.e.	145.3	0.4	0.7	0.02
c.v.	0.13	0.09	0.14	0.07

Means not followed by the same letter differ at $P < 0.05$ (*) and $P < 0.01$ (**) level.

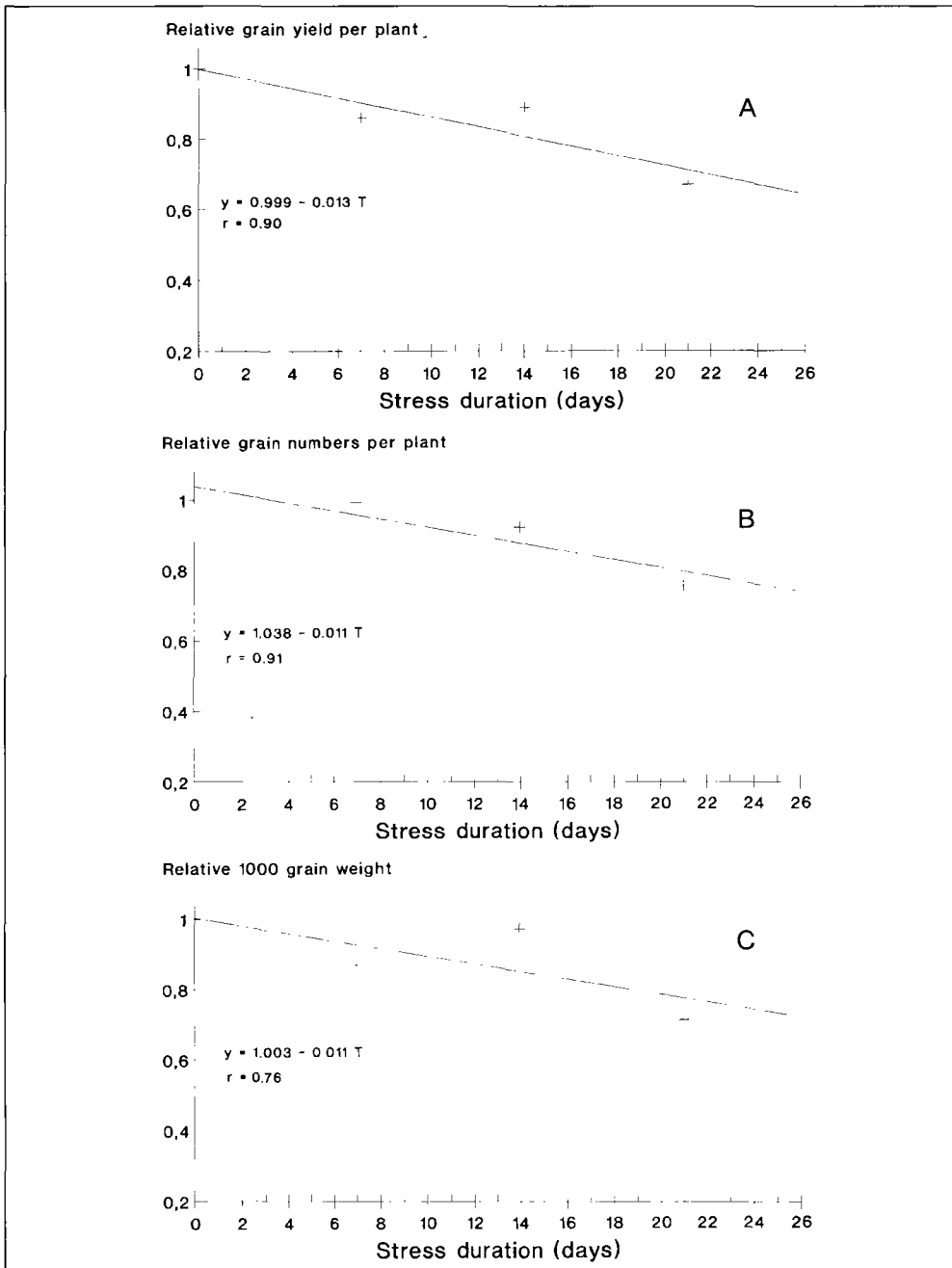


Figure 3. Relative (stress/control) grain yield (A) and yield components (B, C) as a function of duration of stress.

Discussion and conclusions

The damaging effect of water stress on millet plant growth is well documented [2, 6]. Previous reports on the effects of water stress at different growth stages in pearl millet have identified flowering and grain filling stages as the most sensitive periods to water stress because asynchronous tillering habit in pearl millet is a disadvantage rather than an advantage during terminal stress. In fact these tillers do not complete grain-filling stage but they use a share of the water available with a very little contribution to grain yield. Asynchronous tiller is a great advantage when mid-season water stress occur [4, 5]. These considerations are valid when field experiments are carried out while plants grown in pots can not face a water stress with the same mechanisms because of productive tillering absence.

The 1990's experiment showed an earlier filling of panicles of stressed treatment. After 10 days of stress the panicle dry matter weight of stressed plants was significantly higher than in control plants (table I).

An important aspect of developmental plasticity is the ability of plants to transfer assimilate accumulated prior to the flowering to the grain during the grain-filling period as illustrated from Gallagher *et al.* [7]. They suggest that when water supply is adequate only a small proportion of the grain dry weight comes from the store of prior assimilate in the stems and roots, but when water stress occurs in the grain-filling stage an increased proportion of the prior assimilate is transferred to the seed. This behaviour explains the lack of differences in grain yield between stressed and control treatments (table II).

In the 1991's experiment characterized by mid-season water stresses, main shoots of stressed plants were able to recover emitting new leaves (table IV) and to provide a yield similar to the control plants when stress duration was not longer than 15 days (table VI). With a longer water deficit the 17 % of plants died and the yield of surviving plants was reduced of 25 % (table VI). The dead plants were more developed than the others and so they suffered water stress earlier. The high variability, always present in this cultivar, increased the capacity of recover in the 21-day stress treatment after rewetting; in fact those plants were able to emit new leaves even if their dry matter was smaller than that of the other treatments (table V).

The linear decrease of relative grain yield and of yield components (figure 3) was already found by Mahalakshmi *et al.* [2] in field conditions.

The results of these experiments confirm that the yield reductions recorded in field experiment, when a water stress occurs in post-flowering phase, are ascribable to unproductive tiller emission, while, when a water stress occurs in vegetative phase, tiller emission represents the possibility to avoid water effects on final yield.

References

1. Salter P.J., Good J.E. (1967). Crop responses to water at different stages of growth. Farnham Royal Commonw. Agri. Bul.
2. Mahalakshmi V., Bidinger F.R., Raju D.S. (1987). Effect of timing of water deficit on pearl millet (*Pennisetum americanum*). Field Crop Res., 15: 327-39.
3. Kanemasu E.T., Singh P., Chaudhuri U.N. (1984). Water-use and water-use efficiency of pearl millet and sorghum. In: S.M. Virmani and M.V.K. Sivakumar (eds). Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. Proceedings of the International Symposium, 15-20 Nov 1982, ICRISAT Center India, 175-82.
4. Lahiri A.N., Kharabanda B.C. (1965). Studies on plant-water relations: effects of moisture deficits at various developmental stages of bulrush millet. Proceedings of National Institute of Science, India, part B., 31: 14-23.
5. Mahalakshmi V., Bidinger F.R., Rao G.D.P. (1988). Timing and intensity of water deficit during flowering and grain filling in pearl millet. Agr.J., 80: 130-35.
6. Seetharama N., Mahalakshmi V., Bidinger F.R., Singh S. (1984). Response of sorghum and pearl millet to drought stress in semi-arid India. In: S.M. Virmani, M.V.K. Sivakumar (eds). Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. Proceedings of the International Symposium, 15-20 Nov 1982, ICRISAT Center India, 159-74.
7. Gallagher J.N., Biscoc P.V., Hunter B. (1976). Effects of drought on grain growth. Nature, 264: 541-42.

SESSION IV

Facteurs agronomiques de l'alimentation hydrique du système de culture

Animateur : M. Moussa Dossolo Oussa
Rapporteur : J.J. Owonubi (IRA, Nigeria)

17

Maize production in Zimbabwe. Coping with drought stress in the marginal agroecological zones

N.M. MANYOWA

African Centre for Fertilizer Development, P.O. Box A469, Avondale, Harare, Zimbabwe

Maize is the major staple food crop of many countries of Sub-Saharan Africa. However, its more widespread cultivation is currently hampered by environmental and human constraints such as drought, pests and diseases, soil infertility, inadequate investment in agricultural development services, etc., and the ever-increasing population counters any progress in food production. As a result many countries are currently facing severe food shortages [1].

Based on the database compiled by CIMMYT [2] and Diallo *et al* [3] on maize production constraints in Sub-Saharan Africa, drought is by far the major limiting constraint. Diallo *et al* [3] further point out that almost all ecologies in which maize is grown in Sub-Saharan Africa are characterised by unpredictable dry periods of 1-3 weeks duration, whose effects on the crop are exacerbated by the relatively small amount of crop-available water commonly found in many African soils. According to Manyowa and Muchena [1], a large proportion of the arable land in Sub-Saharan Africa has marginal rainfall, and even in areas where rainfall is generally considered adequate, the rainfall pattern varies from year to year and droughts are often experienced. While supplementary irrigation increases yields in all areas of marginal rainfall, more often this cannot be done because of the high cost of irrigation, limited water supply and the relatively low income of

most African farmers. Thus the majority of African farmers will no doubt continue to depend solely on natural rain for many years to come.

This paper addresses ways in which researchers, policy makers, extension workers, farmers, etc. in Sub-Saharan Africa could alleviate or minimize drought stress effects on maize productivity in the region. The paper is based on Zimbabwe's experience in coping with drought in the marginal agroecological zones.

The drought environment in Zimbabwe. Rainfall pattern and distribution

In general the rainy season in the cropping areas of Zimbabwe extends over the period October to April. The cropping area can be divided into five agroecological zones primarily based on the rainy pentad analysis [4]. Figure 1 and table 1 respectively show the rainfall pattern and distribution, composition of rainfall amounts and crop requirements in the five agroecological regions in an average and low rainfall season. From both figure 1 and table 1 it is apparent that water deficit is a serious constraint to crop production in the agroecological zones III, IV and V. Both the amount and distribution of rainfall vary greatly from season to season and from one part of the country to another. In addition a large proportion of the soils in regions III, IV and V are coarse-grained sands derived from granite, generally deficient in N, P and S, and have a low organic matter content [5-7]. Consequently the soils have a poor physical structure and water-holding capacity.

Table I. Composition of rainfall amounts and crop requirements in the five agroecological regions in an average and low rainfall season [8].

Agro-ecological region	Crop water Requirement mm	Average year		1982-1983	
		Rainfall mm	Water balance	Rainfall mm	Water balance
I	700	1 000	+ 300	800	+ 100
IIa	700	850	+ 150	562	- 138
IIb	700	850	+ 150	428	- 272
III	700	725	+ 25	350	- 350
IV	700	550	- 150	433	- 267
V	700	450	- 250	217	- 482

Figure 2 further illustrates the rainfall pattern in (i) zones I and II, good rainfall areas (depicted by Karoi, a station in zone II) and (ii) zones III, IV and V (depicted by Kadoma, a station in zone III). Comparing the reliability of rainfall for Karoi and Kadoma, it is clear that cropping conditions at Kadoma are poorer and more erratic. The mid-season "drought" at Kadoma (mid- to late January) is common throughout zones III, IV and V. The break in

rainfall is serious in that it often coincides with the more critical phases of flowering and early grain filling of most crops. The period lasts anyway from one to three weeks depending on the season. In the absence of irrigation, the farmer has to consider genetic and cultural practices to reduce the damaging impact of droughts. It is however important to note that the total rainfall for the crop season may be adequate, but it is the reduction in the number of days with rain, particularly around the critical flowering period, that may have a marked effect on grain yield.

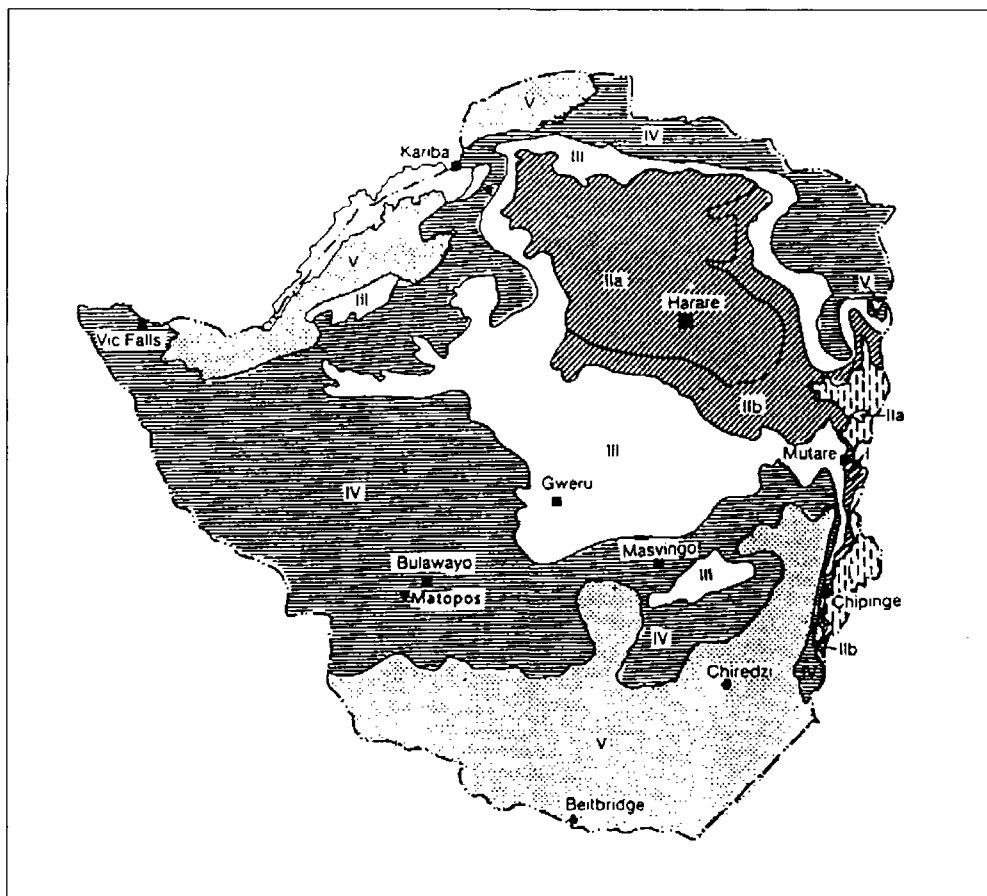


Figure 1. Zimbabwe - Agroecological zones I, II, III, IV and V.

More recently, the occasional drought during the start of the rainy season has become more of a recurring phenomenon, with a number of farmers in most regions loosing on early planted crops. Whether this apparent change in the seasonal rainfall pattern is due to the highly publicised, world-wide green-house effect is at present mere speculation.

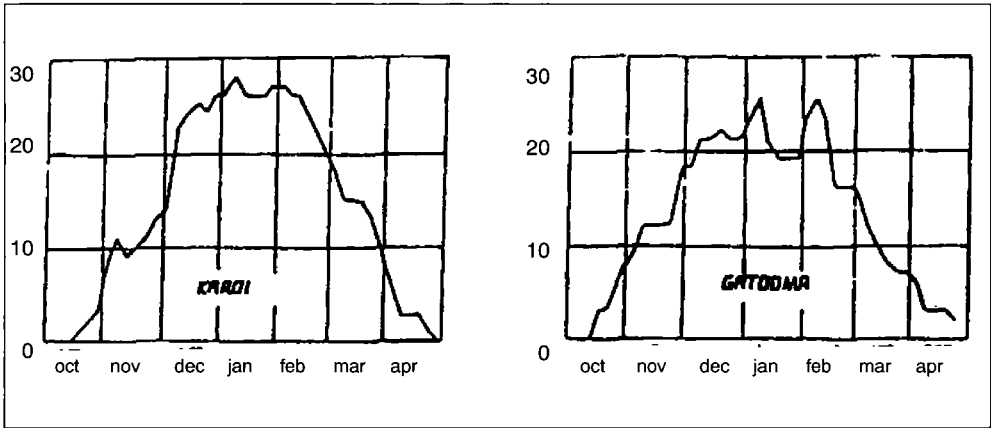


Figure 2. Frequency of rainy pentades for 30 years (1932-1962) of two stations: Karoi (Zone II) and Kadoma (Gatooma) (Zone III) [9].

Drought effects on maize

Estimates reveal that drought may account for an average loss of 15% of production in tropical areas, even where total rainfall is reasonably high. Further, the probability of yield loss due to drought influences the use and utilization of fertilizer and other inputs [10]. Drought, therefore, is probably responsible for a much higher economic loss than indicated. In Zimbabwe drought stress limits maize production on about 77 % of the arable land (regions III, IV and V). Even in regions I and II it is also possible for crops to be planted late or to suffer mid-season droughts. There is often a substantial difference between irrigated and non-irrigated crops indicating that drought still impinges on yield even in the best rainfall areas of the country.

This is clearly illustrated in tables 2 and 3. A comparison of site maize yield means in table 2 shows a marked difference in yields between Harare (Region II) and Kadoma (Region III), Makoholi and Matopos (Region IV). According to Mariga [11], in most on-station trials survival irrigations are often needed at Region IV stations such as Makoholi and Matopos to save the crops from the prolonged mid-season droughts (table 2). Table 3 confirms the low yield potential of zone IV. Only short-season varieties of limited yield potential such as R201 and R200 can be grown to attain reasonable yields, whereas the higher yielding but long-season varieties like SR52 have to be restricted to areas of higher potential. Yields of SR52 and R215 decline markedly under moisture stress conditions, while the short season varieties R201 and R200 yield consistently. It is apparent that insufficient and unevenly distributed rain is the major limiting factor in crop production in the semi-arid areas of Zimbabwe. The high risk of crop failure in these dry areas results in farmers' reluctance to inject high levels of inputs, thus always keeping crop yield potential low.

Table II. Grain yield (t/ha) - Intermediate II district maize variety trials [11].

	Site	II Harare		III Kadoma		IV Matopos		V Makoholi	
	Season	1979/80	1980/81	1979/80	1980/81	1979/80	1980/81	1979/80	1980/81
Variety	SR52	12.03	11.74	3.98	9.52	7.09	5.80	5.67	7.67
	R215	9.98	10.62	4.88	8.63	6.83	6.91	6.13	6.70
	R201	10.46	11.21	5.09	9.23	6.90	7.25	7.17	6.44
	Mean	10.79	11.19	4.65	9.13	6.94	6.65	6.32	6.74

Table III. Performance of maize varieties at three sites in agroecological zone III over three seasons (yield in t/ha) [11].

	Site Planting date	1980/81 ¹	1981/82 ²	1982/83 ²
		Ndanga	Lupane	Lupane
		23.11.80	10.12.81	09.12.82
Variety	SR52	2.1	1.6	0.4
	R215	2.3	1.2	1.5
	R200	2.7	3.0	2.6
	R201	2.8	2.7	2.6
	ZS225	-	1.6	1.7

1. 1980/81: good rainfall.

2. 1981/82 and 1982/83: drought years.

Although maize is relatively drought resistant in the early stages of growth, studies by Wilson and Allison [12] indicate that mild drought stress during the early stages of ear development (before flowering) decreases the rate of growth of stem, leaf, root and ear, increases leaf senescence and retards silk growth. Good soil moisture conditions are most essential from tasselling onwards to ensure good pollination and grain filling. Extreme moisture stress at pollination can lead to poor fertilization if pollen is shed before silks emerge [13]. According to Robins and Domingo [14] drought stress lasting one to two days during tasselling or pollination may cause as much as 22 % reduction in yield, while stress during the grain filling stages [15] and vegetative stages [16] have much less effect on yield. A number of workers [17] have however reported maize yield reductions of more than 50 % following drought stress imposed during the flowering stage. Wilson and Allison [12] demonstrated that mild drought stress during grain filling had little effect on final grain yield, although it did result in a decrease in total dry matter production. On the other hand, the grain capacity of plants which were moisture stressed before flowering was too small to accommodate all the available dry matter produced after flowering, with the surplus stored elsewhere, mainly in the stems.

Alleviation of drought stress effects on maize in the marginal rainfall agroecological zones III, IV and V

Over 80 % of Zimbabwe's population live in the rural areas (sometimes referred to as communal areas), of which 91 % are in agroecological zones III, IV and V. Vincent and Thomas's [18] evaluation of the agricultural potential of the five agroecological zones revealed that cropping should only be carried out in zones I and II, with livestock becoming increasingly important in zones III, IV and V. According to Mataruka [7] intensive dry-land maize production (without any supplementary irrigation) is generally considered too risky in zones III, IV and V. Despite, the majority of the communal farmers still insist on growing maize under these adverse conditions. Research results summarised by Mataruka and Whingwiri [19] partially explain why ; a comparison of the agronomic performance of maize, sorghum, pearl millet and finger millet in this harsh environment, surprisingly revealed that maize outyields the other crops except only when moisture stress occurs during the flowering period of maize. In addition maize is the staple food crop for the majority of Zimbabweans, and according to Hikwa et al [20] its production accounts for 70 % of the country's total hectareage under cereals.

It is apparent that rather than discourage maize production in zones III, IV and V, any cropping improvements under these marginal environments should come about through the formulation, evaluation and demonstration of practical research strategies that aim at alleviating drought stress effects on the growth of maize. In Zimbabwe, both genetic and cultural practices have so far proved invaluable in tackling the drought situation prevalent in the agroecological zones III, IV and V.

Genetic strategies

Manyowa and Muchena [1] recently summarised breeding and selection criteria for drought tolerance in maize. The following discussion however only concentrates on practical genetic strategies currently employed in Zimbabwe to alleviate drought stress problems on maize production in the marginal agroecological zones III, IV and V.

From the above discussion it is clear that the most effective means of reducing the effects of drought on maize would be to escape periods of low moisture availability through the manipulation of genotype maturity. As pointed out by Manyowa and Muchena [1] earliness of maturity results in an escape of drought, and interestingly, one of the advances made toward increased maize productivity in moisture stress environments has been made through increased earliness in crop maturity. The shortness of the rainy season in the marginal rainfall areas necessitates the use of early maturing varieties such as R200 and R201, and medium maturing R215 [7]. Maize breeders are continually looking for better varieties with improved drought resistance, earliness and yield.

A large proportion of maize production in zones III, IV and V is affected by the mid-season break in rainfall (see figure 2), and as pointed out earlier, this coincides with the critical stage of flowering. The effect of drought stress during this period is to increase the interval between anthesis and silking, and hence reduced, or in extreme cases, no

pollination takes place. According to Olver [21] the most important single selection criteria for drought tolerance under such drought conditions is the ability of a variety to silk early relative to pollen shading. Selection for this trait can be accomplished under favourable rainfall conditions. Variable hybrids like double crosses and three-way hybrids have been found to have a long pollination period compared to single cross hybrids.

By screening maize genotypes under abnormally high plant populations, plant breeders in the USA managed to breed for high yield stability over varying environments, a method successfully adapted for maize drought tolerance breeding conditions in Zimbabwe. Plant density tolerant genotypes have also been found to have a shorter interval between anthesis and silking [22,23].

In Zimbabwe, breeding for drought tolerance has also been tackled indirectly; all the maize breeding work is done under adequate rainfall conditions. High yielding materials are then tested extensively in the marginal rainfall areas (agroecological zones III, IV and V). Lines that show the most drought tolerance are continually recycled for even better performance [21].

Cultural strategies

As indicated earlier, some drought conditions are due to an abnormally short season length whilst others are characterised by a normal length rainy season, however with a mid-season drought. Wilson and Williams [9] point out that since the effect of drought during flowering is largely to delay silk emergence and so upset the synchronisation of tassel and silk for effective pollination, it is advantageous in conditions where a mid-season drought is expected to include about 5 % of a late maturity variety in the early maturing crop to ensure adequate pollen supply during the critical stage. Rather than just grow one variety, stability of production could best be achieved by growing a range of varieties with differing maturity ranges.

Common-sense tillage practises have also been demonstrated to be highly effective in maximizing water-use efficiency under marginal environments. Meikle [2] listed some of the soil environmental requirements that have to be met to permit the use of rainfall to its full potential:

- High infiltration rates to enable the greatest possible quantity of rainfall to infiltrate into the soil;
- High soil-moisture storage capacity to carry crops through dry spells;
- Soil conditions which encourage root development sufficiently to utilize store moisture to the fullest possible degree.

According to Meikle [24] all cultivated soils in Zimbabwe are prone to the formation of a surface crust when subjected to the high-intensity storms which occur. Since surface crusts have a relatively low permeability, this means that once a crust has formed, a large proportion of the rainfall is unable to infiltrate into the soil and is therefore lost as runoff. Runoff on a soil very prone to crusting can amount to 50 % of a year's total rainfall. High infiltration rates can be maintained by protecting the soil from beating rain drops either by means of a mulch or by increasing the resistance of soil particles to break-down when subjected to the impact of rain drops.

The use of kraal manure on the coarse-grained sands in zones III, IV and V, besides supplying additional nutrients, also improves the water-holding capacity of the soils. Deep ploughing and tie-ridging have also been shown to improve yields [19] through water conservation (reduced runoff) and better penetration, processes which both promote better root growth.

Early planting of maize in anticipation of a short season will increase yield potential by increasing effective season length and in some cases reducing the probability of the crop flowering during the mid-season drought. Cultural practices that favour early planting are those that result in carry-over of soil moisture from the previous rainy season. Moisture carry-over is possible if previous crop residues are ploughed under while soil conditions are still moist, and the land remains fallow and free from weeds during the Winter.

Although more applicable to cropping systems with supplemental irrigation, water planting systems have proved highly successful in Zimbabwe, with reported yield increases of 25 % to 30 %. In Zimbabwe, experience has shown that maize can be safely planted a month in advance of the rains using as little as two pints of water per planting station on early ploughed sand soils [9]. The yield advantage is more evident in late maturing varieties like SR52, where due to the early planting, flowering occurs in early January and a very significant part of the grain filling phase now coincides with the well watered time of the year. In water planting, seed is soaked overnight before planting in order to start the germinating process quickly from the already imbibed state. The seed is dropped into the planting hole and two pints of water added. After the planting water has soaked away, the seed is covered by 2 or 3 inches of dry soil which act as a sealing mulch trapping the water underneath.

As pointed out earlier, considerable evidence is available from many cases of water planting over the whole of Zimbabwe confirming substantial yield advantage accruing from it.

Conclusion

Drought is the single major limitation to maize production in Zimbabwe. Total biological immunity to the effects of drought is not a practical possibility. However the above discussion has indicated that under certain drought conditions, it is possible to either genetically manipulate the crop or to culturally modify the cropping environment to minimize drought stress effects on maize productivity.

References

1. Manyowa N.M., Muchena S.C. (1991). Breeding criteria for a "green approach" to increased maize productivity in Sub-Saharan Africa. Submitted to Field Crops Research.
2. CIMMYT (1988). Maize production regions in the developing countries. CIMMYT, El Batan. Mexico.
3. Diallo A.O., Edmeades G.O., Johnson E.C. (1989). Breeding strategies to overcome constraints and increase maize productivity in Sub-Saharan Africa. In: "Gebredikan B. (ed). Maize

- Improvement, Production and Protection in Eastern and Southern Africa. Proc. 3rd Eastern and Southern Africa Regional Maize Workshop. Nairobi-Kitale, Kenya, Sept. 18-22.
4. Ivy P. (1983). Agricultural zoning in Zimbabwe and observations which form the basis for the zoning. In: Boyle P.J. (ed.). Agronomic adjustment to the Environment of the 400-600 mm rainfall zone of Southern Africa. Proc. of a SADCC Workshop held in Harare, Zimbabwe, Sept. 1983.
 5. Grant P.M. (1981). The fertilization of sandy soils in peasant agriculture. *Zimbabwe Agric. J.*: 78 (5): 169-175.
 6. Mashiringwani N.A. (1983). The present nutrient status of the soils in the communal farming areas of Zimbabwe. *Zimbabwe Agric. J.* 80 (2): 73-5.
 7. Mataruka D.F. (1985). Review of the constraints to maize production in the communal areas in Natural Regions III, IV and V. *Zimbabwe Agric. J.* 82 (5): 171-5.
 8. Muchena S.C. (1985). Agronomic adjustments for areas of marginal rainfall in Zimbabwe. Proc. of a Seminar on An International Research Network on Drought Resistance. Ouagadougou, Burkina Faso. CTA/CIRAD, Sept. 23-26, 1985.
 9. Wilson J.H., Williams J.H. (1971). Crop ecology. In: Maize Production in Phase with its environment. A Rhodesian Farmer report on the symposia held in 1971 by the Rhodesia Grain Producers' Association: 9-14.
 10. Fisher K.S., Johnson E.C., Edmeades G.O. (1983). Breeding and selection for drought resistance in tropical maize. CIMMYT, El Batan, Mexico.
 11. Mariga I.K. (1983). Crop production potential of the marginal rainfall areas of Zimbabwe and related research efforts. In: Boyle P.J. (ed.). Agronomic adjustment to the environment of the 400-600 mm rainfall zone of Southern Africa. Proc. SADCC (SACCAR) Workshop held in Harare, Zimbabwe, Sept. 1983.
 12. Wilson J.H., Allison J.C. (1978). Effects of water stress on the growth of maize (*Zea mays* L.). *Zimbabwe J. Agric. Res.* 16: 175-91.
 13. Robertson W.R. (1971). Rainfall and maize production. In: Maize Production in Phase with its Environment. A Rhodesian Farmer report on the symposia held in 1971 by the Rhodesia Grain Producers' Association: 4-8.
 14. Robins J.S., Domingo L.E. (1953). Some effects on severe soil moisture deficits at specific stages in corn. *Agron. J.* 45: 618-21.
 15. McPherson H.G., Boyer J.S. (1977). Regulation of grain yield by photosynthesis in maize subjected to a water deficiency. *Agron. J.* 69: 714-8.
 16. Denmead O.T., Shaw R.H. (1960). The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agron. J.* 52: 272-4.
 17. Edmeades G.O., Bolanos J., Lafitte H.R. (1990). Selecting for drought tolerance in maize adapted to the lowland tropics. Paper presented at the 4th Meeting of the Asian Regional Maize Program. Islamabad, Pakistan. Sept. 23-27.
 18. Vincent V., Thomas R.G. (1961). An agricultural survey of Southern Rhodesia. Part 1: Agro-ecological Survey. Govt. Printer. Harare (Salisbury), Zimbabwe.
 19. Mataruka D.F., Whingwiri E.E. (1987). Maize production in communal areas of Zimbabwe and the research options for improving productivity. In: Towards Self Sufficiency. A Proc. 2nd Eastern, Central and Southern Africa Regional Maize Workshop. Harare, Zimbabwe, March 15-21, 1987.
 20. Hikwa D.F., Mataruka D.F., Natarajan M. (1985). Response of maize to nitrogen and phosphorus application on small-scale farms in Zimbabwe. In: Gebrekidan B. (eds). Maize

- Improvement, Production and Protection in Eastern and Southern Africa. Proc. 3rd Eastern and Southern Africa Regional Maize Workshop. Nairobi-Kitale, Kenya. Sept. 18-22, 1989.
21. Olver R.C. (1987). Zimbabwe maize breeding program. In: Towards Self Sufficiency. A Proc. 2nd Eastern, Central and Southern Africa Regional Maize Workshop. Harare, Zimbabwe, March 15-21, 1987.
 22. Mock J.J., Buren L.L. (1972). Classification of maize (*Zea mays* L.) inbreds for population tolerance by general combining ability. Iowa State J. Sci. 46: 395-404.
 23. Beren L.L., Mock J.J., Anderson I.C. (1974). Morphological and physiological traits in maize associated with tolerance to high plant density. Crop Science 44, 426-9.
 24. Meikle G. (1971). Effective utilization of rainfall by common-sense tillage practices. In: Maize Production in Phase with its Environment. A Rhodesian Farmer report on the symposia held in 1971 by the Rhodesia Grain Producer's Association: 15 and 28.

18

Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique

F. AFFHOLDER

CIRAD-CA, BP 5035, Montpellier, France

La grande variabilité interannuelle et spatiale des rendements des cultures est une des caractéristiques majeures de l'agriculture pluviale d'Afrique de l'Ouest.

Identifier et hiérarchiser les causes de cette variabilité est essentiel, à la fois pour se donner les moyens d'estimer la production agricole dans un contexte où les techniques de sondages à travers de vastes territoires se révèlent inefficaces, et pour déterminer les approches permettant de stabiliser la production au niveau le plus élevé possible.

L'étude présentée ici se veut une contribution à l'explication de la variabilité du rendement de la principale céréale pluviale du Sénégal, le mil. Elle associe l'étude agronomique de situations culturales observées dans six villages du bassin arachidier sénégalais à l'analyse de la consommation hydrique, ceci par l'utilisation d'un modèle de simulation du bilan hydrique.

La principale limite du modèle utilisé vient de son inaptitude à rendre compte des interactions, encore très mal connues, entre certaines pratiques agricoles et l'alimentation hydrique elle-même. Ce point est discuté à partir du cas particulier de l'influence d'apports de matière organique sur l'alimentation hydrique de la culture, mesurée *in situ*.

Matériel et méthodes

Le bassin arachidier du Sénégal et les villages de l'enquête agronomique

Cette région, principale zone de production du mil au Sénégal, est marquée fortement par l'influence d'un gradient pédoclimatique Nord-Sud.

On se reportera, pour les conditions du milieu physique, à la figure 1. Les sols sont surtout de type ferrugineux tropicaux, peu lessivés au Nord à lessivés au Sud. Leur teneur en éléments fins (argile + limons fins), inférieure à 10 % au Nord, atteint 20 à 25 % au sud

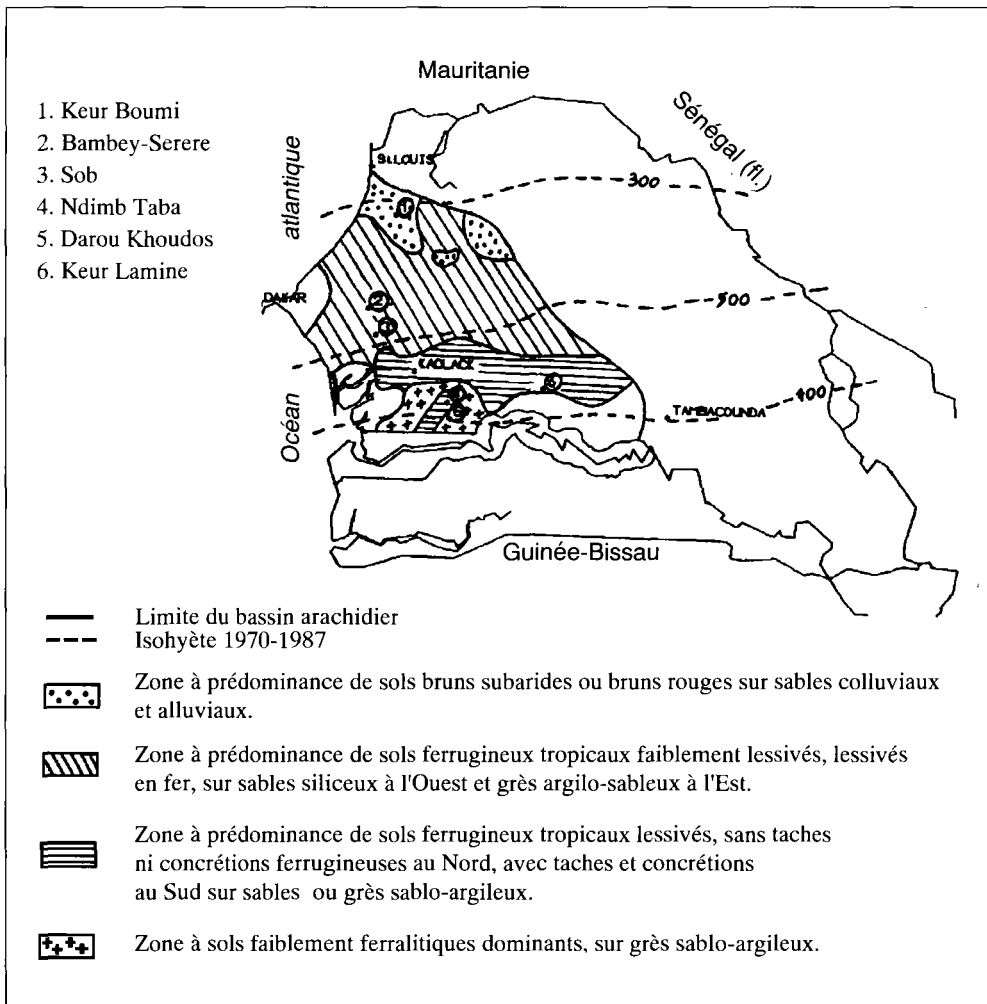


Figure 1. Le bassin arachidier du Sénégal. Pluviométrie. Sols. Villages de l'enquête agronomique.

du bassin. Les pluviométries moyennes annuelles diminuent régulièrement du Sud au Nord, de 300 à 700 mm (moyennes 1970-1987).

Les pratiques agricoles présentent certains traits d'homogénéité remarquables, avec toutefois quelques nuances entre le Nord et le Sud de l'isohyète 540 mm passant à Kaolack.

La rotation biennale mil-arachide, en culture pure, domine très largement, mais une relative diversification apparaît au Sud (coton, maïs, manioc). La jachère est exceptionnelle. Le mil Souma de 90 jours, très peu photopériodique, a pratiquement partout remplacé les mils Sanio de 120 jours devenus inadaptés du fait de la sécheresse.

La préparation du sol se limite en général à un nettoyage des parcelles, parfois complété par un grattage au Sud. Les semis sont réalisés le plus souvent mécaniquement et en humide sur la première pluie utile dans la moitié sud du bassin, et effectués en sec à la main, mais de plus en plus souvent mécaniquement dans la moitié nord. Les sarclo-binages sont réalisés en traction équine ou asine, et au Sud parfois bovine.

Les ressources en matière organique d'origine animale sont limitées du fait de la saturation de l'espace agraire et de la disparition des zones de parcours, ce dernier phénomène étant particulièrement accentué au Centre (pays Serer). Le recours aux engrais et produits phytosanitaires est exceptionnel depuis l'abandon de la politique de subvention aux intrants agricoles.

Les finages sont dans toute la région organisés en terroirs concentriques : champs de case à proximité immédiate du village, bénéficiant d'apports fréquents de matière organique et portant en général du mil en culture continue (Pombod Serer et Tol Keur Wolof), et champs de brousse, portant la rotation arachide-mil.

Lorsqu'une réserve foncière existe encore aux confins du territoire villageois, on trouve à sa lisière quelques parcelles récemment défrichées (Tol Gor).

A ce schéma plan, il faut ajouter, surtout dans la moitié sud du bassin, l'influence du relief : la position d'un champ dans la toposéquence détermine d'éventuels reports d'eau par ruissellement ainsi que la nature du sol et donc sa réserve utile.

Pour cette étude, afin de faciliter l'échantillonnage des parcelles, on s'est efforcé de choisir, parmi les sites susceptibles de représenter les différents milieux de la région, des villages ayant fait l'objet d'études en agronomie des systèmes agraires.

L'échantillon de parcelles agricoles et l'enquête agronomique

L'échelle d'analyse que nous avons retenue est celle de la parcelle culturale, qui est définie comme la partie d'une parcelle foncière sur laquelle l'agriculteur applique un même ensemble de choix et de techniques [1].

L'échantillon de départ comprenait 130 de ces parcelles réparties dans les différents sites et dispersées à l'intérieur de chaque site dans les différents terroirs identifiés lors des études système précédentes.

Le passé cultural et en particulier les apports fertilisants antérieurs ainsi que l'ensemble des interventions des agriculteurs au cours de la campagne ont été suivis.

Les nombreuses observations concernant la fertilisation et les sarclages ont par la suite été résumées à l'aide d'indices synthétiques, "ifum" et "isarcl". "Ifum" est basé sur la fréquence des apports de matière organique sur trois ans (1988 à 1990) et sur le type

d'apport de fumure minérale ou organique pour l'année en cours ; il augmente avec la fréquence des apports et diminue avec leur ancienneté. L'indice "isarcl", quant à lui, diminue quand la précocité et le nombre des sarclages augmentent par rapport à la moyenne du village. La présence d'au moins un sarclage manuel immédiatement après un sarclage mécanique a également été considérée comme un critère de qualité.

$$\text{ifum} = \text{fmine} + \text{forga } 90 + 1/2 (\text{forga } 89) + 1/3 (\text{forga } 88)$$

où :

– fmine = 1 si apport de fumure minérale en 1990,
= 0 dans le cas contraire ;

– forga(n) = présence (1) ou absence (0) d'apport de fumure organique d'origine animale l'année n. Pour l'année de l'étude, 1990, on a donné un point en plus dans le cas de fumure par parage de troupeau sur la parcelle : forga 90 = 2.

$$\begin{aligned} \text{isarcl} = & \text{nombre de sarclages réalisés tardivement} \\ & + \text{nombre de sarclages manquants} \\ & + \text{itype} \end{aligned}$$

avec :

itype = 0 si l'un des sarclages mécaniques au moins est suivi par un sarclage manuel,
= 1 dans le cas contraire.

Le rendement et ses composantes ont été mesurés à l'aide de trois placettes de 25 m² dans chaque parcelle.

Enfin, les parcelles ayant subi des dégâts ou présentant une donnée manquante ont été exclues de l'analyse. On a également éliminé les situations où des ressemis partiels imbriqués sur la parcelle rendaient impossible la simulation du bilan hydrique. Il en résulte en définitive un échantillon de 109 situations culturales.

Bilan hydrique simulé et indice hydrique synthétique

Le modèle utilisé est celui mis au point par Forest en 1980 à la suite des travaux de Franquin et Forest [2], dans sa version "DHC" (diagnostic hydrique de campagne) permettant de réaliser de nombreuses simulations en série.

Ce modèle est de type déterministe fonctionnel ; il a été vérifié qu'il restitue assez fidèlement les termes moyens du bilan hydrique d'une situation à partir des valeurs moyennes pour cette situation des paramètres d'entrée [3].

Les paramètres d'entrée sont la pluviométrie journalière, la demande évaporative mesurée au Bac classe A (Evbac), obtenue pour chaque village à partir de la station agroclimatique la plus proche, la réserve utile du sol sur un mètre, la date du semis et les coefficients culturaux pentadaires [4] caractérisant les besoins en eau de la culture.

On obtient en sortie, par pentade et pour les principaux stades phénologiques de la culture, l'évapotranspiration réelle ETR, le drainage sous la zone racinaire, l'évapotranspiration maximale ETM et l'état du stock hydrique du sol.

La pluviométrie a été mesurée à l'aide de pluviomètres répartis dans le territoire villageois de manière à ce qu'aucune des parcelles suivies ne soit distante de plus d'un kilomètre d'un pluviomètre.

Les réserves utiles des sols du bassin arachidier sont bien connues et fortement corrélées à leur teneur en éléments fins [5,6]. Elles varient de 50 mm/m de sol pour les sols les plus sableux, au nord du bassin arachidier (village de Keur Boumi) à 120 mm/m pour les sols plus argileux du Sine Saloum et de la région de Kounghoul (villages de Ndimb Taba, Darou Khoudos et Keur Lamine). Au centre, elles varient entre 70 et 100 mm/m selon qu'on se trouve dans un sol dit Dior (sableux) ou Dek (plus argileux). Pour les villages du sud de la région, on a eu recours à la tarière pour évaluer la profondeur de sol utilisable par les racines, du fait de la présence possible de la cuirasse à moins d'un mètre de la surface.

De nombreuses études ont montré la pertinence des indices de satisfaction des besoins en eau ETR/ETM sur l'ensemble du cycle et à la phase de floraison pour l'explication du rendement des céréales pluviales en Afrique de l'Ouest en milieu contrôlé.

L'indice que nous avons utilisé est l'indice de rendement potentiel, ou espéré, "iresp", résultant des travaux de Forest et Lidon [7], Forest et Reyniers [8], Poss *et al.* [9], Cortier *et al.* [10] :

$$\text{iresp} = (\text{ETR/ETM})_{\text{cycle}} \times (\text{ETR/ETM})_{\text{phase sensible}}$$

où (ETR/ETM)_{phase sensible} est le minimum de (ETR/ETM)_{floraison}

et (ETR/ETM)_{montaison-épiaison}.

Bilan hydrique *in situ*

Des travaux de station [11,12] ayant mis en évidence une interaction entre la fertilité du sol et l'alimentation hydrique du mil, on a voulu juger de l'importance de ce phénomène, que le modèle utilisé ne prend pas en compte, en milieu paysan.

Un bilan hydrique *in situ* a donc été réalisé sur l'un des sites (Sob), par la méthode gravimétrique, sur huit parcelles représentant quatre niveaux d'apports de matière organique et ayant levé à la même date. On s'est attaché à vérifier que la conduite de ces parcelles était par ailleurs homogène.

Résultats

Alimentation hydrique et rendements

La figure 2 donne le rendement en grain du mil en fonction de l'indice hydrique "iresp". Les deux variables sont nettement corrélées, mais la variabilité du rendement augmente avec la satisfaction des besoins en eau.

Les meilleurs rendements obtenus sont proches du potentiel représenté par les rendements des parcelles intensifiées des stations de recherche de l'ISRA.

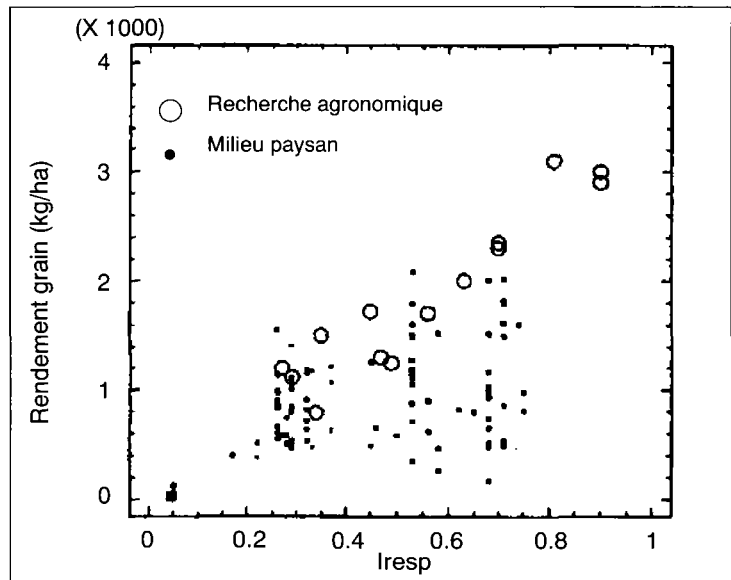


Figure 2.
Indice hydrique
et rendement du mil.

Un rapport de 1 à 10 existe entre les moins bons et les meilleurs rendements lorsque les conditions hydriques ne sont pas limitantes.

Variabilité des situations agricoles

D'une manière générale, les résultats de l'enquête confirment la faible variabilité du précédent cultural (mil dans les champs de case, arachide dans pratiquement tous les autres cas), de la préparation du sol (simple nettoyage) et de la variété utilisée (Souna).

La situation phytosanitaire a été relativement satisfaisante en 1990, et seuls quelques dégâts dus aux cantharides sont signalés, principalement dans les villages du Sud.

Les principaux facteurs de différenciation des situations qui apparaissent sont, outre les facteurs pris en compte par la simulation du bilan hydrique, la densité de semis, qui n'a pas été retenue pour l'analyse du fait de sa très faible variabilité intra-site, la qualité des sarclages et du démariage ainsi que la fréquence et l'ancienneté des apports de fumure.

De nombreux auteurs ont montré l'influence de la position des parcelles dans la toposéquence sur le bilan hydrique [13, 14] et sur le rendement des cultures [15]. Cependant, le nombre de situations à ruissellement potentiel est très faible dans notre échantillon par rapport à celui des situations "stables", et ce critère n'a pu être utilisé dans l'analyse.

Influence des pratiques culturales sur la réponse à l'indice hydrique

Pour évaluer cette influence, on a cherché à tester l'existence de correspondances entre les niveaux de rendement obtenus et les pratiques culturales, tout en tenant compte du niveau d'alimentation hydrique. Pour cela, on a découpé le graphique de la figure 2,

donnant le rendement grains en fonction de l'indice "iresp", en zones contenant le même nombre de situations, en respectant la symétrie du nuage de points (figure 3). Les situations où "iresp" est inférieur à 0,1 ont été regroupées en une seule zone du fait de la très faible variabilité de leur rendement. Les autres situations sont réparties en huit zones d'environ douze points chacune, pour lesquelles on a étudié la distribution des variables décrivant les sarclages (tableau I) et la fumure (tableau II).

La zone 5 s'oppose aux zones 2 à 4 par le niveau de fertilisation. Les zones 6, 7 et 9 se différencient à la fois par la qualité des sarclages et le niveau de fertilisation, positivement corrélés. L'analyse plus détaillée de la zone 8 montre qu'elle est surtout constituée de situations à sarclages corrects et fumure peu fréquente à rare, coexistant avec des situations à sarclages médiocres et fumure moyenne.

Tableau I. Proportions (%) des situations par niveaux de l'indice de qualité des sarclages "isarcl" pour les zones 2 à 9.

	ZONES							
Isarcl	2	3	4	5	6	7	8	9
0 – 1	63.7	88.9	80	83.4	41.7	28.5	50	21.4
2 – 3	36.4	0	10	8.3	41.7	50	33.4	42.9
4 – 5	0	11.1	10	8.3	16.7	21.4	16.6	35.7

Signification moyenne des niveaux de "isarcl" :

isarcl 0 – 1 : sarclages corrects à très corrects.

isarcl 2 – 3 : sarclages tardifs mais tous effectués. Présence en général d'un sarclage manuel après le 2^e sarclage mécanique.

isarcl 4 – 5 : sarclages tous tardifs, certains non effectués, absence fréquente du sarclage manuel.

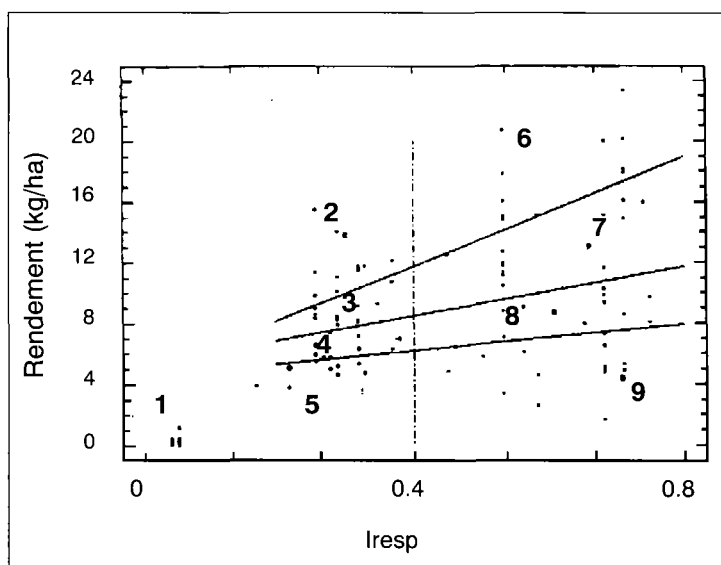


Figure 3. Partage en zones du graphe rendement grain - indice hydrique.

Tableau II. Proportions des situations par niveaux de l'indice de fumure "ifum" pour les zones 2 à 9.

Ifum	Zones							
	2	3	4	5	6	7	8	9
A 2.5 – 3.8	18.2	22.2	10	8.3	33.3	7.1	8.3	0
B 1.5 – 2.3	27.3	11.1	20	8.3	33.3	21.4	33.3	7.1
C 0.5 – 1.3	54.5	22.2	40	16.7	16.7	50.0	33.3	28.6
D 0 – 0.3	0	44.4	30	66.7	16.7	21.4	25.0	64.3

Signification moyenne des niveaux de ifum :

A : fumure 3 années sur 3, parage ou parage + engrais en 90.

B : fumure 3 années sur 3 sans parage en 90 ou parage en 90 avec fumure une seule des deux autres années.

C : fumure peu fréquente ou ancienne.

D : fumure rare et ancienne.

Ces critères ne permettent pas de bien différencier les zones 2 à 4, même si la zone 2 ne contient aucune parcelle à fumure rare et ancienne, contrairement aux deux autres. On peut soupçonner que l'indice de qualité des sarclages est assez imparfait, car il ne tient pas compte, en particulier, du soin apporté à l'opération (qu'on pourrait relier à la durée de chaque sarclage). Angé et Fontanel [16] ont montré en effet que cette durée pouvait être très variable, pour des sarclages commencés aux mêmes dates. Cette imperfection s'exprimerait plus dans les villages à conditions hydriques limitantes du fait du nombre plus réduit de sarclages et de la moindre variabilité des dates d'intervention dans ces régions.

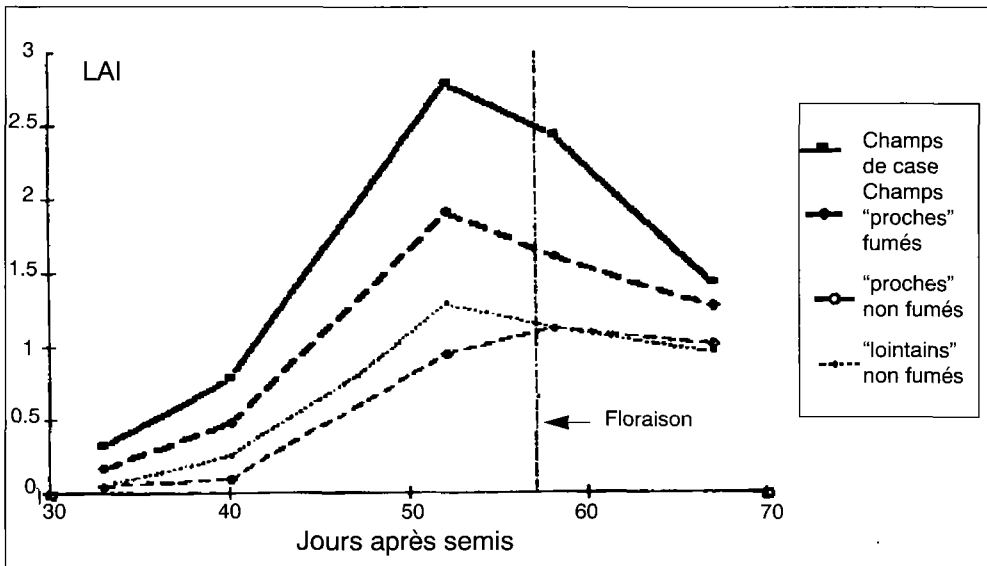


Figure 4. Evolution de l'indice de surface foliaire du mil pour les différents types de champ. Village de Sob.

Mais on peut également avancer l'hypothèse, annoncée précédemment, d'une interaction entre niveau de fumure et alimentation hydrique qui "brouillerait" le classement des situations en fonction de l'indice "iresp", calculé par un modèle ne tenant pas compte d'une telle interaction.

Suivi hydrique *in situ* pour différents niveaux de fumure

Le dispositif mis en place sur des parcelles fumées et non fumées du village de Sob, où l'"iresp" variait entre 0.2 et 0.5 en 1990, permet d'examiner plus avant la validité de cette hypothèse.

La figure 4 montre que la fumure a eu un effet positif sur la croissance et l'indice de surface foliaire (LAI) pendant les 50 premiers jours du cycle. On assiste ensuite à une baisse sensible du LAI dans les parcelles fumées, particulièrement marquée dans les champs de case qui sont les plus fumés, tandis qu'il se stabilise dans les parcelles sans fumure.

L'analyse de l'alimentation hydrique permet d'interpréter ce phénomène (figures 5 et 6). Pendant la première partie du cycle, jusque vers 50 jours après semis, la fumure favorise l'extraction de l'eau du sol. Les précipitations étant limitantes, on se trouve au stade de la floraison avec une réserve hydrique sous les parcelles fumées nettement plus faible qu'en l'absence d'apports de matière organique, et l'ETR chute à 1,5 mm/jour alors qu'elle reste proche de 4 mm/jour dans les parcelles non fumées.

L'extraction intense de l'eau du sol permise par la fumure pendant la phase de développement végétatif a, dans ce cas de figure, favorisé l'apparition d'un stress hydrique à la floraison, qui a provoqué un flétrissement de feuilles, entraînant la chute de LAI observée à la figure 4.

Les rendements des parcelles fumées (1000 kg/ha) restent, malgré cela, doubles de ceux des champs non fumés (500 kg/ha), le stress hydrique de floraison semblant avoir été mieux que compensé par la meilleure alimentation hydrique de la phase végétative et probablement, par une meilleure alimentation minérale.

Mais on peut supposer que des situations plus défavorables peuvent se produire, où le gain de production lié à la fertilisation, réduit par l'effet mis en évidence, peut au moins ne pas suffire à couvrir le coût de l'intrant employé, qu'il s'agisse d'un coût en travail ou d'un coût monétaire.

Enfin, le tableau III montre que la fumure a entraîné une baisse de 20 % de l'indice "iresp" calculé à partir du bilan hydrique *in situ*, lorsque l'indice obtenu par simulation ne permet pas de distinguer les deux situations.

Tableau III. Indice hydrique "iresp" mesuré et simulé pour les parcelles fumées et non fumées.

Parcelles	Simulé	Mesuré <i>in situ</i>
Fumées	0,26	0,17
Non fumées	0,26	0,22

Dans le cas étudié, la réponse du rendement à l'indice hydrique est améliorée par la prise en compte de l'interaction entre alimentation hydrique et niveau de fumure, et l'on est tenté de supposer qu'on retrouverait, en calculant un tel indice à l'aide d'un modèle plus élaboré, un classement des rendements en fonction de la fertilité pour chaque niveau d'irrigation.

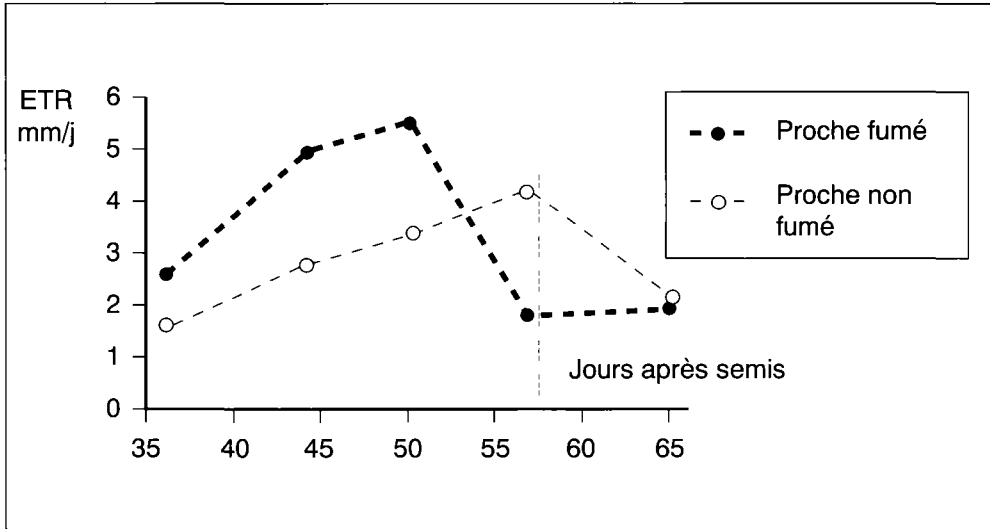


Figure 5. ETR du mil avec et sans fumure à Sob.

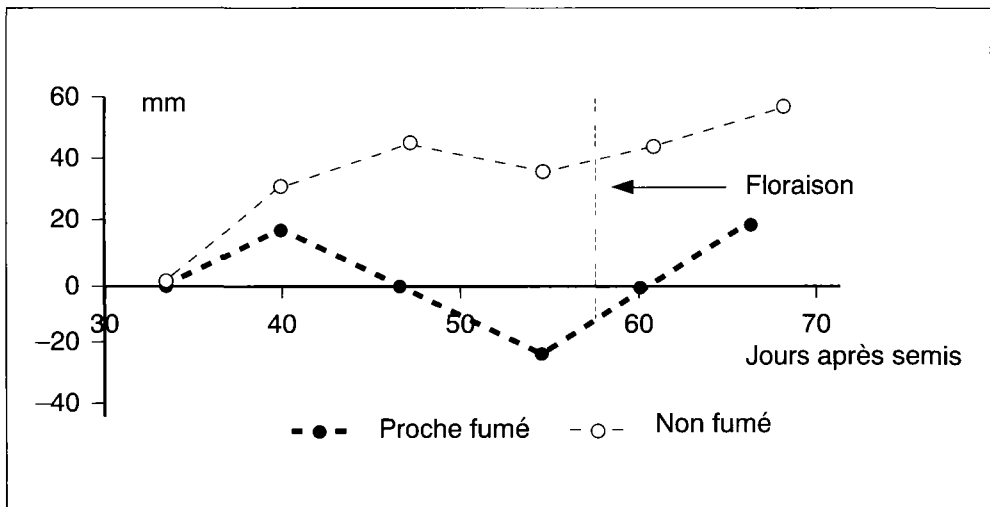


Figure 6. Stock hydrique sous culture avec et sans fumure (stock actuel-stock initial).

Typologie des situations agricoles en fonction de l'alimentation hydrique et des pratiques culturales

En définitive, et à la lumière de ce qui précède, une typologie des situations culturales, dont on a représenté les catégories sur le graphique iresp-rendement, peut être proposée (figure 7) :

- catégorie I : $i_{resp} < 0.1$: conditions hydriques extrêmement limitantes. Variabilité très faible des rendements, production ne suffisant pas en général à couvrir les frais de récolte ;
- catégorie II : conditions hydriques limitantes avec emploi régulier de fumure. Influence parfois perverse de la fertilisation sur la réponse aux conditions climatiques. Productions proches du potentiel à inférieures au potentiel (de 100 % à 50 %) ;
- catégorie III : conditions hydriques limitantes. Recours à la fumure moins d'une année sur trois. Rendements très inférieurs au potentiel ($< 50\%$) ;
- catégorie IV : conditions hydriques moyennement limitantes à peu limitantes. Fertilisation organique et parfois minérale deux à trois années sur trois. Calendrier de sarclages correct. Rendements très proches du potentiel ;
- catégorie V : conditions hydriques moyennement limitantes à peu limitantes. Fertilisation régulière mais peu fréquente (une année sur trois) et sarclages tardifs, ou fertilisation plus fréquente mais sarclages nettement bâclés, ou fertilisation plus rare mais sarclages mieux conduits. Rendements inférieurs au potentiel (80 à 30 % du potentiel). Influence très probable sur les rendements de la situation de la parcelle vis-à-vis du ruissellement ;
- catégorie VI : conditions hydriques moyennement limitantes à peu limitantes. Recours à la fertilisation organique moins d'une année sur trois et sarclages bâclés. Rendements très inférieurs au potentiel ($< 30\%$ du potentiel).

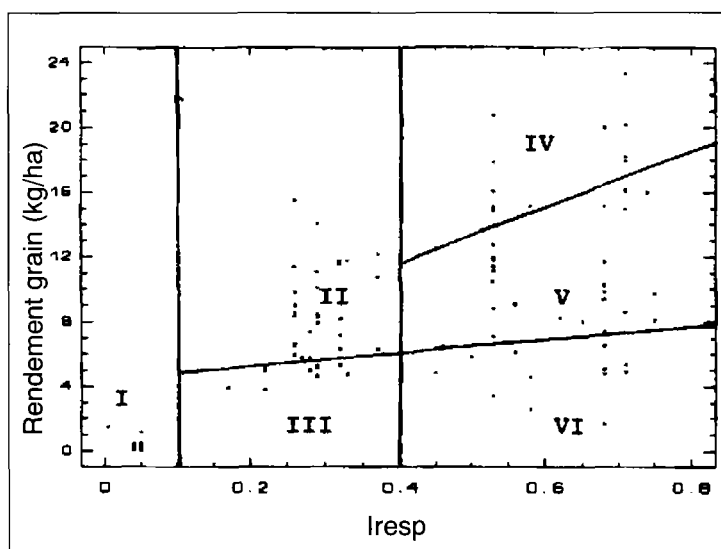


Figure 7.
*Catégories
de la typologie
des situations culturales.*

Conclusion

Il apparaît que les agriculteurs sénégalais atteignent sur certaines parcelles le potentiel de production du mil correspondant aux conditions climatiques du lieu.

Mais lorsque ces conditions sont moyennement à faiblement limitantes, les rendements sont dans la plupart des cas limités par le faible niveau de restitutions, l'absence de recours aux engrais et un mauvais contrôle des adventices. Plusieurs études en agronomie des systèmes agraires effectuées dans le bassin arachidier sénégalais [16-18] montrent que la qualité de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement est limitée par les ressources en matière organique, réduites par la disparition des parcours et des jachères, et par les difficultés d'accès au matériel de culture attelée.

Lorsque les conditions hydriques sont plus défavorables, le calendrier d'exécution des sarclages est moins variable. Si l'absence de restitutions mène à coup sûr à des rendements très inférieurs au potentiel, la valorisation d'apports de fumure n'est pas pour autant garantie.

Comblé le "Gap technologique" de cette agriculture passe donc par une politique de soutien à l'acquisition d'intrants et de matériel, et par une optimisation de la gestion des ressources en matière organique. Cependant, il convient d'être prudent dans l'utilisation de fertilisants dans les régions où les années à indice hydrique "iresp" faible sont fréquentes.

Il est nécessaire de poursuivre les recherches sur les interactions entre pratiques culturales et alimentation hydrique afin de mettre au point des modèles permettant, par des analyses fréquentielles, d'évaluer avec précision pour chaque région le risque agricole lié à l'utilisation d'intrants.

Références

1. Jouve P. (1989). L'analyse agronomique de situations culturales. Lab. Syst. Prod. CIRAD-SAR/Montpellier, 11 p.
2. Franquin P., Forest F. (1977). Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* 1977 ; 32 (1) : 7-11.
3. Marchand D. (1988). Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sur sol cultivé : approche déterministe ou stochastique. Thèse Doct., Université Joseph-Fourier-Grenoble 1, INP/Grenoble, 246 p.
4. Dancette C. (1983). Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.* 1983 ; 38 (4) : 281-94.
5. Hamon G. (1980). Mise en œuvre et critique de méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Application aux sols de culture du Sénégal. Thèse de Doct. Ing., Institut de mécanique de Grenoble, 136 p.
6. Imbernon J. (1981). Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Application au calcul d'un bilan sous culture. Thèse de doctorat 3^e cycle présenté à l'Université scientifique et médicale et l'INP de GRENOBLE, soutenue le 27 avril 1981. 152 p. + annexes et graph.

7. Forest F., Lidon B. (1982). Influence of the rainfall pattern on fluctuations in an intensified sorghum Crop Yield. Agrometeorology of Sorghum and Millet in the Semi-Arid Tropics: Proceedings of the International Symposium, 15-20 nov. 1982, ICRISAT: 261-73.
8. Reyniers F.N., Forest F. (1988). Améliorer l'alimentation hydrique et son efficience en agriculture pluviale, en Afrique au Sud du Sahara. Séminaire ILRI/CTA du 25 au 29 avril 1988 à Harare, 25 p.
9. Poss R., Saragoni H., Imbernon J. (1988). Bilan simulé du maïs au Togo méridional. L'Agron. Trop. 1988 ; 43 (1) : 18-29.
10. Cortier B., Pochtier G., Imbernon J. (1988). Le maïs au Sénégal : effets des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. L'Agron. Trop. 1988 ; 43 (2) : 85-90.
11. Cissé L. (1986). Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal. Thèse de doctorat en Sciences agron., Inst. nat. polytechnique de Lorraine, 184 p.
12. Affholder F. (1991). Influence d'apports de compost sur l'alimentation hydrique du mil. In: Reyniers F.N. : 3^e rapport d'avancement de l'ATP "Croissance et fonctionnement hydrique des racines en sols dégradés", CIRAD-CA.
13. Rousseau V. (1988). Suivi hydrique à l'échelle d'une toposéquence et ajustement d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Utilisation agricole de l'eau, maîtrise du milieu et production. Diplôme d'agronomie tropicale. ENSAM/CNEARC, 40 p.
14. Albergel J., Perez P., Vaksman M. (1990). Gestion agricole des pluies au Sahel. Une méthode d'estimation de ruissellement dans le bilan hydrique des cultures. Journées hydrologiques de Montpellier, 1990. ORSTOM, 12 p.
15. Garin P. (1989). Itinéraires techniques et rendement de l'arachide à Sob, village du Sine en 1987. DRSAER/ISRA – CIRAD-SAR Montpellier, 17-30. Annexes et graph.
16. Angé A., Fontanel P. (1987). La contrainte enherbement et sa gestion dans le Sud Saloum au Sénégal. Une analyse connexe de l'organisation du travail et de ses résultats agronomiques. Séminaire MESRU/CIRAD, septembre 1987, 15 p.
17. Garin P., Faye A., Léricollais A., Sissokho M. (1990). Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs sécrer au Sénégal. Les Cahiers de la Recherche Développement 1990 ; (26) : 65-84. Dossier n° 2 : Gestion des terroirs.
18. Garin P. (1989). Eléments d'analyse de la gestion des moyens de production au sein d'une communauté villageoise du Sine-Saloum. Le cas de Ndimb Taba. Document de travail, CIRAD-SAR/Montpellier, 51 p. + annexes et graph.

19

Influence des techniques culturales sur le système racinaire du cotonnier. Conséquences sur l'alimentation hydrique et minérale

B. DJOULET, R. FORTIER

IRCT/CIRAD, station de Bebedjia, BP 31, Moundou, Tchad

Le cotonnier a un comportement particulier vis-à-vis d'un stress hydrique. Des plantes telles que l'arachide ou le sorgho ferment leurs stomates avant ou dès le début de flétrissement. Le cotonnier réagit différemment. Au Mali il a été observé un début de flétrissement pour une turgescence relative de 82 % alors que la fermeture des stomates est intervenue à une turgescence relative de 75 % [1]. Le cotonnier réduit moins vite sa transpiration et son activité photosynthétique que l'arachide ou le sorgho alors que sa turgescence chute plus rapidement. La photosynthèse peut même rester maximale sur des feuilles flétries.

Le premier phénomène visible lié à la sécheresse sur cotonnier est une abscission massive des très jeunes capsules. Pour lutter contre la sécheresse les capsules âgées rétrocéderont une partie de leur eau, phénomène observé aussi au cours de la journée lors des périodes chaudes.

Le développement plus ou moins important du système racinaire sera aussi un facteur de résistance à la sécheresse. Plus important il compensera en outre mais partiellement la faiblesse chimique des sols [2]. Des cotonniers ne montrant aucun signe de sécheresse

45 jours après la fin des pluies ont été observés au Nord-Cameroun. Le profil cultural a alors révélé que les racines descendaient à plus de 3 m dans un sol ferrugineux sur dune [3]. Le développement du système racinaire est variable selon le sol. Fritz et Vallerie ont distingué 3 types de systèmes définis d'après des observations de profils culturaux (tableau I). Le développement du pivot va suivre le front d'humectation si celui-ci est limitant. Il sera sensible à la présence d'horizons compacts ou à la présence d'hydromorphie (tâches blanchâtres observées sur l'écorce des racines [4]). La tranche de sol 10-30 cm, plus meuble et humifère, constituera l'horizon préférentiel de la colonisation du système racinaire. Un pivot pouvant plonger permettra un développement plus en profondeur ainsi que nous l'avons observé à Bebedjia en 1990. Un réseau important de racines secondaires (diamètre supérieur à 2 mm) a été observé à 1,80 m de profondeur.

Pour l'agronome il est important de mettre en œuvre des pratiques culturales favorisant rapidement le développement racinaire : type de préparation du sol, choix de la date de semis intégrant plusieurs contraintes (éviter que le front d'humectation soit le premier facteur limitant et prendre en compte la date probable de fin de saisons des pluies en particulier), niveau de fertilisation, limitation de la concurrence des mauvaises herbes...

C'est dans ce cadre qu'au niveau du programme fédérateur parcelle n° 2 Alimentation hydrique et minérale en fonction des techniques culturales du R3S une expérimentation a été conduite depuis 1989 sur la station de recherche de Bebedjia, Tchad.

Tableau I. Types de systèmes racinaires décrits sur cotonnier en relation avec le type de sols (d'après Fritz et Vallerie, Nord-Cameroun).

Types	I	II	III
Développement du pivot	Très important (2 à 3 m)	Normal (40/50 cm)	Très faible (10/20 cm) Diamètre au collet très fort
Développement des racines secondaires	Très longues et abondantes	Relativement nombreuses et régulièrement réparties	Diamètre important Racines nombreuses mais courtes Faible prospection
Types de sol	Sols ferrugineux sur dune	Sols peu évolués alluviaux Sols ferrugineux et sols rouges tropicaux	Vertisols Sols alluviaux et sols ferrugineux hydromorphes Sols halomorphes

Présentation de l'expérimentation

Techniques culturales étudiées

Nous avons étudié l'incidence de la fertilisation, minérale et/ou organique (base terre de parc), sur un labour, avec un témoin travail du sol minimum.

Le travail du sol minimum (TEM) correspond à la pratique traditionnelle du paysan. Le labour sans fumure (LAB) est également intégré dans la dénomination “culture en traditionnel” au Tchad, car sans intrant et pratiqué actuellement avec le développement de la culture attelée.

L'apport d'une fertilisation minérale (LEN) correspond à la culture dite “en productivité”.

La fertilisation organique (LTP) constitue un des thèmes en voie de vulgarisation au Tchad.

La fertilisation organo-minérale (LEF) fait office de traitement “plafond” et doit servir de référence pour les différents pays participant à ce thème fédérateur (tableau II).

Tableau II. Significations des contrastes et coefficients attribués à chaque traitement.

Signification	TEM	LAB	LEN	LTP	LEF
Labour avec ou sans fertilisation par rapport au témoin (/témoin)	- 4	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1
Engrais minéral sur labour (Engr sur Lab)	0	- 1	+ 1	- 1	+ 1
Terre de parc sur labour (TP sur Lab.)	0	- 1	- 1	+ 1	+ 1
Interaction fumure organo-minérale (Effet Eng x TP)	0	- 1	+ 1	+ 1	- 1

Dispositif expérimental

Le plan d'expérience utilisé est celui des blocs de Fisher à 6 répétitions. L'essai est implanté sur un sol présentant un affleurement cuirassé entre 0,80 et 1,20 m.

Les données disponibles pour l'ensemble des parcelles sont analysées par la méthode d'analyse de variance à l'aide du logiciel STATITCF. Les moyennes sont comparées par le test de Newman-Keuls et par la méthode des contrastes, qui permet d'individualiser les effets de certains facteurs.

Les observations

Deux types d'observations ont été réalisées sur le système racinaire. Le premier correspond à un comptage sur grille selon un plan vertical perpendiculaire à la ligne de semis. Le second consiste en un arrachage de 10 plants effectué au milieu de la phase de

floraison des cotonniers et permet d'observer l'état du système racinaire dans les horizons de surface. Les observations réalisées sur les pivots arrachés sont la mesure de la longueur du pivot, de la profondeur atteinte, du diamètre du collet et du diamètre au point de rupture et le dénombrement du nombre de racines secondaires. Ces observations sont fonction de l'état structural et hydrique du sol au moment de l'arrachage et elles ne peuvent être que comparatives. Elles permettent de traduire une certaine *puissance* du système racinaire. Elles ont l'avantage d'être facilement reproductibles.

Cette note se limitera à la présentation des résultats acquis par la seconde méthode sur l'essai conduit depuis 1989 sur sol cuirassé afin de montrer son intérêt pour la culture cotonnière.

Résultats

Diamètre au collet (tableau III)

Des erreurs de mesures survenues en 1991 ont rendu les résultats de cette année inexploitable. Seuls les résultats des années 1989 et 1990 sont traités. L'analyse de variance ne révèle aucun effet des traitements au seuil de 5 %. La méthode des contrastes montre un effet positif de la fertilisation minérale sur labour.

Tableau III. Diamètre au collet.

Diam Collet	1989	1990
1 (TEM)	1.41	13.06
2 (LAB)	1.27	13.74
3 (LEN)	1.54	15.88
4 (LTP)	1.30	14.12
5 (LEF))	1.55	17.86
Moy gen.	1.42	14.93
F trait.	2.49 NS	2.60 (S)
C.V.	14.2%	19.7%
Contrastes (F) /Témoin	0.00	3.04 (S)
Engr sur Lab.	9.89 HS	5.97 S
TP sur Lab.	0.07	0.96
Effet Eng x TP	0.00	0.44

Diamètre au point de rupture

Cette mesure est entachée d'une grande variabilité en raison des conditions d'arrachage des cotonniers. Cela se traduit par des écarts types élevés par rapport à la moyenne de l'essai (écart type respectif de 0.04 et 4.36 en 1989 puis 1990 pour des moyennes correspondantes de 0.13 et 3.72). Aucun résultat précis ne ressort de cette analyse.

Longueur du pivot (tableau IV)

En 1989 il n'y a pas d'effet significatif des techniques culturales. L'effet des traitements est hautement significatif en 1990 et 1991 et dans le regroupement.

Pour l'année 1990 chaque contraste est significatif :

- Effet positif du labour avec ou sans fertilisation par rapport au témoin,
- Effet positif de la fertilisation minérale sur labour,
- Effet positif de la fertilisation organo-minérale,
- Effet négatif de la fertilisation terre de parc sur labour.

En 1991 seul l'effet de la fertilisation minérale sur labour est positif.

L'analyse du regroupement montre par un contraste un effet positif du labour avec ou sans fertilisation par rapport au témoin, mais seuls les traitements fertilisés avec l'engrais minéral se révèlent supérieurs au témoin (test de Newman-Keuls).

Le résultat obtenu avec la terre de parc peut paraître surprenant. Celle-ci a été épandue peu de temps avant le labour, lui-même suivi rapidement par le semis. On peut faire l'hypothèse d'une offre en éléments nutritifs par la terre de parc moindre et retardé dans le temps comparativement à celle de l'engrais minéral du fait de la période nécessaire à sa minéralisation. Le système racinaire rencontre alors un état nutritif du sol à peine amélioré, dans un premier temps, par la terre de parc par rapport à l'état sans apport. Cette première hypothèse ne suffit pas cependant à expliquer l'effet négatif observé en 1990.

Tableau IV. Longueurs du pivot.

Long Pivot	1989	1990	1991	Regroupement
1 (TEM)	18.59	16.40 c	18.17 b	17.72 b
2 (LAB)	18.27	23.25 a	25.80 a	22.44 a b
3 (LEN)	19.14	25.87 a	25.88 a	23.63 a
4 (LTP)	18.03	19.91 b	23.68 a	20.54 a b
5 (LEF)	20.58	25.64 a	25.44 a	23.89 a
Moy gen	18.92	22.21	23.80	21.64
F trait.	0.81 NS	28.74 HS	9.66 HS	4.70 S
F année				7.39 S
F trait/année				4.25 HS
Ecart type	2.77	1.84	2.57	2.04
C.V.	14.6 %	8.3 %	10.8 %	
Contrastes (F)/Témoin	0.11	74.44 HS	35.77 HS	13.79 HS
Engr sur Lab.	2.29	30.69 HS	0.77	3.69 (S)
TP sur Lab.	0.28	5.60 S	1.47	0.48
Effet Eng x TP	0.55	4.25 S	0.64	0.83

Profondeur de sol atteinte par le pivot (tableau V)

Les effets sont identiques à ceux observés sur la longueur du pivot.

Tableau V. Profondeurs atteintes par le pivot.

Prof. Pivot	1989	1990	1991	Regroupement
1 (TEM)	18.07	15.22 d	15.99 b	16.43 a
2 (LAB)	17.52	21.28 b	23.61 a	20.80 a
3 (LEN)	18.31	24.25 a	23.31 a	21.96 a
4 (LTP)	17.19	18.02 c	21.35 a	18.85 a
5 (LEF)	19.83	23.41 a	22.40 a	21.88 a
Moy. gen.	18.18	20.44	21.33	19.98
F trait.	0.89 NS	42.24	11.04 HS	3.92 S
F année				3.11
F trait/année				5.31 HS
Ecart type	2.65	1.43	2.30	2.06
C.V.	14.6 %	7.0 %	10.8 %	
Contrastes (F) /Témoin	0.01	100.51 HS	40.60 HS	11.22 HS
Engr sur Lab.	2.50	51.72 HS	0.16	3.10
TP sur Lab.	0.30	12.43 HS	2.87 (S)	0.73
Effet Eng x TP	0.73	4.31 S	0.52	0.62

Nombre d'insertions de racines secondaires sur le pivot (tableau VI)**Tableau VI.** Nombre d'insertions de racines secondaires sur le pivot.

Racines II	1989	1990	1991	Regroupement
1 (TEM)	19.55 c	15.93 b	21.50	18.99 c
2 (LAB)	22.08 bc	17.83 ab	20.58	20.17 bc
3 (LEN)	24.90 ab	19.18 a	23.22	22.43 ab
4 (LTP)	21.75 bc	16.17 b	18.97	18.96 c
5 (LEF)	27.05 a	19.80 a	22.60	23.15 a
Moy. gen.	23.07	17.78	21.37	0.74
F trait.	5.48 HS	5.39 HS	2.07 NS	7.58 HS
F année				24.16 HS
F trait/année				1.29
Ecart type	3.06	1.83	2.87	1.23
C.V	13.3%	10.3%	13.4%	
Contrastes (F) /Témoin	9.89 HS	7.65 S	0.01	7.60 S
Engr sur Lab.	10.54 HS	11.09 HS	7.16 S	20.75 HS
TP sur Lab.	0.53	0.49	0.91	0.12
Effet Eng x TP	0.99	2.33	0.18	1.84

Le pivot constitue la racine primaire du cotonnier. Les ramifications racinaires d'ordre 1 correspondront aux racines secondaires. Par insertion nous entendons le point de départ au niveau du pivot de ces racines secondaires.

L'effet des techniques culturales sur le nombre de racines secondaires sur le pivot est hautement significatif en 1989, 1990 et dans l'analyse du regroupement.

Il se traduit par un effet positif du labour avec ou sans fertilisation par rapport au témoin et par un effet positif de la fertilisation minérale sur labour.

Il n'y a pas d'effet de la terre de parc sur labour. Le traitement labour + terre de parc ne diffère pas des traitements témoin et labour seul et il est significativement inférieur aux traitements ayant reçu une fertilisation minérale (labour + engrais, labour + engrais + terre de parc).

Rapport longueur pivot/profondeur atteinte

Un rapport de 100 indiquerait une croissance parfaitement verticale du pivot, sans rencontre d'obstacle. Dans le cas contraire le pivot va avoir un aspect non linéaire avec parfois un coude marqué s'il rencontre une surface endurcie (figures 1 et 2). Le rapport LP/PA augmentera en conséquence.

Il n'y a pas d'effet significatif des techniques culturales. Cela indique que les contraintes au développement du pivot sont équivalentes sous les différentes techniques culturales.

Ce résultat couplé aux effets positifs observés sur la longueur du pivot et sur la profondeur atteinte nous conduisent à émettre l'hypothèse d'une vitesse de croissance plus rapide dans le cas de la fertilisation minérale. Cette hypothèse a pu être vérifiée sur la culture de sorgho qui alterne avec la culture cotonnière dans cette expérimentation. Par contre nous n'avons pas d'observations analysées dans ce sens sur cotonnier.



Figure 1. Pivot
du cotonnier sous
labour.
Cheminement du pivot
en profondeur.



Figure 2. Effet de surfaces endurcies sur les racines du cotonnier.

L'effet année est significatif dans l'analyse du regroupement. De 1989 à 1991 le rapport LP/PA augmente de manière significative (figure 3). Ce résultat traduit la formation d'une semelle de labour au sens large liée au passage régulier de l'outil de préparation du sol (grattage à la houe ou labour à la charrue).

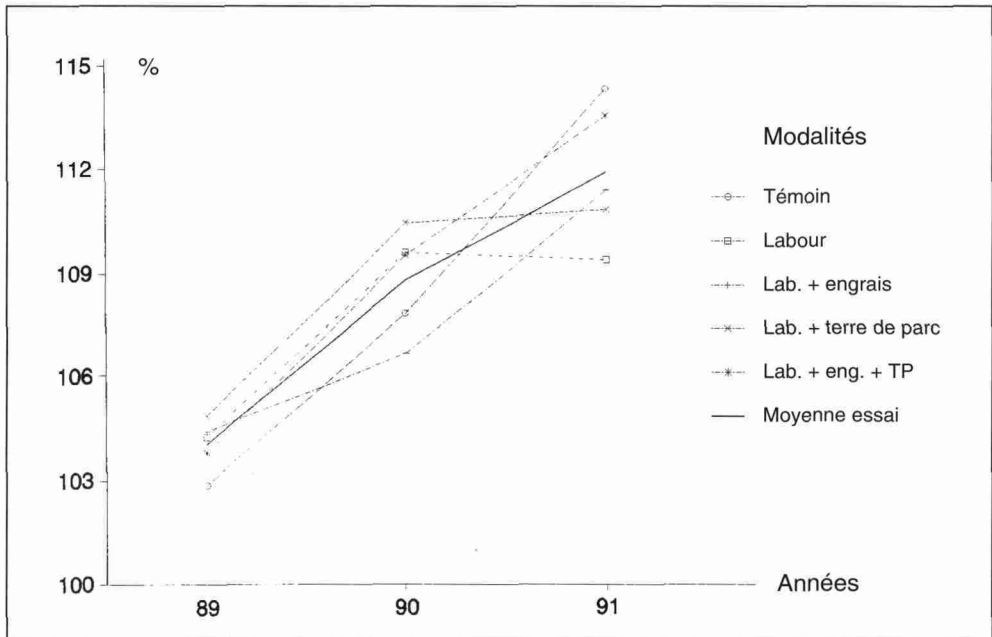


Figure 3. Evolution du rapport longueur pivot/profondeur atteinte. Essai coton sur cuirasse.

Densité linéaire des racines secondaires sur le pivot (tableau VII)

En 1989 l'effet des techniques culturales est significatif, notamment avec un effet positif de la fertilisation minérale par rapport au témoin.

Par contre en 1990 et 1991 l'effet s'inverse. La densité linéaire des racines secondaires est significativement supérieure pour le témoin comparé aux autres traitements. Cela s'explique par une longueur de pivot qui augmente (tableau IV) alors que le nombre d'insertions de racines secondaires varie peu. Cet ensemble de résultats traduit une répartition groupée des racines secondaires sur un pivot court dans le cas du témoin par rapport à une répartition plus dispersée des racines secondaires sur un pivot plus long dans le cas des objets labourés avec ou sans fertilisation assurant ainsi une meilleure colonisation du sol.

L'analyse du regroupement montre un effet année. La densité linéaire des racines secondaires observée sur les 4 traitements labourés est supérieure en 1989 par rapport aux années suivantes, il n'y a pas d'effet sur le témoin. En utilisant ce critère tel que l'utilise Fritz et Vallerie (tableau I) on peut en conclure qu'il existe un effet cumulatif positif du labour pour la colonisation du sol par les racines secondaires (celles-ci sont mieux réparties) indépendamment de tout effet fertilisation.

Tableau VII. Densité linéaire des racines secondaires sur le pivot.

RAC/LP(nb/10cm)	1989	1990	1991	Regroupement
1 (TEM)	10.53 b	9.84 a	11.97 a	10.78
2 (LAB)	12.42 ab	7.67 b	8.01 b	9.37
3 (LEN)	13.06 a	7.42 b	8.94 b	9.81
4 (LTP)	11.98 ab	8.12 b	8.02 b	9.38
5 (LEF)	13.35 a	7.75 b	8.98 b	10.03
Moy gen	12.27	8.16	9.18	9.87
F trait.	3.66 S	5.26 HS	11.07 HS	0.53 NS
F année				11.97 HS
F trait/année				7.56 HS
Ecart type	1.42	1.04	1.20	1.38
CV.	11.6%	12.7%	13.0%	
Contrastes (F) /Témoin	11.23 HS	19.63 HS	40.56 HS	1.62
Engr sur Lab	3.02(S)	0.54	3.73(S)	0.47
TP sur Lab.	0.02	0.85	0	0.02
Effet Eng x TP	0.39	0.02	0	0.02

Les figures 4a, 4b et 4c montrent la différence entre labour et témoin sur la longueur du pivot et surtout sur la répartition des racines secondaires le long du pivot.

Figure 4a.
Pivots sous témoin.

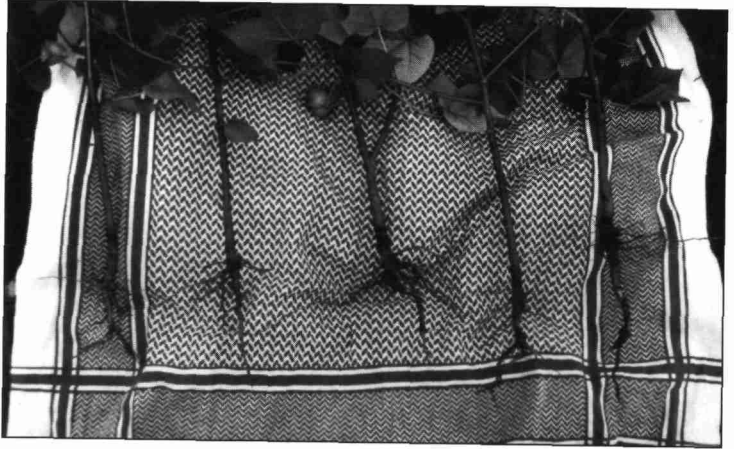


Figure 4b.
Pivots sous labour.

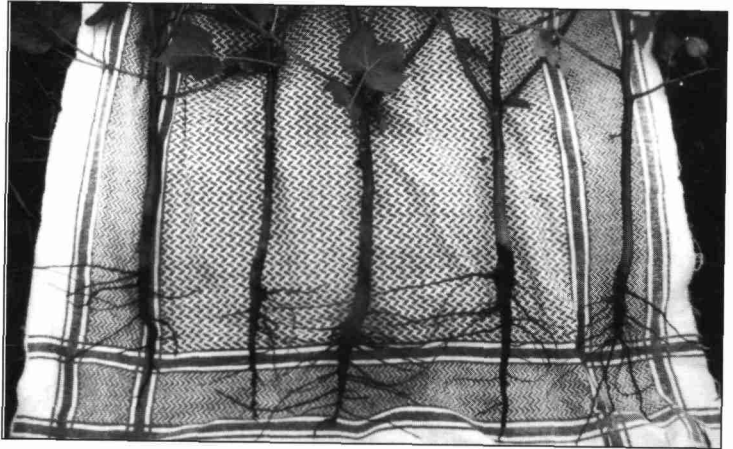
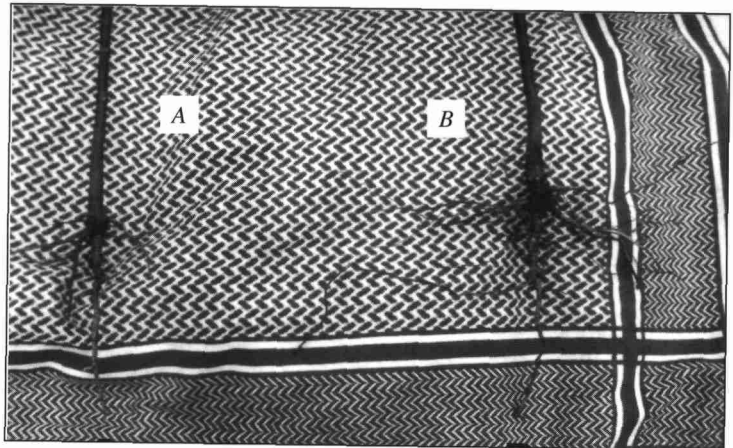


Figure 4c.
*Comparaison pivots
sous témoin (A) et
sous labour (B).*



Discussion

Excepté l'observation sur le diamètre au collet, les résultats sont en concordance avec la classification de Fritz et Vallerie.

La pratique du labour couplée ou non avec une fertilisation assure une meilleure croissance en longueur du pivot. Si la technique d'observation ne permet pas de définir la profondeur maximale atteinte, et donc la réserve utile racinaire maximale, elle donne une appréciation qualitative et comparative des effets des techniques culturales étudiées sur l'alimentation hydrique du cotonnier. L'effet du labour et de la fertilisation se remarque par une longueur de pivot plus grande et une profondeur atteinte plus importante.

La disponibilité en éléments nutritifs en début de croissance semble déterminante pour le développement futur du système racinaire. Un apport organique épandu tardivement par rapport au semis ne se minéralise pas suffisamment pour égaler l'effet d'une fertilisation minérale. L'offre est décalée dans le temps et peut avoir des effets dépressifs sur la culture comme les essais "fractionnement de l'apport azoté" conduits sur la station de Bebedjia l'ont montré [5, 6]. Il faut donc bien raisonner l'apport organique.

Le nombre de racines secondaires augmente avec la fertilisation minérale, et il ne semble pas y avoir d'effet de terre de parc. L'hypothèse sur la rapidité de la disponibilité en éléments nutritifs reste valable pour expliquer ces résultats. Cet effet qui traduit une colonisation plus importante du sol ne préjuge pas de la longueur des racines secondaires, critère utilisé par Fritz et Vallerie dans leur classification. La conclusion reste donc comparative avec un effet positif mais insuffisamment quantifié des techniques culturales labour et fertilisation sur l'alimentation minérale du cotonnier.

Le nombre de racines secondaires ramené à 10 cm de pivot traduit la répartition de ces racines dans le sol. La densité de racines secondaires par longueur de pivot est supérieure pour le témoin par rapport aux autres traitements. Cela montre une compensation relative du manque de croissance du pivot par une émission plus importante de racines secondaires. Cette compensation, jouant sur la colonisation horizontale du sol, n'est pas favorable à une augmentation de la réserve utile racinaire. Ces résultats concordent également avec les observations de Fritz et Vallerie. Mais cette compensation par une colonisation horizontale pourrait être limitée dans la mesure où ces auteurs ont noté que les racines secondaires étaient en fait plus courtes.

La technique d'observation employée ne permet pas de quantifier l'importance du système racinaire, sauf peut-être après un étalonnage avec des prélèvements globaux, et ses conséquences sur l'alimentation hydrique et minérale. Elle permet par contre de comparer certaines techniques culturales ou certains états du milieu et d'en déduire des effets qualitatifs sur l'alimentation hydrique et minérale du cotonnier. Etant plus aisément reproductible que la méthode d'observation sur profil vertical elle peut être un outil utile de diagnostic rapide.

Références

1. Sement (1965). Economie de l'eau du cotonnier et irrigation à l'office du Niger (Mali). *Cot et Fib Trop.* vol XX : 481-516.
2. Fritz A., Vallerie M. (1971). Contribution à l'étude des déficiences minérales des sols sous culture cotonnière au Nord-Cameroun. *Cot. et Fib. Trop.*, vol XXVI, fasc. 3 : 273-301.
3. Fritz A. (1971). Rapport annuel d'Agronomie, Campagne 1970-1971. Station IRCT de Maroua, Cameroun. Non publié.
4. Fritz A. (1969). Rapport annuel d'Agronomie, Campagne 1968-1969. Station IRCT de Maroua, Cameroun. Non publié.
5. Djoulet B. et Martin J. (1984). Rapport annuel d'Agronomie, Campagne 1983-1984. Station IRCT de Bebedjia, Tchad. Non publié.
6. Djoulet B. et Fortier R. (1985). Rapport annuel d'Agronomie, Campagne 1984-1985. Station IRCT de Bebedjia, Tchad. Non publié.

20

Contraintes et possibilités de valorisation des ressources naturelles dans le sud du bassin arachidier (Siné Saloum, Sénégal)

M. SENE¹, P. PEREZ²

1. ISRA BP 199 Kaolack, Sénégal

2. CIRAD BP 5035, 34032 Montpellier Cedex, France

La stabilisation de l'écosystème, nécessaire à une exploitation agricole viable et durable, devient primordiale dans le bassin arachidier du Sénégal. En effet, parmi les trois sécheresses rencontrées au cours de ce siècle, celle relative aux vingt dernières années a eu les effets les plus pervers sur le plan écologique [1]. Le déficit pluviométrique ne saurait toutefois être le seul élément explicatif de la situation de crise généralisée.

Cette période a été caractérisée par une évolution importante des systèmes de production avec surexploitation du milieu. Le développement de la culture de l'arachide a favorisé la mécanisation. Cela a entraîné, l'accroissement démographique aidant, l'extension progressive suivant un gradient Nord-Sud des surfaces cultivées au détriment des zones de parcours et de forêts.

La disparition de la jachère et des zones de parcours aux dépens d'une intégration agriculture-élevage et la déforestation ont provoqué un déséquilibre du milieu que la sécheresse est venue exacerber.

Par conséquent, dans le Sud Siné Saloum, les sols peu structurés et à faible pouvoir tampon [2] sont soumis à une dégradation qui a atteint un niveau alarmant. Compte-tenu de l'appauvrissement du couvert végétal, cette dégradation s'exprime à travers une érosion

hydrique résultant d'un ruissellement généralisé, et une baisse de la fertilité que traduisent une chute du statut organique et une acidification des sols de cultures (figure 1). Ces contraintes à la production agricole ont été clairement identifiées et exprimées par les paysans eux-mêmes à travers une enquête exploratoire réalisée dans la région [3].

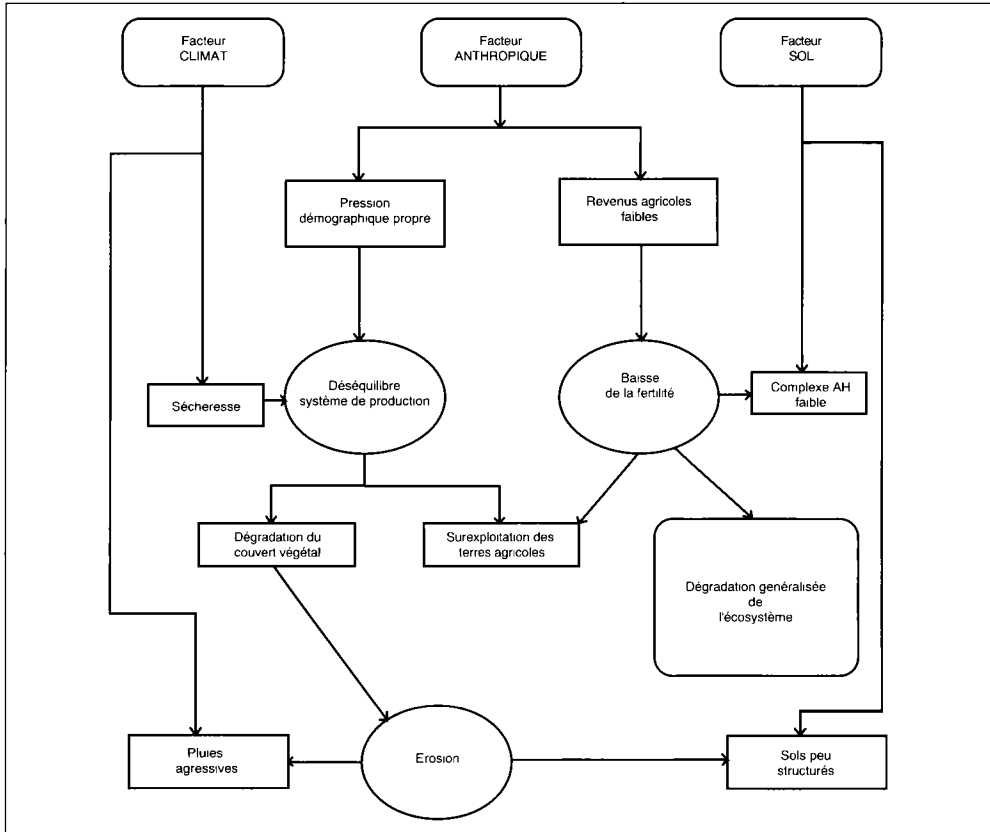


Figure 1. Schéma général de dégradation de l'écosystème sud Siné Saloum.

La recherche doit intégrer la capacité de prise en charge de ces derniers, dans le contexte actuel d'une agriculture de moins en moins subventionnée. Il s'agira de privilégier le milieu réel pour la mise au point de solutions appropriées, s'appuyant sur la valorisation des ressources naturelles disponibles. C'est dans ce sens que des études sont menées depuis 1983 dans la communauté rurale de Kaymor, à 30 km à l'Est de Nioro du Rip, en vue d'améliorer la gestion des ressources en eau et en sol.

Ce document fait le point des travaux en mettant un accent tout particulier sur :

- la caractérisation des processus de dégradation des ressources naturelles ;
- l'inventaire des possibilités de valorisation de ces ressources ;
- l'évaluation de l'impact des différents aménagements sur le milieu et sur les productions agricoles.

Approche méthodologique

Des contingences déterminantes

La complexité des facteurs interagissants nécessite une approche globale du problème. Dès 1983, l'ISRA, le CIRAD et l'ORSTOM ont mis sur pied une équipe pluridisciplinaire chargée, dans un premier temps, de diagnostiquer et de quantifier les phénomènes de dégradation du milieu, puis de proposer et d'évaluer des solutions de gestion.

Cette pluridisciplinarité met en lumière les problèmes d'échelle et d'unité de mesure, classiques en hydrologie ou morphopédologie [4]. A chaque niveau de perception (le mètre carré, la parcelle ou le bassin versant) correspond un outil d'analyse dont les résultats sont limités spatialement et temporellement, ce qui implique une certaine "discrétisation" dans la compréhension des phénomènes.

Ce constat est applicable également à la perception qu'en ont les populations locales. L'impraticabilité d'une voie de communication, la stérilisation d'une parcelle, la stagnation des rendements entraînent une prise de conscience limitée des problèmes. Mais rien ne relie ces observations ponctuelles, et, trop souvent, l'effort de réflexion débouche sur une mise en accusation du désengagement de l'Etat (arrêt des subventions agricoles, obsolescence des infrastructures rurales).

Dans un premier temps, l'équipe de recherche a donc entrepris une action de sensibilisation sur les modes de fonctionnement du paysage agraire le long d'une toposéquence. Phase essentielle pour préparer la seconde, qui vise la stabilisation du terroir villageois, c'est-à-dire limiter les mouvements de surface (eau et particules solides) et cicatriser les zones les plus érodées (ravines). Il est ensuite possible d'entreprendre des actions de régénération de la fertilité des sols.

Forts de l'expérience de nombreux projets d'aménagement en Afrique de l'Ouest [5], les travaux menés au Siné Saloum tendent à transférer des méthodes de gestion des ressources naturelles, satisfaisant les principaux critères techniques mais surtout minimisant les risques de rejet par les producteurs.

Le dispositif expérimental

A l'échelle du mètre carré, quatre campagnes de simulations de pluie ont été réalisées sur les divers états de surface rencontrés dans la zone afin de quantifier l'impact des phénomènes de battance sur l'infiltration. Parallèlement, sous pluie naturelle, des parcelles de ruissellement de 1 m² ont été installées dans les champs et équipées d'un dispositif tensionneutronique, afin de suivre l'évolution du bilan hydrique des cultures (chronique 86-92).

L'amélioration des états de surface, à l'échelle de la parcelle, nécessite l'utilisation de "binômes" (travail du sol x matière organique) efficaces et transférables. Actuellement, les pratiques de travail du sol en sec, façon culturale de prélevée et apport de compost (ou fumier), sont testées dans des essais longue durée, en milieu paysan, sur plusieurs sites agroécologiques (Ndimb Taba, Darou Khoudoss, Ndiba). Ces mêmes tests sont repris en milieu contrôlé (Papem) sur des parcelles de ruissellement de 50 m², équipées de dispositifs tensionneutroniques et de bougies de prélèvement, afin d'étudier plus finement la

liaison érosion/baisse de fertilité. Le maintien de la fertilité passe par une restitution minimale au sol, compatible avec les disponibles en biomasse produite. Aussi, une enquête pluriannuelle permet de quantifier ces disponibles sur plusieurs sites. Des tests sur les techniques de compostage tentent d'améliorer la qualité du produit fini.

Deux micro-bassins versants de 2,5 ha chacun, situés sur sols du bas-glacis (S4) et sablo-argileux, superficiels, de haut-glacis (S5), permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale et d'associer techniques de stabilisation (haies vives, seuils pierreux, fascines) et amélioration de l'itinéraire technique depuis 1988. L'impact de l'aménagement intégré est suivi par bilan hydrologique (83-92) et analyse géostatistique des données agronomiques et hydropédologiques (87-92).

L'échelle du km² est atteinte avec le bassin versant S2, d'une superficie de 0,6 km², qui intègre une toposéquence complète sur sols ferrugineux lessivés (figure 2). De 1983 à 1987, un suivi hydrologique complet, en conditions naturelles, a été réalisé.

L'aménagement du bassin versant, commencé en 1988, comprend en 1991 :

- 9000 plants répartis en 13 haies vives, totalisant 4000 mètres linéaires ;
- 1 cordon de pierre complété par des ouvrages filtrants ponctuels en haut de toposéquence ;
- stabilisation de ravines par végétalisation et empièvements en zone cultivée ;
- introduction progressive des itinéraires techniques améliorés.

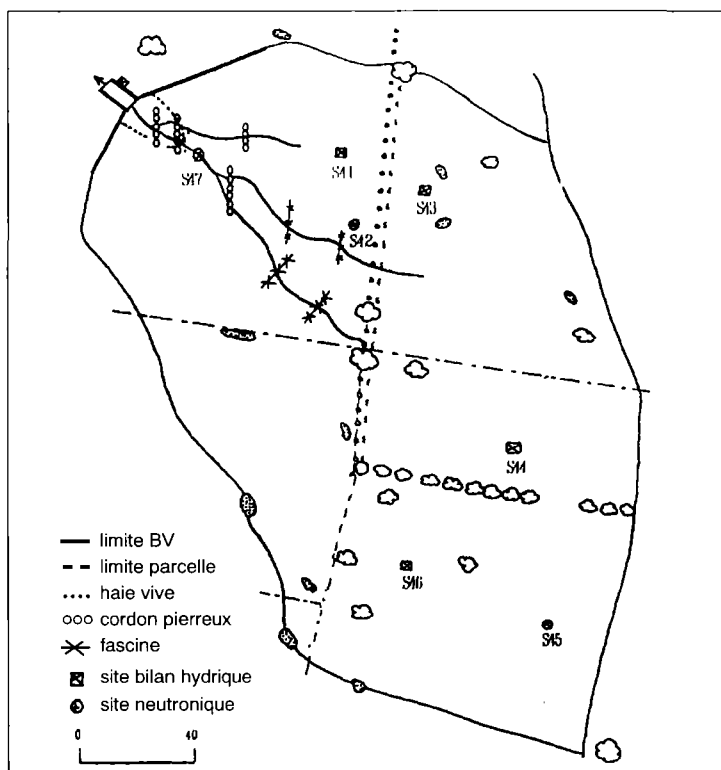


Figure 2a. Micro bassin versant (S4) (2,5 ha). Aménagements et sites de mesure.

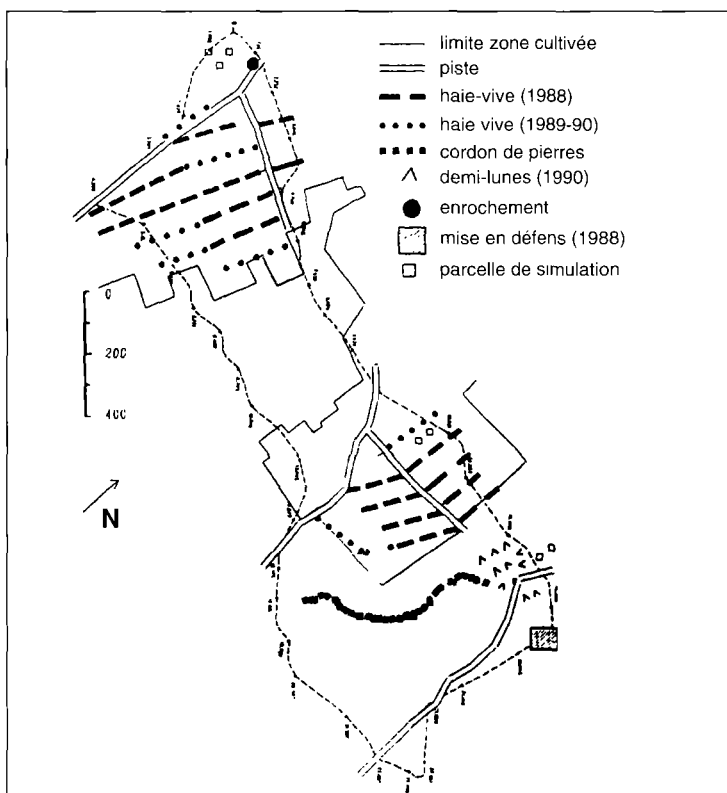


Figure 2b. Bassin versant S2 (0,6 km²). Aménagements réalisés.

Le suivi hydrologique se poursuit, en comparaison avec le bassin versant S3 (0,9 km²) non aménagé. Les données agronomiques de toutes les parcelles sont enregistrées. L'étude des écoulements de surface à l'échelle du bassin versant est menée grâce à un réseau de minipièges.

Résultats et discussion

L'ampleur de la dégradation actuelle

La variation des indices pluviométriques du vecteur régional (figure 3) confirme la rupture dans le régime des pluies à partir de 1968 [6]. La moyenne 1932-1988 au poste du Papem est estimée à 800 mm mais chute à 654 mm pour la série 1970-1990, avec de fortes variations interannuelles. Durant cette période, la valeur de décennale sèche (539 mm) est atteinte six fois ! Ce déficit se répercute à tous les niveaux du cycle de l'eau. Dans le même temps, l'agressivité moyenne des pluies a peu diminué, l'indice de dégradation spécifique reste élevé ($I = 112$, moyenne 70-90). En effet, la probabilité d'occurrence des

précipitations journalières maximales, pour un poste donné, est peu affectée par la diminution de la pluviosité. Ce résultat témoigne du caractère erratique des pluies exceptionnelles [7].

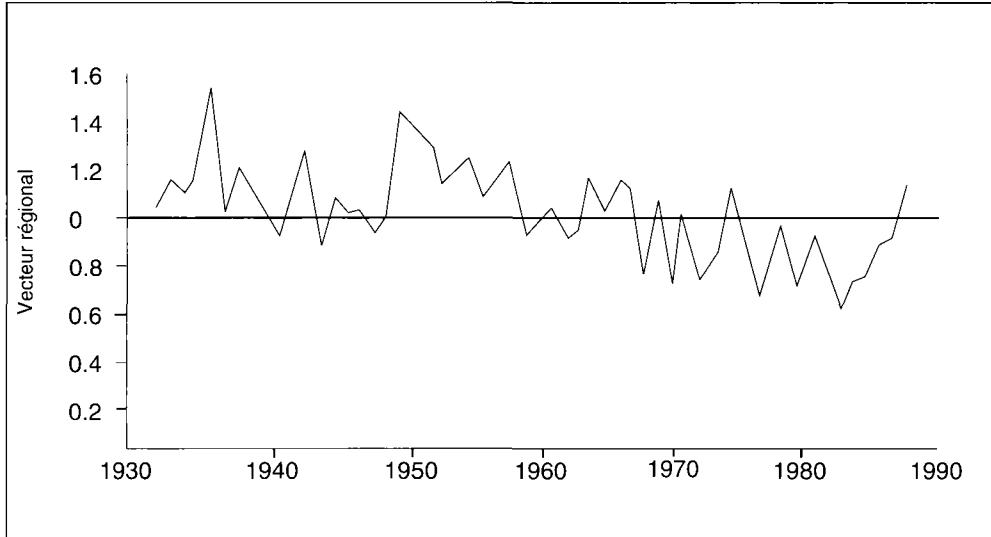


Figure 3. Variation des indices pluviométriques du vecteur régional. Période 1930-1990. Sud Siné Saloum.

Pendant la même période, le paysage subit une déforestation intensive qui dénude le modelé mou des plateaux résiduels et de leurs glacis ferruginisés. La forêt sèche soudanienne subsiste, très dégradée sur les bordures cuirassées des plateaux et une mince galerie souligne les bas-fonds, légèrement encaissés. Entre 1970 et 1983, on a assisté au doublement des terres mises en culture et à la généralisation de la rotation mil/arachide continue. La confirmation apportée en 1988 [8] souligne l'aspect durable et irréversible de la pression foncière.

Valet [9] démontre, en utilisant la carte morphopédologique de la région, que 41 % des zones de forêts et parcours occupaient des sols à bon potentiel agricole en 1970. En 1983, les espaces de parcours sont situés, pour 76 %, sur des sols impropres à la culture. Avec la disparition de la jachère, la réserve foncière en 1983 peut être estimée à 13 % de bons sols agricoles. Cette réserve est pratiquement consommée en 1991, comme le montre la figure 4 représentant l'évolution de l'occupation des sols du bassin versant S2 (0,6 km²).

Cette tendance entraîne deux conséquences perverses : une exposition trop importante des sols en début d'hivernage et un déficit de restitution organique, d'où une baisse conjointe des fertilités physiques et chimiques. Le tableau I présente les caractéristiques principales d'un sol ferrugineux, situé sur le glacis-versant subactuel, en culture continue depuis 1970 (Papem).

Tableau I. Principales caractéristiques physico-chimiques d'un sol ferrugineux de versant, mis en culture depuis 1970.

Horizon cm	Granulométrie					IG ¹	K ²	d g/cm ²	pH eau	MO %	Ntotal %	C/N	P ₂ O ₅ ppm	CEC meq%
	A	I.f	Lg	Sf	Sg									
0-5	4,1	2,7	14,1	47,2	31,9	0,52	0,15	1,55	5,7	0,43	0,25	9-10	20	2,0
15-25	10,2	3,1	13,1	42,6	30,8	0,55	0,15	1,40	4,9	0,35	0,25	8-9	5	2,5

1. IG = Sg/Sg + 1 g.

2. K = indice d'érodibilité.

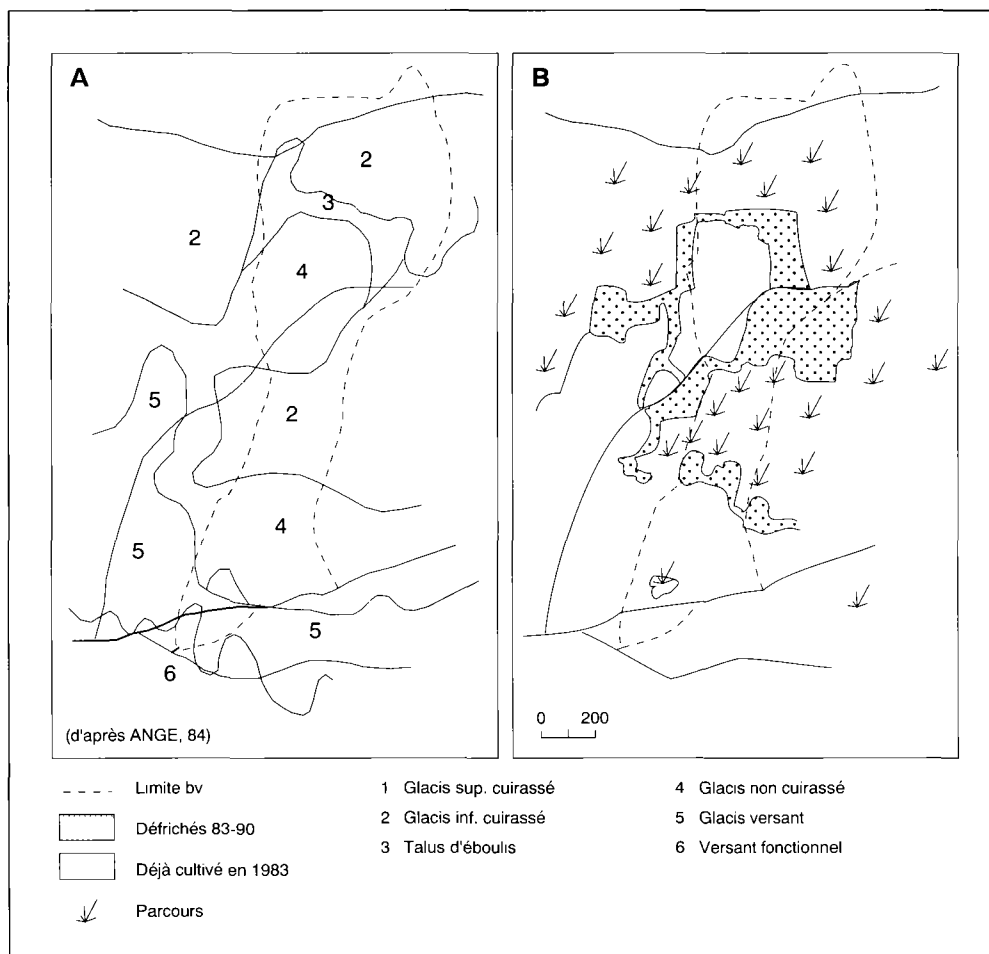


Figure 4. Caractéristiques morphopédologiques (A) et évolution de l'occupation des sols 1983-1990 (B). Bassin versant S2 (0,6 km²).

Si l'indice d'érodibilité indique une relative stabilité [10,2], l'étalement de la phase sableuse et l'indice granulométrique soulignent l'aptitude aux réorganisations de surface et à la compaction : le comportement hydrodynamique de ces sols est gouverné par les phénomènes de battance et d'encroûtement de surface [11]. Les campagnes de simulation de pluie (1 m²) effectuées sur les principaux faciès morphopédologiques de la zone témoignent de l'importance du ruissellement sur les différentes unités (tableau II). On note que l'aptitude au ruissellement décroît du haut vers le bas de la toposéquence, fonction des capacités d'induration. Localement, cette hiérarchisation est nuancée par l'anthropisation des surfaces (type de culture, itinéraire technique, taux d'enherbement).

Appréhendées sous l'angle agronomique, à l'échelle de l'année, ces pertes représentent un abattement de 10 à 40 % de la pluviométrie brute — selon le site et l'année — sur les meilleures terres agricoles (figure 5). Ce terme ne peut être négligé lors de l'établissement du bilan hydrique cultural [12].

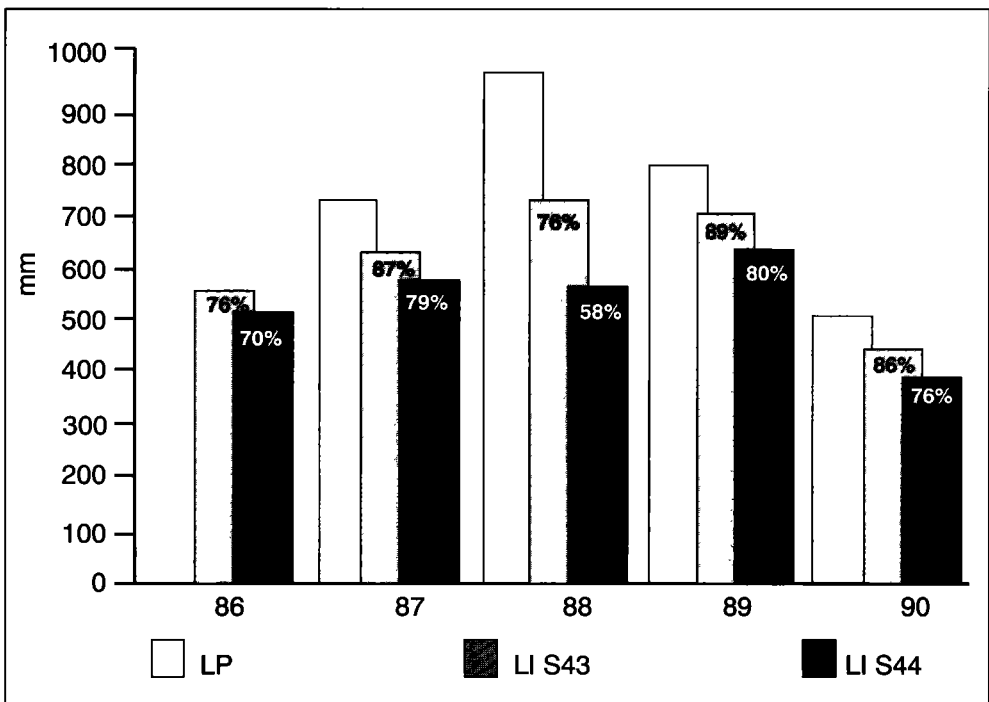


Figure 5. Lames précipitées (LP) et infiltrées (LI) annuelles. Sites S43 et S44 (1 m²).

Paradoxalement, la plupart de ces sols possèdent de bonnes caractéristiques hydrodynamiques internes, la conductivité hydraulique à saturation (Ks) dans les horizons de surface avoisinant 60 mm/h pour atteindre 25 mm/h en profondeur [11]. Le drainage vertical est donc favorisé et participe à la lixiviation rapide des éléments minéraux. On constate alors un appauvrissement latéral (ruissellement) et vertical (drainage) du profil

cultural, dû aux pertes en colloïdes organiques et minéraux et à la migration des cations échangeables (tableau I). L'absence de restitutions organiques ou minérales, en milieu paysan, accélère le processus [13].

Tableau II. Simulations de pluies - Lames infiltrées (LI) et coefficients de ruissellement (KR).

Type averse	Durée moyenne ressuyage h	Site 1 parc 2		Site 1 parc 3		Site 2 parc 5		Site 2 parc 6		Site 3 parc 7		Site 3 parc 9	
		LI	KR	LI	KR	LI	KR	LI	KR	LI	KR	LI	KR
a	sec	74,3	23	86,6	10	41,3	57	60,0	38	14,6	96	41,3	57
b	72	36,7	40	56,8	8	25,3	59	44,1	29	11,9	81	20,0	68
c	10	25,9	58	55,6	10	13,0	79	34,2	45	6,3	90	14,6	76
d	48	26,7	57	61,8	13	14,3	77	40,2	35	7,2	88	16,8	68
e	10	41,4	57	61,8	5	14,3	85	36,9	62	5,3	95	15,4	84

Caractéristiques : S1P2 = bas versant, champ précédent arachide

S1P3 = bas versant, champ enherbé précédent mil

S1P5 = mi-versant, champ précédent arachide

S1P6 = mi-versant, jachère enherbée

S3P7 = plateau, sol dénudé avec croute d'érosion

S3P9 = plateau, sol dénudé à graviers et cailloux.

Outre l'abandon conjoncturel de la fumure minérale, le déficit de restitution procède de deux causes synergiques : une exportation croissante des résidus de récolte et un faible potentiel de fumure organique. En effet, malgré une baisse sensible du cheptel bovin depuis 1974, la pression sur les zones de parcours et forêts avoisine 1,0 UBT/ha, en excluant petits ruminants et paires de bœufs remises au troupeau. Supportable pendant l'hivernage, cette pression, située bien au-delà du seuil de tolérance de 0,3 UBT/ha, devient désastreuse en saison sèche. Le déficit de consommation ne peut être comblé entièrement par les résidus de récolte puisqu'il y a concurrence avec le cheptel intégré, voire avec la vente de "fanés", source intéressante de trésorerie [14,15]. Actuellement, le déséquilibre est patent et pèse sur toute tentative de gestion des ressources naturelles.

La solution consistant à prôner une hypothétique "fumure organique rationnelle" apte à redresser les rendements, donc la production de biomasse résiduelle, et enfin à combler le déficit fourrager, doit tenir compte des ordres de grandeur en jeu.

Les enquêtes sur les systèmes d'exploitation, menées dans plusieurs villages entre 1982 et 1988, montrent que les parcelles fumées (parcage ou apport de fumier) représentent 2 à 3 % des surfaces cultivées, possédées par des propriétaires de troupeaux. Les doses sont alors considérables, de 10 à 16 t/ha, et intéressent souvent les mêmes soles. Une simple optimisation des disponibles d'origine animale existants ne peut espérer amener les surfaces fumées à plus de 6 % du total [16,17].

Ce constat, pour austère qu'il soit, ne doit pas conduire au pessimisme, car des potentialités existent, qui demandent à être valorisées.

Les potentialités de valorisation existantes

La lutte anti-érosive

Le ruissellement, en nappe ou concentré, conditionne l'érosion hydrique. Son contrôle nécessite un maillage du paysage, constitué par des dispositifs filtrants permettant de dissiper l'énergie et d'améliorer l'infiltration de l'eau pluviale. Les caractéristiques des principaux dispositifs étant décrites par ailleurs [18], nous nous limiterons, ici, à faire ressortir la logique d'aménagement.

Les zones d'affleurement de cuirasse, riches en blocs de démantèlement, représentent près de 15 % des surfaces, le plus souvent non appropriées puisque réservées aux parcours. On les retrouve en bordure de plateau ou sur les glacis de raccordement. Les facteurs limitant leur exploitation résident dans les possibilités de transport, le taux d'équipement en charrettes ne dépassant pas 60 à 70 % des exploitations agricoles [17,19], et dans les volumes de pierres nécessaires, 8 m³ pour 100 mètres de cordon pierreux. Leur utilisation est donc réservée aux sites proches des gisements, correspondant souvent aux limites de la zone cultivée et aux pentes les plus prononcées (cordons de pierre, demi-lunes...). Toutefois, des seuils en pierre, voire des ouvrages en gabion, sont nécessaires dans les paysages d'eau importants, quelle que soit la distance.

Le maillage des terres agricoles est alors constitué d'un réseau de haies vives isohypses. Leur efficacité anti-érosive est assurée par l'adjonction d'une ligne d'arrêt herbacée, en amont, et d'un andain de résidus de récolte entre les deux (nettoyage des parcelles 5 mètres de part et d'autre) dès la seconde année d'implantation. Les taux de réussite, sans mise en défens, plaident en faveur d'une haie épineuse durant les premières années, progressivement enrichie par les légumineuses arbustives (*Leucaena leucocephala*) par la suite. Les résultats sont toutefois fortement corrélés avec les conditions de mise en place [20] (tableaux III a et III b). D'un point de vue social, la haie vive est ressentie comme une contrainte à la culture attelée, malgré des écartements corrects (50 à 70 mètres) : son acceptation passe par le renforcement de l'aspect fourrager, et l'appropriation des méthodes de gestion (taille, andainage).

Une fois le maillage mis en place, il reste à lutter contre le refus à l'infiltration des sols de culture, moteur du ruissellement. Pour ce faire, il faut tenir compte des contraintes paysannes, limitant la capacité de prise en charge. L'analyse des calendriers culturels, dépendant des conditions pluviométriques et du niveau d'équipement, conduit à proposer un travail du sol, à la dent, en traction bovine, en conditions sèches. Cette opération culturale constitue une alternative acceptable à des travaux du sol plus contraignants, tels que le labour [21].

Compte-tenu du manque de structure des sols, l'effet de ce travail s'estompe assez vite ; il est possible de le renforcer par des opérations constituant une faible surcharge de travail : le sarclo-buttage de prélevé (radou baligne), en culture arachidière, et le pseudo-buttage précoce, en culture de mil. Le micro-relief obtenu (5 à 10 cm) est efficace contre le ruissellement pendant près de 30 jours, en début de cycle, avant que la végétation ne prenne le relais [21]. L'adoption du travail du sol en sec ne sera effective qu'en assurant une efficacité durable, quel que soit l'hivernage, et un impact agronomique certain

compensant le coût en main-d'œuvre (12 h/ha en moyenne), en effort (effort de traction instantané : 100 daN en moyenne) et en investissement. Cela n'est possible qu'en associant travail du sol et fumure organique, fertilités physiques et chimiques.

Tableau III a. Taux de survie, toutes pièces confondues, en fonction de l'année de plantation [20].

Année de plantation	Effectif	Pluviométrie (mm)	Taux de survie (%)		
			1989	1990	1991
1988	4300	1029	91	85	84
1989	2098	707	-	73	70
1990	403	439	-	-	35

Tableau III b. Croissances cumulées, toutes espèces confondues, des plants mis en place en 1988, en fonction du site d'implantation [20].

Site	Sol	Taille moyenne (cm)				Effectif
		1988	1989	1990	1991	
S4 - terrasse alluviale	sableux profond	45	100	166	177	138
S2 - glacis versant	sablo-argileux, >1m	41	87	146	148	1851
S2 - glacis d'épandage	argilo-sableux, gravillonnaire	30	64	119	132	909
S5 - glacis d'érosion	argilo-sableux, superficiel	31	75	101	104	128

La valorisation des disponibilités biologiques

Augmenter la fertilité revient à accroître les apports de fumure organique. Nous avons vu que les disponibilités d'origine animale sont limitées ; en écartant la possibilité de développement du cheptel actuel, la solution passe par une augmentation du volume final de matière organique végétale apportée. Cet objectif peut être atteint par plusieurs procédés complémentaires : création d'étables fumières, valorisation des déchets ménagers, compostage des résidus de récolte. Les deux premiers procédés permettent de doubler les capacités de fumure actuelles, soit, pour une exploitation moyenne, un potentiel de 5 t/ha de matière organique sèche [15]. Une partie de ce stock peut être utilisée pour ensemercer les fosses compostières, creusées en bordure des champs.

Dans la zone d'étude, les enquêtes menées pendant trois ans ont permis de se faire une idée plus précise sur l'évolution des résidus post-récolte. Les facteurs de variation des disponibles incluent les types de sols (situations morphopédologiques et niveau d'intensification), les conditions pluviométriques, l'utilisation pour les besoins domestiques et par les animaux, mais aussi le précédent cultural. Dans ce système de culture largement dominé par la rotation arachide/mil, les résidus culturaux concernent

presque exclusivement les précédents en mil, les fanes d'arachide étant entièrement exportées. Sur parcelles de mil, les quantités disponibles mesurées en 1989 et 1990 au niveau de trois terroirs villageois varient entre 3 et 4 t/ha sur les champs de case et entre 2 et 3 t/ha sur les champs de brousse (tableau IV).

Cette bonne disponibilité en résidus de cultures, comparée au Centre Nord du bassin arachidier où ces quantités dépassent rarement 1 t/ha [22], représente entre 60 et 70 % des rendements en biomasse juste après la récolte. Toutefois, l'occurrence d'un feu de brousse à l'échelle d'un terroir villageois peut anéantir ces quantités (cas de Ndimb Taba en 1990). La restitution de cette matière organique sous forme de compost d'hivernage produit *in situ* est une gestion plus rationnelle que le système de nettoyage-brûlage pratiqué généralement par les paysans.

Une exploitation agricole gérant 8 ha, en rotation mil/arachide, dispose donc, avant nettoyage des parcelles, de 10 tonnes de matière sèche compostable ; soit, à peu près, 7 à 8 tonnes de compost utilisables l'année suivante, auxquelles s'ajoutent 2 à 3 tonnes de fumier amélioré. A raison de 5 t/ha, l'agriculteur peut traiter 25 % de sa superficie chaque année, en plus des éventuelles parcelles parquées.

Enfin, les zones de parcours, malgré des conditions pédoclimatiques sévères, possèdent de bonnes capacités de régénération naturelle si on les soustrait temporairement à la pression humaine et animale [23,24]. Une meilleure gestion peut permettre d'accroître sensiblement le disponible fourrager, mais le système de vaine-pâturage est un frein à la responsabilisation des éleveurs et bergers.

Tableau IV. Quantité de résidus culturels (mil) en fonction du type de sol et du niveau d'intensification, 1989 et 1990. Rendement en kg/ha.

Village	Type de sol	Rendement			
		Champs de case		Champs de brousse	
		1989	1990	1989	1990
Darou Khoudoss	Plateau	3050	2610	1860	2315
Ndiba	Glacis	4340	3805	3280	3120
Ndimbtaba	Terrasse	3320	3512 ¹	2500	3422

Période de mesure : début avril.

1. Estimation février 1990 (feu de brousse).

Impact des aménagements

Du mètre carré à la parcelle

L'amélioration de l'infiltration par le travail à la dent en sec a été démontré, sous simulation de pluies, sur sol sablo-argileux (Papem). Un protocole de trois pluies ($L_p = 35$ mm) est réalisé sur quatre états de surface : précédent mil ou arachide, sol travaillé ou non ; on dispose de deux répétitions.

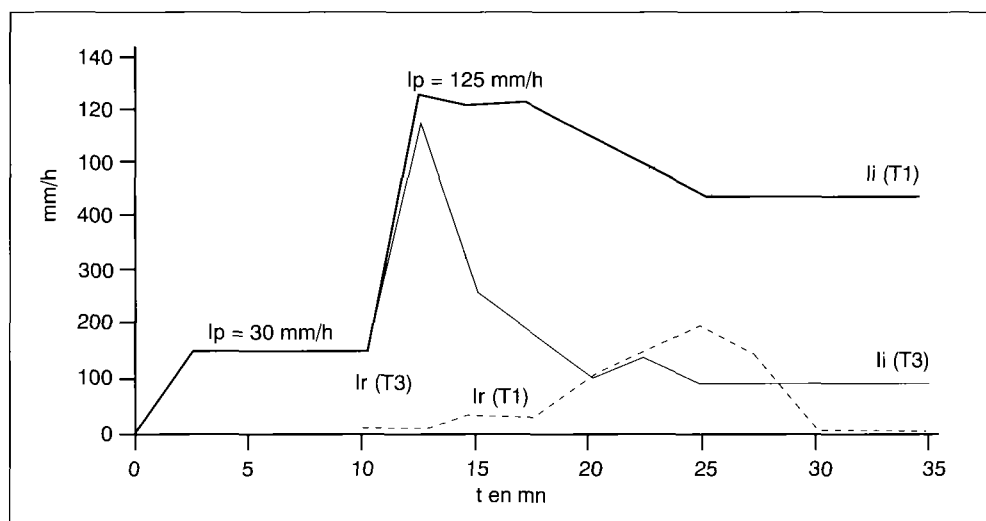


Figure 6. Intensités d'infiltration (Ii) et de ruissellement (Ir), lors de la pluie P2. Parcelles travaillée (T1) et témoin (T3).

Pour une lame précipitée cumulée de 105 mm, le coefficient de ruissellement (Kr) moyen sur parcelle non travaillée, quel que soit le précédent, avoisine 32 %. Le travail à la dent (profondeur 12-15 cm, écartement 45 cm) permet de ramener le coefficient à 9 % sur précédent arachide et 4 % sur précédent mil. L'effet de la tranchée, lors de la seconde pluie (P2), revient à inverser les courbes d'intensité de ruissellement et d'infiltration (figure 6). En fin de protocole, les coefficients de rugosité sont équivalents, 1 à 3 %, quel que soit l'historique de la parcelle. Seules quelques zones de croûtes structurales, orientées, témoignent de l'emplacement d'anciennes mottes décimétriques dues au travail du sol.

Les conséquences agronomiques ont été étudiées, en 1989, sur un sol sablo-argileux gravillonnaire cultivé en arachide (var. 73-33). L'essai comprend deux blocs randomisés, sans répétition et cinq traitements : témoin non travaillé et quatre prototypes de dents [25]. Le total pluviométrique est satisfaisant ($P = 780$ mm), la campagne se caractérise par un démarrage rapide en juin et une bonne régularité des précipitations (58 jours pluvieux) permettant un semis précoce le 15.06.

La profondeur de travail, voisine de 10 cm, permet d'obtenir une rugosité de l'ordre de 15 % et un taux d'occupation du sol par les mottes de 16 % en moyenne. Le gain d'infiltration, après un cumul pluviométrique de 117 mm (17.06.89) répartis en trois événements, est estimé à 10 mm. L'implantation racinaire est favorisée et se traduit par un gain de production total (fanés + gousses) supérieur à 600 kg/ha et une augmentation du rendement en gousse de 19 à 30 % (tableau V). La même année, sur sol argilo-sableux de plateau, Dugué observe un accroissement de production de grains de 55 % sur mil Souna III (témoin : 300 kg/ha) allant jusqu'à 115 % lorsque le travail en sec est suivi d'un micro-buttage précoce de la céréale [26]. En 1990, par contre, l'hivernage s'installe tardivement (15.07), une période trop longue sépare la date de travail en sec de la première pluie utile ;

le relief créé est comblé par des apports sableux éoliens. Ceci explique le faible impact des itinéraires techniques améliorés testés.

Tableau V. Productions (kg/ha) sur les sites 1 et 2, pour les traitements témoin (10) et travaillé (11). Bassin versant S2, 1989.

Site	Traitement	Fanes		Gousses		Production totale	
		m	sd	m	sd	m	sd
1	T ₀	1867	99	1741	86	3608	184
	T ₁	2395	422	2064	271	4458	465
2	T ₀	1681	158	1432	122	3313	276
	T ₁	2094	297	1841	127	3935	389

De la parcelle au bassin versant

L'intégration des techniques culturales et d'aménagement au sein des micro-bassins versants S4 et S5 a permis de limiter les mouvements de surface et de régénérer les zones de collature les plus dégradées.

Le bilan hydrologique présenté dans le tableau VI indique un abattement de 25 % du coefficient de ruissellement et une nette diminution du charriage, après aménagement. L'objectif de réduction de l'énergie cinétique de la lame ruisselée est donc atteint. L'examen individuel des pluies démontre un effet régulateur sur les événements moyens (Kr = 10 à 15 %) mais souligne également l'inefficacité de l'aménagement pour les événements exceptionnels.

Une étude géostatistique des stocks hydriques, en cours depuis 1987, permet d'appréhender les reports d'eau internes du bassin versant S4 et met en évidence une forte accumulation dans la zone des cordons pierreux et fascines, en aval du bassin versant.

Tableau VI. Bilans hydrologiques annuels du bassin versant S4 (2,5 ha) - sol sableux de terrasse. Période 1985-1987 : conditions naturelles ; période 1988-1990 : bassin versant aménagé.

Année	Lp ⁽¹⁾ (mm)	Lr ⁽²⁾ (mm)	Kr ⁽³⁾ (mm)	Charriage (t)	Evénements exceptionnels
1985	631	34	5,4	-	Lp = 73 I _s ⁽⁴⁾ = 150 (19/07)
1986	722	38	5,2	11,8	Lp = 112 I _s = 170
1987	719	16	2,2	1,7	aucun
1988	935	39	4,2	1,0	Lp = 83 I _s = 166 (13/07)
1989	772	4	0,5	0,1	aucun
1990	488	27	5,5	0,3	Lp = 53 I _s = 175 (17/07)
85-87	2072	88	4,2	-	
88-90	2195	70	3,2	1,4	

⁽¹⁾ Lp = lame précipitée.

⁽²⁾ Lr = lame ruisselée.

⁽³⁾ Kr = coefficient de ruissellement.

⁽⁴⁾ I_s = intensité en 5 mm.

Le suivi tensionneutronique indique, en 1990, un excédent d'infiltration en début d'hivernage d'environ 100 mm dans cette zone.

D'un point de vue agronomique, l'aménagement intégré a permis de régénérer les zones de collature en voie de stérilisation, et d'homogénéiser progressivement les rendements sur l'ensemble des parcelles. En 1991, les rendements en arachide avoisinent 703 kg/ha (cv = 23 %) dans la partie amont du bassin et 837 kg/ha (cv = 29 %) en aval de la haie vive. Globalement, le potentiel de production du bassin versant est donc amélioré, et semble s'écarter des moyennes de rendements calculées en champs paysans sur le même terroir villageois.

Toutefois, un gain substantiel sera obtenu lorsque l'itinéraire technique amélioré permettra de valoriser pleinement le surplus hydrique disponible. L'essentiel de l'effort porte sur l'amélioration des qualités physico-chimiques du compost localisé lors du travail à dent. Actuellement, le compost produit en bordure de champs, sans irrigation de complément, contient de 0,4 à 0,6 % d'azote total, de 0,6 à 1,0 % de phosphore assimilable (P_2O_5) et 0,5 % de potasse (K_2O), rapportés au poids de matière sèche. Les teneurs en calcium avoisinent 0,3 % (CaO), le taux de pollution par la silice est variable mais toujours supérieur à 50 %. Une diminution des pertes par lixiviation lors du compostage (plancher de rachis de mil) et un enrichissement en phosphates naturels locaux doivent permettre d'approcher les teneurs obtenues avec un fumier bovin : 1,4 % d'azote, 0,5 % de phosphore (P_2O_5) et 2 % de potasse (K_2O) rapporté au poids de matière sèche, silice comprise [27].

A l'échelle du kilomètre carré (bassin versant S2), l'analyse des données est en cours. Qualitativement, aucune aggravation de l'érosion linéaire n'est observable après aménagement, contrairement aux bassins versants voisins. Cependant, en terme de bilan hydrologique, divers processus antagonistes sont à prendre en compte : poursuite du défrichage en amont du bassin, instabilité pluriannuelle de l'assolement, feux de brousse...

La série pluviométrique étudiée devra être plus longue, à cette échelle, pour quantifier l'impact de l'aménagement. De même, l'adoption majoritaire de l'itinéraire technique amélioré demandera plus de temps. Pendant la période 1987-1990, le pourcentage de parcelles semées de manière isohypse est passé de 14 à 90 %, celui des parcelles préparées en sec de 1 à 20 %. Mais, dans le même temps, les surfaces cultivées se sont accrues de 35 % au détriment des zones de parcours.

Conclusion

Dans le sud du bassin arachidier, la précarité des ressources en eau et en sol constitue un facteur déterminant dans le déséquilibre écologique actuel. Des systèmes de production viables et durables nécessitent à l'évidence la levée de ces deux contraintes.

Concernant la lutte anti-érosive, l'aménagement intégré allie dispositifs classiques et techniques culturales. Il favorise la régénération des zones en voie de stérilisation et doit, à terme, améliorer la production agricole à l'échelle du bassin versant. Cela traduit en fait

l'abattement des coefficients de ruissellement, la nette diminution du charriage et, corrélairement, l'augmentation des stocks hydriques du sol.

Sur le plan de la fertilité chimique, la restitution sous forme de compostage d'hivernage est un axe privilégié d'amendement, compte-tenu de la contribution limitée de la fumure animale et de l'absence d'engrais. Le contexte de ruissellement généralisé impose cependant une bonne gestion de cette fumure dont les qualités chimiques et physiques doivent être améliorées.

Malgré l'importance des acquis, il reste à préciser un certain nombre de points essentiels. En fait, les perspectives se posent en double terme de recherche et de développement : d'une part, en matière de recherche, l'évaluation des systèmes de porosité devrait permettre de mieux appréhender les phénomènes d'encroûtement de surface et, par conséquent, les processus de recharge des réserves hydriques des sols ; d'autre part, il est opportun, pour le développement, d'étudier les possibilités de transfert des résultats acquis. La reproductibilité exige des efforts d'autant plus considérables que la vulgarisation, en matière de gestion des ressources naturelles, constitue une démarche nouvelle, globale et participative, éloignée des schémas conventionnels de suivi-évaluation.

Références

1. Rognon P. (1991). Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires. *Sécheresse* 1991 ; (2) : 199-210.
2. Charreau C., Nicou R. (1971). L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Bulletin agronomique* n° 23, CIRAD-CA, 254 p.
3. Faye A., Niang L. Sarr D., Thiam A. (1985). Etude monographique de la communauté rurale de Kaymor. ISRA, doc. multigr., 30 p.
4. Casenave A., Valentin C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Coll. didactique. ORSTOM/Paris, 229 p.
5. Rochette R.M. (1989). Le Sahel en lutte contre la désertification. Leçons d'expériences. CILSS/GT2, Weikershein, Margraf ed., 592 p.
6. Dacosta H. (1991). Synthèse hydrologique 83-88 des bassins versants de Thyssé Kaymor. UR2B, ORSTOM/Dakar, doc. multigr., 125 p.
7. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques. Thèse doct. Univ. Paris VI, doc. multigr., 336 p.
8. Pérez V., Séguis L. (1991). Essai de caractérisation des bas-fonds par l'utilisation de la télédétection spatiale. Siné Saloum, Sénégal. UR2B, ORSTOM/Dakar, doc. multigr., 17 p.
9. Valet S. (1985). Notice explicative de la carte d'occupation comparative des sols en 1970 et 1983. Région de Thyse Kaymor (Siné Saloum, Sénégal). CIRAD-CA/Montpellier, doc. multigr., 52 p.
10. Roose E. (1977). Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et doc. ORSTOM n° 78, ORSTOM/Paris ed., 108 p.

11. Albergel J., Bernard A., Ruelle P., Touma J. (1989). Hydrodynamique des sols des bassins versants expérimentaux de Thyssé Kaymor. UR2B, ORSTOM Dakar, doc. multigr., 29 p.
12. Albergel J., Pérez P., Vaksman M. (1991). Gestion agricole des pluies au Sahel. Une méthode d'estimation du ruissellement dans le bilan hydrique des cultures. Actes du colloque AISH, Niamey, AISH ed.
13. Piéri C. (1989). Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération/CIRAD-CA, Documentation française (Paris).
14. Benoit-Cattin M. (1986). Les unités expérimentales du Sénégal. ISRA/CIRAD/FAC. CIRAD-SAR/Montpellier, 500 p. + carte.
15. Angé A. (1987). Rapport d'identification du projet FAO d'agriculture pluviale au Sénégal. Vol. II : documents de travail. CIRAD-CA/Montpellier.
16. Dugué P. (1990). Présentation des unités agrosylvopastorales de Mabo et Touba Mbella : diagnostic des problèmes et propositions d'intervention. ISRA/Kaolack, doc. multigr., 57 p.
17. Garin P. (1989). Eléments d'analyse de la gestion des moyens de production au sein d'une communauté villageoise du Siné Saloum. Le cas de Ndimb Taba. CIRAD-SAR, Montpellier, doc. multigr., 69 p.
18. Ruelle P., Séné M., Juncker E., Diatta M., Pérez P. (1990). Fiches techniques de défense et restauration des sols. Coll. Fiches Techniques, vol. 1 (1), ISRA-Unival/Dakar, 6 fiches + photos.
19. Busacker D. (1990). L'analyse socio-économique des systèmes d'exploitation agricole et de la gestion de terroir dans le Bas-Saloum, Sénégal. Seminar für landwirtschaftliche entwicklung. Technische Universität Berlin. FIA Berlin, 132, 225 p.
20. Rautureau J., Pérez P., Diatta M. (1991). Implantation et gestion de haies vives. Quelques résultats de recherche au Siné Saloum. CIRAD-CA, Montpellier, doc. multigr., 52 p.
21. Séné M., Garin P. (1990). Le travail à la dent sur sol gravillonnaire au Sénégal. In: Starkey P.H. and Faye A. (eds.). Animal traction for agriculture development. Proceedings of the third workshop of the WAATN, July 7-12 1988, Saly, Sénégal : 218-23.
22. Badiane A., Ganry F. (1990). Evaluation et utilisation de la matière organique dans deux villages du Centre Nord. Cas de Ndiamsyl Sessene et Ndiemane. L'Agron. Trop. (à paraître), 14 p.
23. Diatta M. (1988). Caractérisation morphodynamique des faciès forestiers de la communauté rurale de Thyssé Kaymor (Siné Saloum). Mémoire de confirmation. ISRA DRPF, 90 p. + carte.
24. Séné M., Diatta M. (1990). La place de l'arbre et le rôle des techniques culturales dans l'aménagement du terroir au sud du bassin arachidier du Sénégal. Réseau Erosion, bulletin n° 11 : 68-81.
25. Juncker E., Séné M. (1990). Comparaison de plusieurs dents pour le travail en sec en traction bovine. ISRA/Kaolack, doc. multigr., 27 p.
26. Dugué P., Séné M. (1990). Rapport de synthèse 1989 du volet agronomie du programme système de production Siné Saloum. ISRA/Kaolack, doc. multigr., 54 p.
27. Hamon R. (1972). L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (Bilan de trois années d'études). L'Agron. Trop. 1972 ; 27 (5) : 592-607.

21

Modelling effects of water conservation tillage in the semi-arid tropics

L. STROOSNIJDER¹, W.B. HOOGMOED², J.A.A. BERKHOUT³

*1. Department of Irrigation and Soil and Water Conservation,
Wageningen Agricultural University, Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen,
The Netherlands*

2. Soil Tillage Laboratory, Wageningen Agricultural University, The Netherlands

3. Landscape and Environmental Research Group, University of Amsterdam, The Netherlands

In the semi arid tropics, with highly erratic and aggressive rainfall, crop production is influenced by water availability as well as by nutrient availability.

Water availability can be increased by tillage aimed at an increase of the fraction of the rainfall that infiltrates into the soil and the subsequent reduction of the loss of water due to runoff [1]. The same type of tillage reduces soil evaporation and transpiration losses by weeds.

Nutrient availability can be increased by applying organic or inorganic fertilizers.

Given the severe food crisis in the semi-arid tropics, the development of improved farm practices aimed at an increase of crop production is a major aim of agricultural research. However, socio-economic constraints of the existing farming systems in the semi-arid tropics leave little room for a major increase of inputs of labour or capital in the form of nutrients. Therefore, it is of crucial importance to understand the interrelations between water and nutrient availability in order to optimize the effectiveness of such an increase of inputs.

The need for such an understanding can be illustrated with an example. If under certain farming conditions (i.e. climate, soil and crop), water is the most limiting production factor it seems logical to aim at water conservation tillage. However, a number of negative side-effects may occur with such an improvement of the water availability. These are e.g.:

- water conservation tillage during the early growth stages may increase vegetative growth and increase the risk of drought during later growth stages resulting in a lowering of the harvest index or even in a complete crop failure;
- an increase in the number of tillage operations may enhance soil erosion inducing a loss of soil nutrients;
- with no or low inputs of nutrients, the achievable crop production which originally was determined by water availability may become limited by nutrient availability. If the latter production level is only slightly above the water-limited production level, the increase in production as a result of improved water conservation practices will be marginal and not cost effective.

On the other hand, if under the same farming conditions nutrient availability is considered as the most limiting production factor, one will start looking into possibilities to increase the level of nutrient input. Similar side-effects as referred to above may occur if the interrelations between water and nutrient availability are not well understood or not taken into account properly.

An improved understanding of the subject may lead to the conclusion that water conservation will only be effective with a simultaneous moderate increase of nutrient input. This insight may improve quantitative land evaluation [2,3] and lead to the design of an achievable package of improved farming practices [4].

Simulation offers a tool to provide the required insight into the above stated interrelations not only for development options in arable agriculture [5], but also in silvo-pastoral zones [6].

In this paper, we will present the use of simulation models to quantify effects of adaptive soil management practices on water conservation and on crop production.

We will briefly describe DUET.91, an integrated public domain research model. A case study for millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) production in the Republic of Mali in the Sahel zone of West Africa will be used to illustrate the possibilities and limitations of this tool.

An improved understanding of the complex phenomenon of crop production obtained with the help of a simulation model can direct on-station as well as on-farm research. Results from the model should always be verified with field trials.

The research tool DUET.91

The name DUET was chosen for the simulation model which was used as the research “tool” because elements were combined of existing models (in DUET called modules) developed and documented elsewhere.

Three modules are distinguished in DUET [7]. For crop growth and nutrient requirements, use was made of the WOFOST model [5,8,9]. The water balance module was based on the SWATRE model [10], for nutrient availability QUEFTS [11] was used. The model is written in FORTRAN and can be run on a PC.

Module 1 : Crop growth is simulated from emergence to maturity on the basis of physiological processes as determined by the crop's response to environmental conditions. Major processes are CO₂ assimilation, respiration (maintenance), partitioning of assimilates to various plant organs, transpiration and nutrient uptake. Rootable depth extends into the soil profile at a rate of 4 cm/day. Actual rooting depth is a function of possibilities for water uptake as determined in Module 2, but there is a maximum, plant dependent, rooting depth.

Nutrient requirement is calculated at crop maturity by multiplying the amounts of dry matter allocated to the various plant organs (i.e. roots, stems, leaves, cobs and grains) with their respective minimum contents of the major nutrients Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K). These values are known for most crops [12].

Module 2 : Available water is simulated at various soil depths (representing soil layers) on the basis of physical processes like infiltration, redistribution, evaporation and water uptake by the crop's root system. An implicit finite difference scheme is used with 39 soil layers of 7 cm. Water uptake per layer depends on root presence (see Module 1) and available water.

Module 3 : Nutrient availability is calculated using data of the native soil fertility. The latter is represented by the average (0-20 cm top soil) soil's pH (H₂O), organic carbon content, total and readily available phosphorous content and exchangeable potassium. The relationships used to derive the available amounts of nutrients from the above soil chemical data are partly of an empirical nature (crop and soil specific) and partly based on theoretical considerations.

DUET.91 integrates the above modules as follows. In dynamic simulation, using daily time steps, crop production is computed using modules 1 and 2. This results in the so-called water-limited production since neither nutrient uptake nor nutrient availability is taken into account. At maturation the nutrient requirements of this production are calculated using module 1 and compared with the nutrient availability as calculated in module 3. If any of the requirements for N, P or K is larger than their availability, the actual achievable production will be lower than the calculated water-limited production. If this is the case the actual production is called a nutrient-limited production and is calculated by dividing the most limiting available nutrient (N, P or K) by the minimum content in the plant organs as defined in module 1.

A number of features of DUET.91 makes this model suitable for an analysis of the effects of water conservation tillage on crop production in the short-term as well as on the long-term.

– Crop production and the soil's water balance are interrelated. Management practices influencing this water balance have a direct effect on crop production.

- Crop production is dynamically simulated. This implies that an improvement in water availability has an immediate effect on production. This makes it possible to investigate whether an increase in vegetative growth early in the season increases the risk of crop failure later in the season.

- The soil's infiltration capacity is a function of water conservation tillage and set at a high (empirical) value after tillage. Its value gradually reduces as a function of the cumulative amount of rainfall after tillage. A new tillage operation resets this course of the infiltration capacity.

- In module 1 the crop's potential rooting depth develops gradually as a function of crop development. In module 2 it is determined at which depth there is water available for uptake by roots. This availability determines the actual rooting depth. If more than 0.5 mm of water is extracted from a layer during the total growing season, this layer is considered rooted.

- Water conservation tillage increases the depth of wetting. Nutrient availability in DUET.91 is made a function of this depth of wetting so that water conservation leads to a more effective mining of nutrients.

- DUET can handle various options for the moment that water conservation tillage is simulated. For instance a fixed number of days, e.g. 15, between the tillage operations or a moment related to the cumulative amount of rain, e.g. 100 mm, after the last tillage. The latter may be called response tillage.

The case study

Weather

- Average values of maximum and minimum air temperature, relative air humidity, wind speed and irradiation were used since these values show a conservative behaviour over the years as is shown by Stroosnijder and van Heemst [13] and in figure 1.

- Daily rainfall data of 35 years (1950-1984) were used. Since the duration of these storms is not recorded, their intensity is unknown. This implies that these data can't be matched with detailed information of the soil's decreasing infiltration capacity as determined by Hoogmoed and Stroosnijder [14].

- Instead, a separate analysis [15] was performed to relate size of the daily rainfall to intensity. From a 30-years rainfall record, four normal years with a 50 % rainfall probability and four dry years with a 10 % rainfall probability were selected. For all years daily rainfall was classified into three classes (< 10 mm, 10-20 mm and >20 mm). Within each class, the average rainfall shower was calculated. These averages do not differ significantly between normal and dry years. Within each class, four rainfall intensities, i(1)-i(4), were distinguished, see table I. Each intensity is representative for 25% of the amount of rainfall in that class [14].

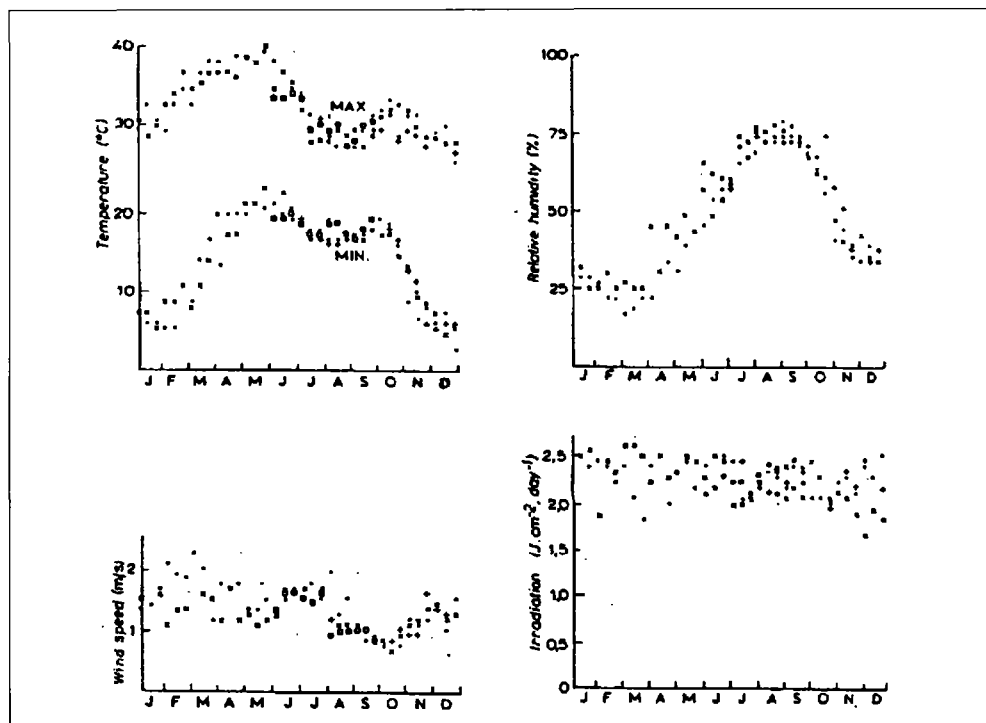


Figure 1. Daily max. and min. air temperature, relative humidity, wind speed and irradiation. Values measured at Niono (Mali) over 4 years.

Table I. Average rainfall per class and intensities representative for 25 % of rainfall in that class.

Class	Average rainfall in class (mm)	i(1) mm/hr	i(2) mm/hr	i(3) mm/hr	i(4) mm/hr
<10 mm	4.4	3	8	18	32
10-20 mm	14.6	5	18	37	61
> 20 mm	32.9	7	34	62	116

For each of the 12 standard showers defined in table I, the duration, t , of the average shower can be calculated.

Soil

– Some characteristic data for a loamy sand soil at Niono in Mali (5° 45' W and 14° 30' N) are given in table II.

– Soil physical data were taken from Stroosnijder [16] and are presented in figure 2.

– Cumulative infiltration (CUMI), for the 12 standard showers defined in 3.2, is computed with the equation: $CUMI = S\sqrt{t}$. S is an expression for the soil's sorptivity capacity for water. This calculation is performed for three S -values leading to $3 \times 12 = 36$ cumulative infiltration values. For each of the above 36 cases, runoff can then be calculated with the equation $r = P - CUMI - SS$. P is the shower size and SS the surface storage, i.e. the amount of precipitation that can be held in the surface irregularities without running off. Three SS values are assumed leading to $36 \times 3 = 108$ runoff values.

– For crusted, tilled and intermediate soil values for S and SS were taken from Stroosnijder and Hoogmoed [14]. This leads to runoff values as shown in table III.

– The duration of the effect of tillage is made a function of the cumulative amount of rainfall after last tillage. If the latter reaches 100 mm and 200 mm, the intermediate and crusted stages as defined in table III have been reached respectively. DUET.91 interpolates linearly between these points with CUMRAIN as the independent variable.

– It is assumed that seedbed preparation tillage and sowing starts after the first rains. Since there is a good chance for viable germination and plant establishment after a decade with more than 20 mm of infiltration, this criterion was used to start the simulation of growth. This value compensates the seasonable average value for soil evaporation of 2 mm/day [17,18].

Table II. Some characteristics of a loamy sand soil from Niono.

<i>Particle size analysis (% w/w)</i>		<i>Chemical characteristics</i>	
Clay (< 2 µm)	5	pH water	6.0
Fine loam (2-16 µm)	5	pH KCl	4.5
Coarse loam (16-20 µm)	10	C (% w/w)	0.25
Very fine sand (50-105 µm)	35	N (% w/w)	0.025
Fine sand (105-210 µm)	25	C/N	10
Medium coarse sand (> 210 µm)	20	EC (1:5) (mmho/cm at 25°C)	0.03
<i>Classification</i>		Total P (µg/g)	100
Textural:	Loamy fine sand	P-Bray II (µg/g)	4
USA Soil Taxonomy:	Ultic Hapustalf	K (µg/g)	80
FAO/UNESCO World Map:	Eutric Nitosol	Fe ₂ O ₃ (% w/w)	0.87
French system:	Sols ferrallitiques	CEC (pH7) (me/100 g)	2.0
Local name:	Séno	Na (% CEC)	–
<i>Soil structure</i>		K (% CEC)	10
Bulk density (kg m ⁻³):	at 5 cm depth	Ca (% CEC)	60
	at 15 cm depth	Mg (% CEC)	30
	at 25 cm depth	Base saturation (%)	100
Moisture content at pF 2.0	21.0	CEC (me/100 g clay)	40
(%, v/v)			

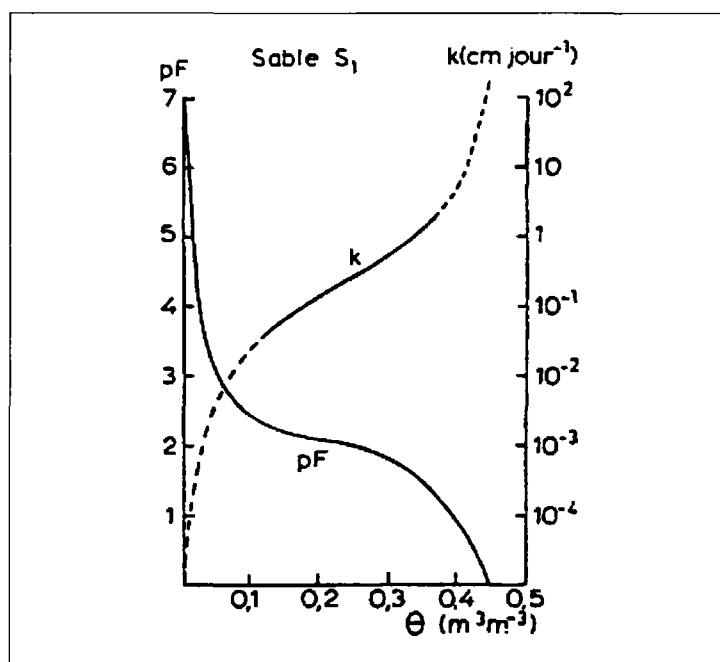


Figure 2. Water retention and conductivity of unsaturated soil.

Table III. Runoff percentage for 3 classes of showers and 3 stages of soil surface conditions for loamy sandy soil in the West African Sahel.

Class	Average rainfall in class (mm)	Percentage runoff (%)		
		Crusted	Intermediate	Tilled
<10 mm	4.4	12	0	0
10-20 mm	14.6	50	14	0
>20 mm	32.9	74	44	24

Crusted soil: sorptivity = $1 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$ and surface storage = 0 mm

Intermediate soil: sorptivity = $2 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$ and surface storage = 2 mm

Tilled soil: sorptivity = $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{min}}$ and surface storage = 5 mm

– Soil chemical data for the top soil as used in QUEFTS were taken as follows:

pH (H_2O) = 6.0

C = 2.5 g/kg

total P = 100 mg/kg

P-Olsen (equals P-Bray, Novozamski, pers. comm.) = 4 mg/kg

exchangeable K = 2 mmol/kg

– Based on the distribution of root density (cm/cm^3) with depth it may be concluded that in the layer 0-60 cm about 80 % of the root density occurs. For each depth x larger than 60 cm, it can be calculated how much root density there is in the layer x-60. By dividing

this latter amount by the root density at 60 cm, a relative gain in root density is obtained with respect to the 'standard' density at 60 cm, see table IV.

Table IV. Root distribution factor and correction factors for nutrient availability in case roots are deeper or less deep than the reference depth of 60 cm.

Depth	Root factor	Carbon factor	Phosphor factor	Potassium factor
0-20	0.57	0.27	0.14	0.19
20-40	0.86	0.65	0.52	0.58
40-60	1.00	1.00	1.00	1.00
60-80	1.09	1.02	1.04	1.03
80-100	1.14	1.06	1.11	1.09
100-120	1.19	1.11	1.23	1.19
120-140	1.21	1.15	1.34	1.28
140-160	1.23	1.20	1.47	1.38
160-180	1.24	1.24	1.60	1.48
180-200	1.26	1.28	1.76	1.61

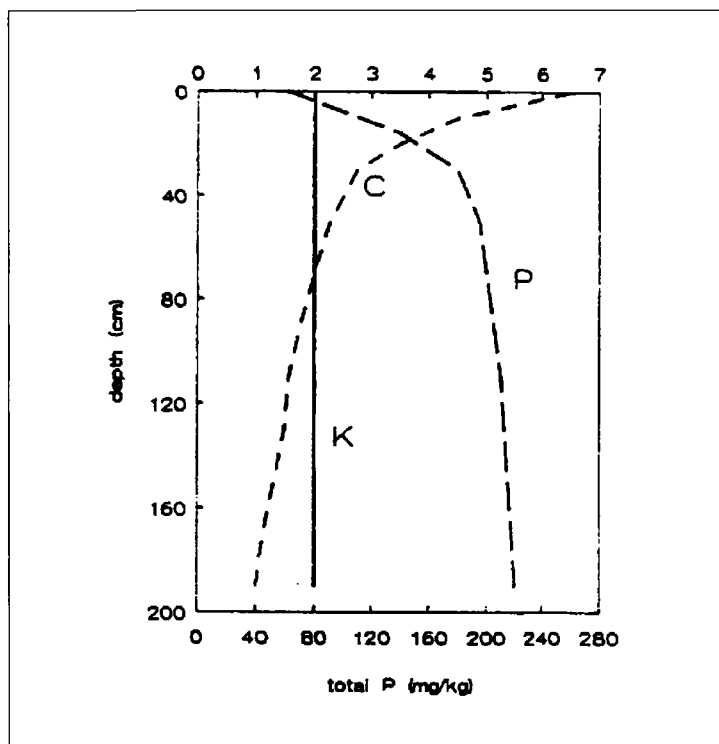


Figure 3. Distribution of C, K and P with depth.

– A similar procedure was followed for a characteristic distribution with depth of carbon, phosphorus and potassium as is shown in figure 3, Stroosnijder [16], Pieri [19] and Stoorvogel & Smaling [20]. The contents of these elements decrease, increase and remain constant respectively. Multiplying the root factor with nutrient distribution factors yield correction factors for nutrient uptake as shown in table IV. If roots are at 60 cm depth, nutrient availability is as calculated with QUEFTS in module 3. If rooting is shallower, availability is less and if roots penetrate beyond 60 cm depth the availability increases gradually.

Crop

– Crop data for Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) were taken from van Heemst [12].

Results and discussion

Results of the simulations are given in figures 4 to 11. Figure 4 presents total annual rainfall (Average, AVG = 571 mm with a standard deviation, SD = 128), the rainfall in the millet growing season of 76 days (AVG = 353 mm, SD = 89) and the amounts of infiltrated water with water conservation (AVG = 260 mm, SD = 54) and without tillage (AVG = 223 mm, SD = 50). These data show that the coefficient of variation of the rainfall is 22 % and 25 % respectively which are normal values for SAT climates. Data suggest a trend over 35 years to lower annual rainfall. Rainfall in the growing season of a short duration millet variety is only 62 % and shows a similar decreasing trend. During this growing season, infiltration is 74 % and 63 % of rainfall for tilled and non-tilled soils.

Figure 5 shows this runoff in detail. Without conservation the runoff during the growing season is as high as 36.5 % (SD = 3.4) and decreases with water conservation tillage till 25.6 % while the standard deviation increases till 4.8. This reduction of the runoff equals an amount of 37 mm.

Figure 6 shows the starting day of millet growth as calculated with the criterion of a minimum of 20 mm infiltrated rain in a period of 10 days. The average date is Julian day 162 (June 11) with an SD of 13 days. So, in 2 out of 3 years sowing millet will take place in June. Note that there is no difference in starting date between the cases of water conservation tillage or not. This is because the water conservation tillage only starts after sufficient rain has fallen to allow sowing of the crop, so that the germination itself will not be influenced.

Figure 7 shows the rooting depth of the millet as calculated in the water extraction module of the DUET.91 model. Without water conservation tillage the average depth is 112 cm (SD = 37) and with tillage every 15 days this increases only slightly till 121 cm (SD = 40). Since millet can easily root as deep as 200 cm these data show that there is no loss of water due to deep percolation below the root zone.

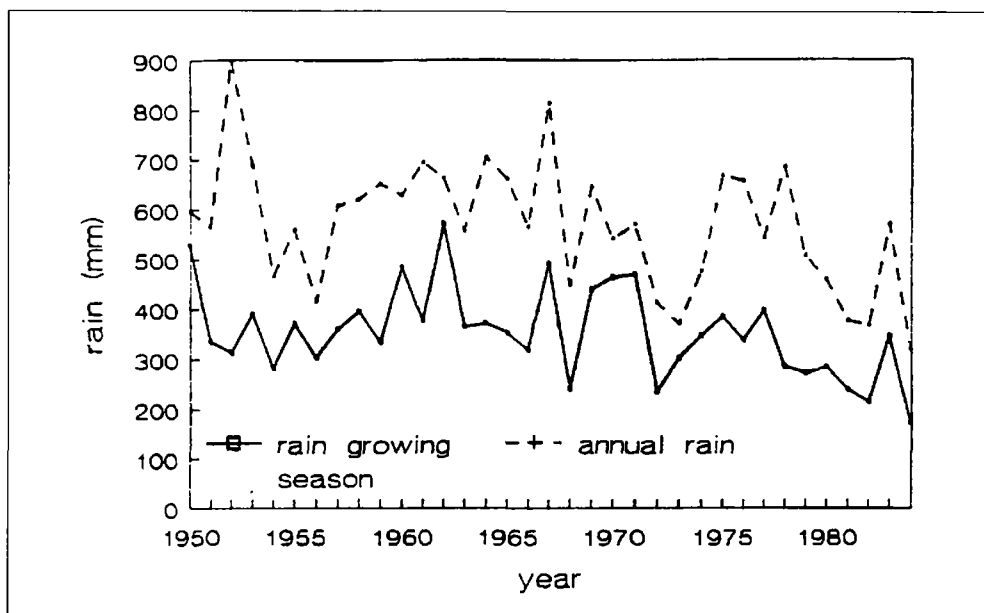


Figure 4. Seasonal and annual rainfall over 1950-1984.

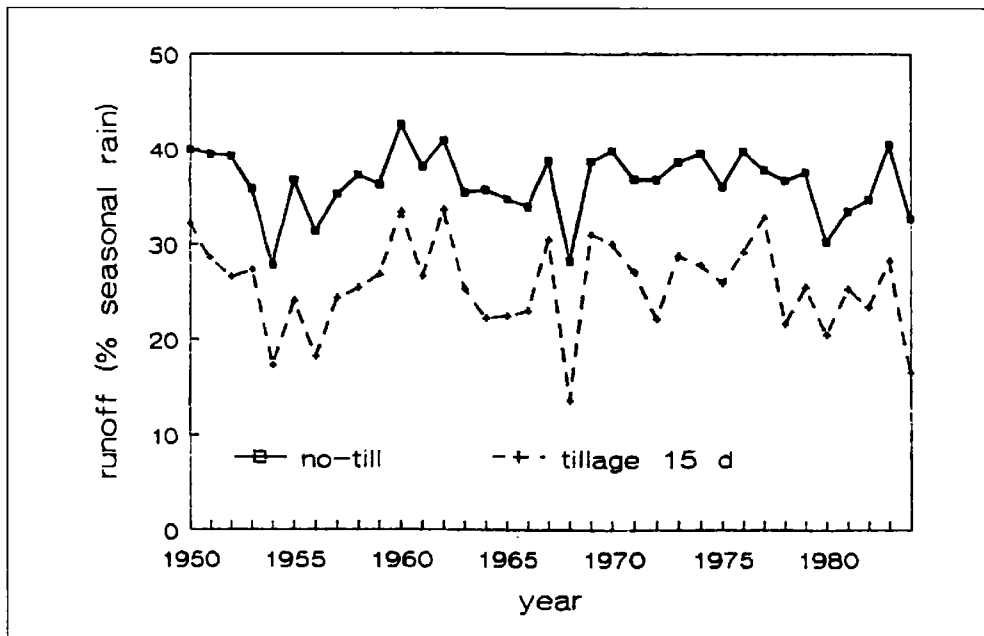


Figure 5. Runoff during growing season (% of seasonal rainfall).

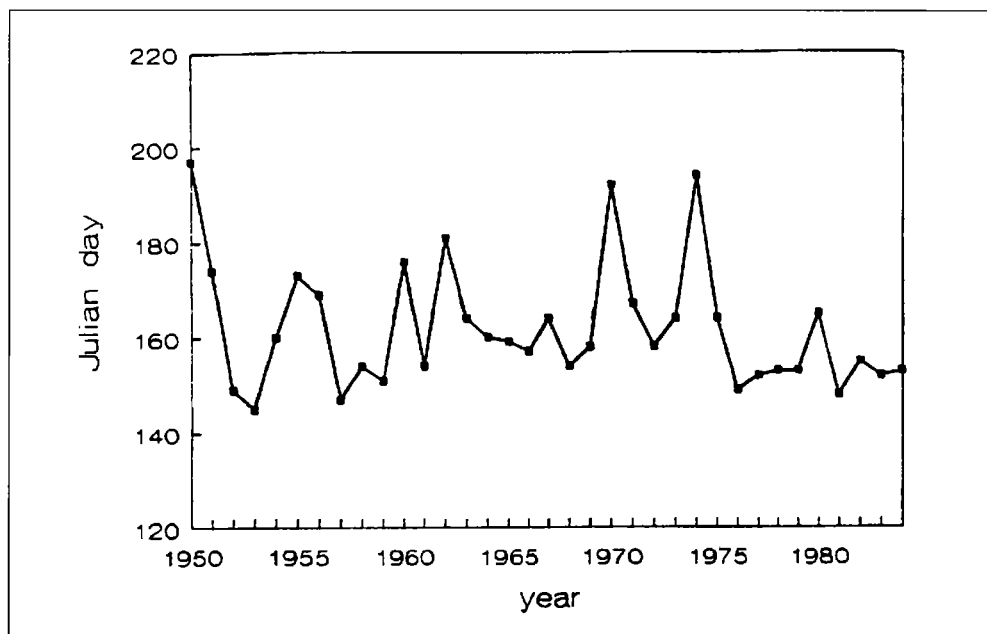


Figure 6. Daynumber of start (= emergence crop).

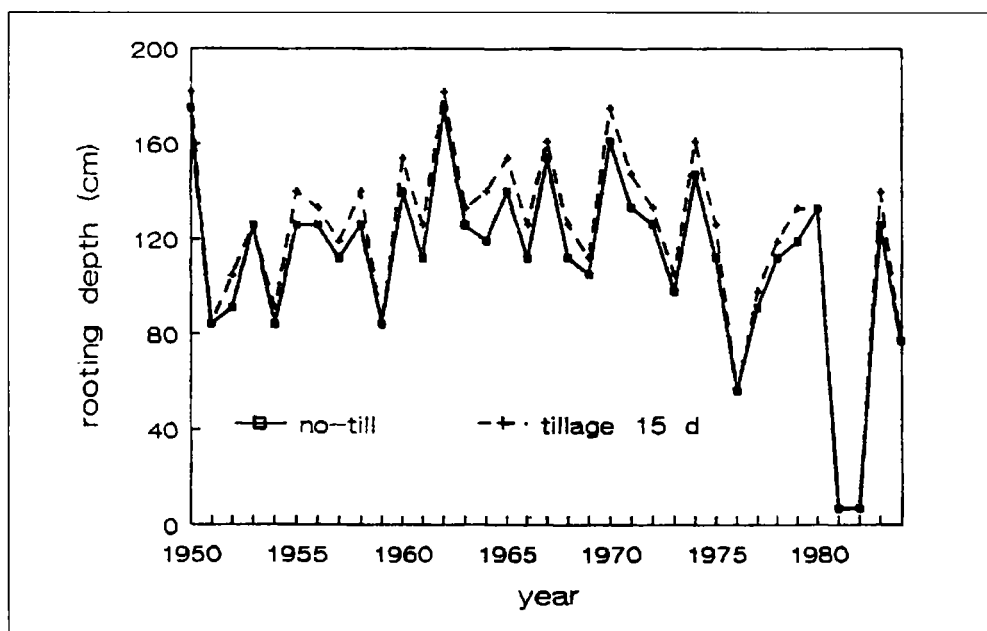


Figure 7. Rooting depth (based on wetting of profile).

Figure 8 gives, for the water limited production, the water use efficiency defined as the crop transpiration divided by the rainfall in the growing season. Without water conservation tillage, this efficiency is 8.0 % (SD = 3.3) and increases only slightly till 8.8 % (SD = 3.6) if water conservation tillage is applied. These figures imply that only 27.5 mm and 30.0 mm water is used for transpiration respectively. Note that this amount is in the same order or magnitude as the gain in water due to a reduction in runoff from 37 till 26 %. Since the total (above ground) biomass is 1986 and 2175 kg dry matter/hectare respectively it can be calculated that the transpiration coefficient is 140 kg water/kg dry matter.

Figure 9 shows water limited grain production without water conservation tillage (AVG = 467 kgDM/ha, SD = 314) and figure 10 shows the same value for regular tillage (AVG = 557 kgDM/ha, SD = 346). There is an increase of 90 kgDM/ha but also an increase in seasonal variation.

Predicted average levels for nutrient limited grain production are 355 kgDM/ha (SD = 93) without tillage (figure 9) and 366 kgDM/ha (SD = 98) with tillage (figure 10).

Actual production is the minimum of both calculated levels and is shown in figure 11. In 66 % of the years this is the nutrient limited production in case no water conservation tillage is applied (figure 9). If such tillage is performed every 15 days, this percentage increases till 77 % (figure 10).

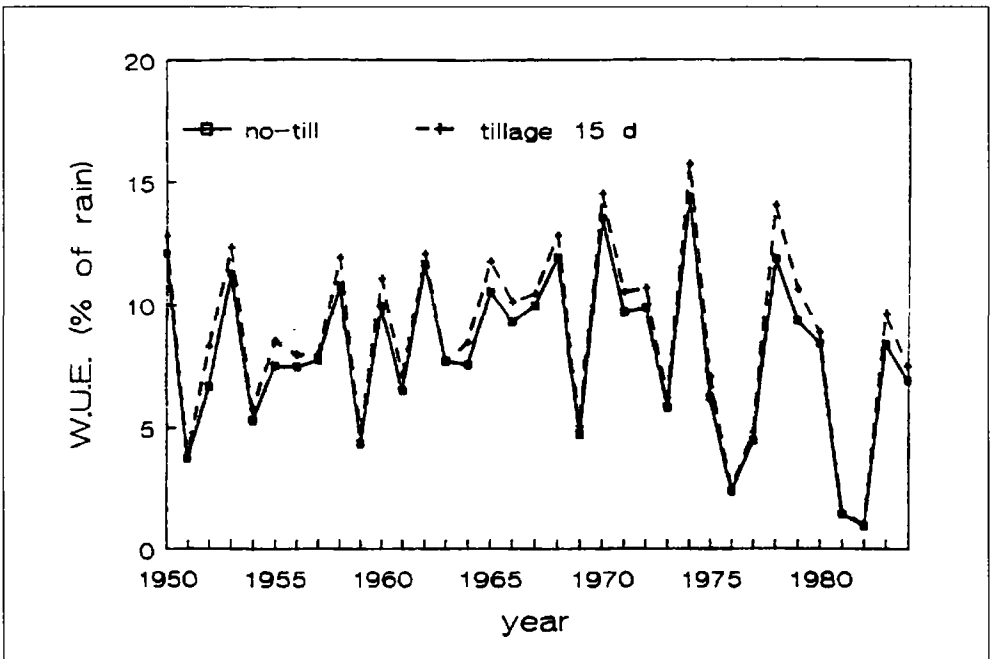


Figure 8. Water-use efficiency (transp. as % of seasonal).

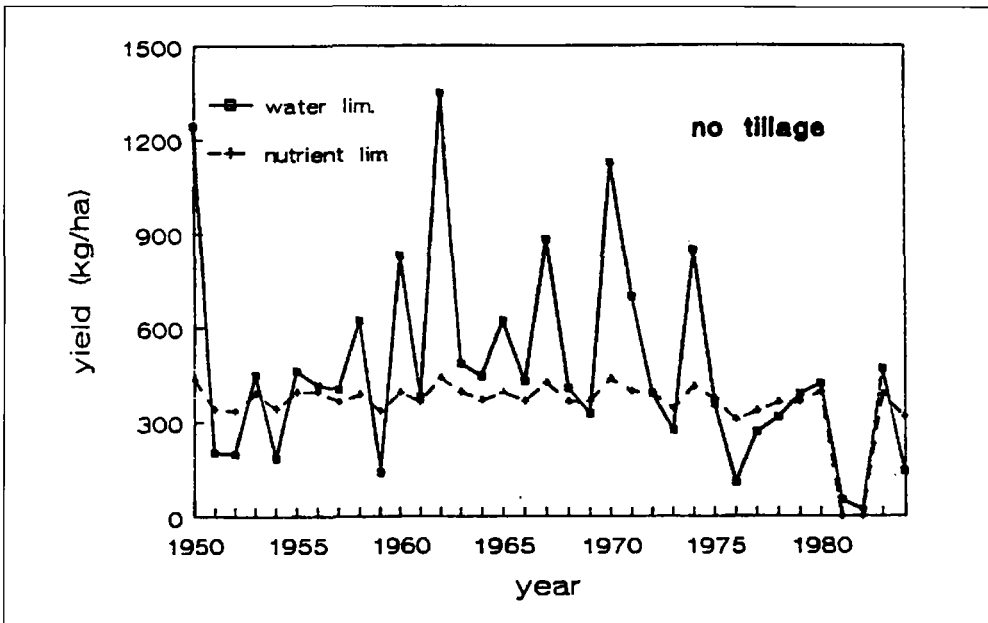


Figure 9. Grain production: no-tillage situation.

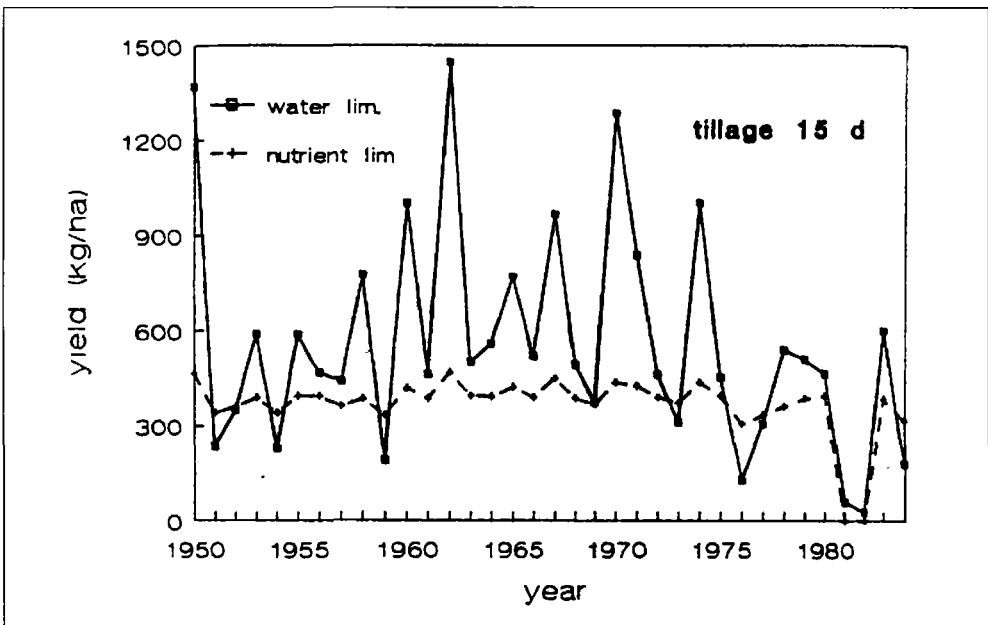


Figure 10. Grain production: tillage every 15 days.

The conclusion to be drawn from this study is that conservation tillage alone (without an additional increase in external nutrient inputs) has a marginal effect. Actual grain production (figure 11) increases from 319 kgDM/ha (SD = 119) till 344 kgDM/ha (SD = 116), i.e. a meagre 25 kg only, with no improvement in the production risk. So, according to this study, water conservation should not be our first priority but an increase of external inputs. If we can achieve this there is room for an increase in production from 319 till 467 kg grain/ha, an increase of 148 kg grain/ha. If in addition to such an increase in inputs also water conservation tillage is applied the combined effect will increase the production from 319 till 557, that is 238 kg grain/ha. It must be accepted however, that production variation increases from an SD of 119 till more than 300 kg grain/ha thereby increasing the coefficient of variation (SD/AVG) from 40 % till 65 %.

Even with inputs and water conservation tillage, the yield gap between achievable and the zone's potential grain production of 1500 kg grain/ha, remains large. This is partly caused by the fact that the tillage reduces the runoff only from 37 % till 26 %. For the remainder of the yield gap the application of secure water harvesting or irrigation is needed. Another justification for water harvesting or irrigation is the large annual variation of the rainfed production.

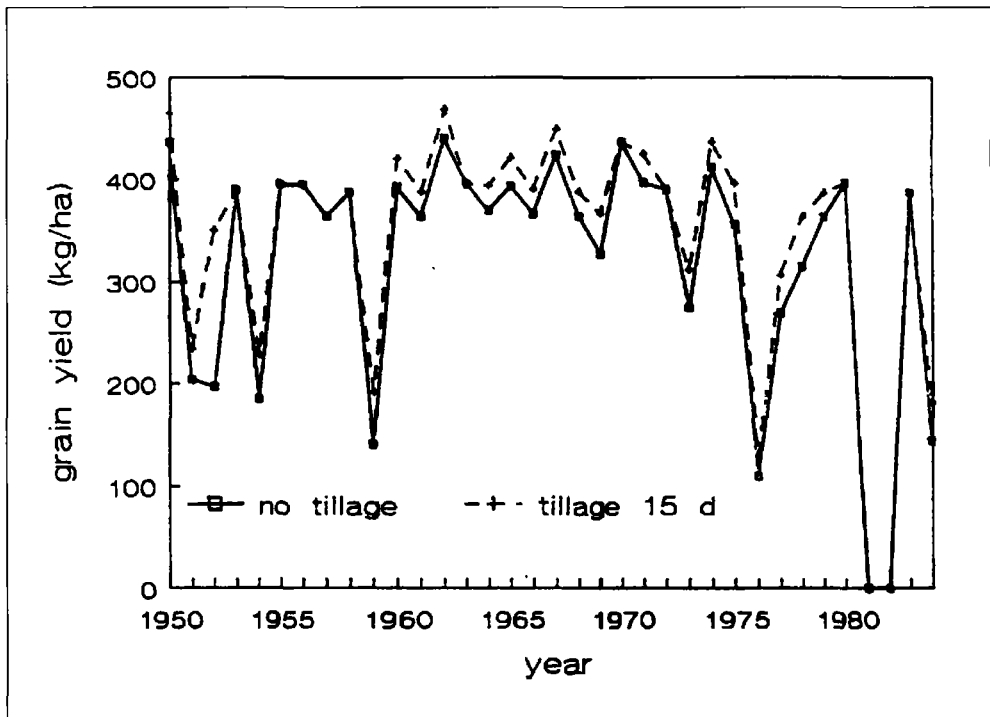


Figure 11. Actual grain production (minimum of water or nutrient lim'd).

Limitations and recommendations

– DUET.91 provides for a dynamic simulation of crop growth as a function of available water. Nutrient requirements and availability are not treated in a dynamic way. According to DUET.91 improved water availability early in the season leads to an increase in vegetative growth. One may wonder whether this is realistic under low nutrient availability conditions. However, it is commonly accepted that the majority of nutrients is liberated by mineralization of the soil's organic matter early in the season in the form of a flush. Therefore, the implicit assumption of a high nutrient supply early in the season seems to be allowed.

– Weather data include daily amounts of rainfall. However, generally no information about the duration or intensity of rainstorms is available. This makes it impossible to match rainfall with the (limited) infiltration capacity of the soil in a direct way. In DUET.91 an empirical relation between the size of the shower and its intensity was used to estimate the fraction of runoff of that shower for a given infiltration rate of the soil.

– Data of the soil's infiltration capacity as a function of cumulative amount of precipitation are scarce and need to be determined in the Sahel using portable rainfall simulators.

– After tillage, creating a dry soil mulch, the actual soil evaporation is reduced and its value is gradually restored as a function of the cumulative rainfall after tillage. This is not yet included in DUET.91. A similar but inverse functional dependence as used for the effect of tillage on infiltration, with regards to soil evaporation should be included.

– Weeds which develop simultaneously but at a greater development rate than the crop consume water in the form of transpiration. Water conservation tillage kills these weeds and saves soil water for crop transpiration only. This effect was not taken into account in the present study but will be discussed in Hoogmoed *et al.* [21].

– Improper tillage increases the soil's susceptibility for erosion. Each tillage operation may remove part of the nutrients that come available from the mineralization of organic matter (module 3) as well as from externally applied fertilizers. Although this amount may seem small on the short-term, an increase in the number of tillage operations over a period of tens of years may show a dramatic effect on the stock of soil nutrients. This effect will be taken into account by Berkhout *et al.* [22].

– Crop emergence and successful plant establishment occurs when sufficient water (above a threshold accounting for soil evaporation) has infiltrated into the soil. In DUET.91, water conservation tillage starts after emergence and therefore has no influence on the start of crop growth. In a next version of DUET water conservation in the month preceding germination will be introduced. Since both infiltration and evaporation are influenced by such early water conservation tillage, this may result in an earlier start of crop growth. At the one hand this can increase production and at the other hand may increase the risk of crop failure.

References

1. Hoogmoed W.B., Klaij M.C. (1990). Soil management for crop production in the West African Sahel. I: Soil and climate parameters. *Soil & Tillage Research*, 1990; 16: 85-103.
2. Keulen H. van, Berkhout J.A.A., van Diepen C.A., van Heemst H.D.J., Janssen B.H., Rappoldt C., Wolf J. (1987). Quantitative land evaluation for agro-ecological characterization. In: A.H. Bunting (ed.). *Agricultural Environments*. CAB International, Wallingford, UK.
3. Keulen H. van, Breman H. (1990). Agricultural development in the West African Sahelian region: a cure against land hunger? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 1990; 32: 177-97.
4. Stroosnijder L., van Rheeën T. (1991). Making Farming Systems Analysis a more objective and quantitative research tool. *Proc. Intern. Symp. on Modelling in Agricultural Research in Developing Countries*, Bangkok, Thailand.
5. Diepen C.A. van, Wolf J., Van Keulen H., Rappoldt C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 1989; 5: 16-24.
6. Stroosnijder L., Hoogmoed W.B. (eds) (1991). *Aménagement et gestion des terroirs sylvo-pastoraux au Sahel*. Programme de la recherche "Sahel" 1991-1996. Université agronomique Wageningen, Pays-Bas.
7. Huygen, J. (1988). *DUET User Manual*, Version 2.0. MARS project, ICW, Wageningen, The Netherlands.
8. Diepen C.A. van, Rappoldt C., Wolf J., van Keulen H. (1988). *CWFS Crop Growth Simulation Model WOFOST. Documentation Version 4.1*. Centre For World Food Studies, Amsterdam-Wageningen, 299 p.
9. Berkhout J.A.A., Van Keulen H. (1986). Potential evapotranspiration. In: H. Van Keulen and J. Wolf (eds). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
10. Belmans C., Wesseling J.G., Feddes R.A. (1983). Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, 1983; 63: 271-86.
11. Janssen B.H., Guiking F.C.T., van Der Eijk D., Smaling E.M.A., Wolf J., van Reuler H. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 1990; 46: 299-318.
12. Heemst H. van (1988). Plant data values required for simple and universal simulation models: review and bibliography. Simulation report CABO-TT nr. 17, Wageningen.
13. Stroosnijder L., Van Heemst H.D.J. (1982). La météorologie du Sahel et du terrain d'étude. In: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djiteye (eds). *La productivité des pâturages sahéliens*. Agric. Res. Rep. 918: 37-52. Pudoc, Wageningen.
14. Hoogmoed W.B., Stroosnijder L. (1984). Crust formation on sandy soils in the Sahel. I. Rainfall and infiltration. *Soil & Tillage Research*, 1984; 4: 5-23.
15. Stroosnijder L. (1991). Modelling the effect of grazing on the soil water balance and the primary production in the Sahel. *Workshop on Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, Niamey, Niger.
16. Stroosnijder L. (1982). La pédologie du Sahel et du terrain d'étude. In: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djiteye (eds.), *La productivité des pâturages sahéliens*. Agric. Res. Rep. 918: 52-71. Pudoc, Wageningen.

17. Stroosnijder L., Koné D. (1982). Le bilan d'eau du sol. In: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djiteye (eds). La productivité des pâturages sahéliens. Agric. Res. Rep. 918: 133-65. Pudoc, Wageningen.
18. Stroosnijder L. (1987). Soil evaporation: test of a practical approach under semi-arid conditions. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 1987; 35: 417-26.
19. Pieri C. (1989). Fertilité des terres de savanes; bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, France, 444 p.
20. Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A. (1990). Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000. Volume I of Report 28 of The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands, 137 p.
21. Hoogmoed W.B., Stroosnijder L., Berkhout J.A.A. (1992). Soil tillage options for water management under erratic-rainfall conditions. In: Tillage in arid and semi-arid regions. International seminar on agricultural engineering, Rabat, Morocco.
22. Berkhout J.A.A., Hoogmoed W.B., Stroosnijder L. (1992). Evaluating effects of soil erosion on agricultural production potentials using simulation models (To be submitted to CATENA).

22

Conditionnement des sols sableux par la matière organique en riziculture pluviale

Y. DEMBELE

INERA, BP 910, Bobo Dioulasso, Farako-Ba, Burkina Faso

Introduction

Au Burkina Faso, la consommation du riz augmente d'année en année. De 4 kg/habitant en 1961, elle est passée à 12,3 kg/habitant en 1986 [1]. La production, elle, stagne ou régresse.

Cette situation est due à la faiblesse des rendements notamment en riziculture de bas-fonds (0,8 t/ha), qui occupe actuellement plus de 80 % de la superficie rizicole du pays [2], mais aussi à l'abandon de la mise en attente de certains bas-fonds à la suite de la dégradation de leur régime hydrique.

La riziculture irriguée donne au contraire de bons rendements, 4t/ha selon le CILSS [3], mais ce type de culture est coûteux et ne couvre actuellement qu'un peu plus de 3 500 ha, soit 15 % environ des superficies rizicoles du Burkina [2].

C'est pourquoi dans la recherche de l'autosuffisance alimentaire, l'accent est mis sur l'amélioration des rendements en riziculture de bas-fonds et le développement de la riziculture pluviale; mais elle ne concerne que 2000 hectares, avec des rendements très bas.

Au Burkina, la culture du riz pluvial concerne les régions à pluviométrie annuelle élevée (voir carte, figure 1) :

- zone sud-soudanienne (800-1 000 mm),
- zone nord-guinéenne (1 000-1 200 mm).

Nous lui consacrons la présente communication en envisageant plus précisément l'aspect alimentation hydrique.

Deux points principaux sont abordés :

- l'irrigation de complément (lorsque cela est possible) pour pallier l'insuffisance et l'irrégularité des pluies ;
- le conditionnement des sols sableux par apport de fumier en vue d'augmenter leur rétention en eau.

L'intérêt de l'irrigation de complément pour l'accroissement et la stabilisation des rendements des céréales dans ces régions a été démontré [4]. Cette pratique est particulièrement intéressante pour le riz pluvial [5].

Quant au rôle de la matière organique dans l'augmentation de la capacité de rétention, il est effectif selon certains auteurs [6,7] et nul selon d'autres [8]. Quant à Sommerfeldt et Chang [9], ils démontrent qu'avec des doses croissantes de fumier, la rétention en eau du sol augmente au point de flétrissement plus rapidement qu'à la capacité de rétention, ce qui induit une baisse parallèle de la réserve utile.

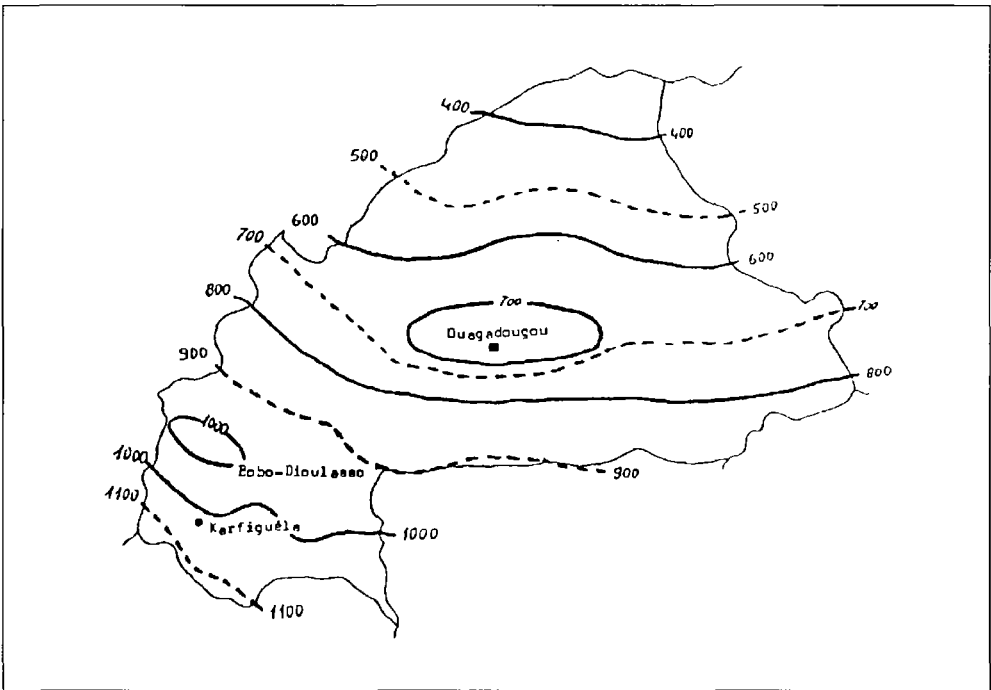


Figure 1. Carte du Burkina Faso.

Matériels et méthodes

L'essai a été conduit dans le périmètre rizicole de Karfiguéla durant les saisons pluvieuses 1986 et 1987. Le climat est de type nord-guinéen à pluviométrie très irrégulière (figures 2a et 2b).

Le périmètre de Karfiguéla a une superficie de 350 hectares, dont 30 % sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés à texture sableuse ou sablo-argileuse impropres à la riziculture irriguée. Ils sont pauvres en matière organique et leur réserve utile est faible.

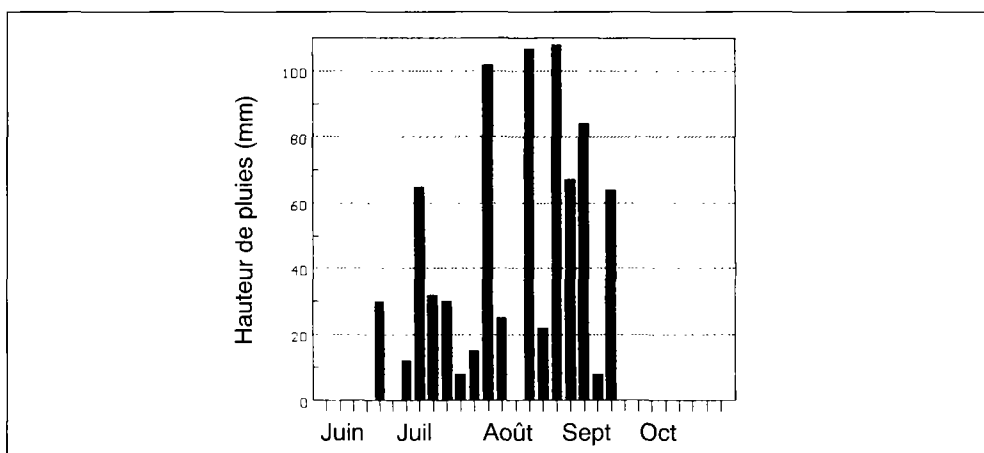


Figure 2a. Pluviométrie pentadaire (tous les 5 jours) de Karguella, pendant la période de l'étude, en 1986.

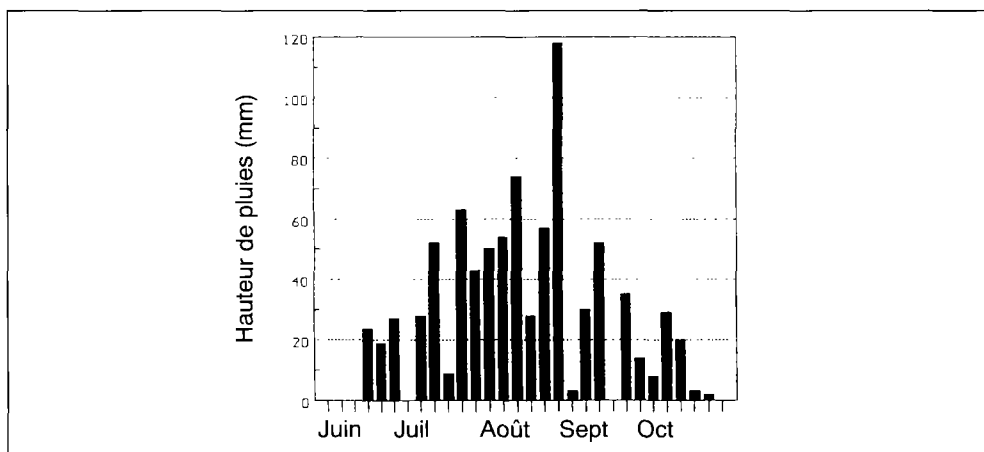


Figure 2b. Pluviométrie pentadaire de Karguella pendant la période de l'étude, en 1987.

Le dispositif expérimental adopté est un split plot à quatre répétitions.

a) En 1986 ce dispositif a comporté :

- 2 traitements irrigation (parcelles principales) : irrigation de complément, pluvial strict ;
- 4 traitements doses de fumier (parcelles secondaires) : 0 t/ha, 10 t/ha, 20 t/ha, 30 t/ha.

b) En 1987, le dispositif a été modifié en ce qui concerne les doses de fumier : 0 t/ha, 2,5 t/ha, 5 t/ha, 7,5 t/ha, 10 t/ha.

Tous les traitements ont reçu la même fumure minérale : (200 kg/ha de NPK (14-23-14) en 70 kg/ha d'urée (46 % N). La taille des parcelles secondaires (doses fumier) est de 18 m² (2,25 m x 8 m), celle de la parcelle utile de 14 m² (1,75 m x 8 m).

Les parcelles principales (irrigation) étaient séparées par une diguette de 0,5 m de large.

Les quantités d'eau apportées par irrigation à la planche ont été mesurées avec un déversoir RBC [10]. Quant à la variété utilisée, il s'agit de IRAT 144. Le semis a eu lieu à la mi-juin ; il a été fait en lignes continues avec un écartement de 25 cm. Dose de semis : 80 kg/ha.

Pour la détermination des caractéristiques physiques et chimiques du sol, des échantillons ont été prélevés sur le site expérimental avant la mise en place de l'essai, et dans chaque traitement avant la récolte.

Les résultats de l'analyse chimique ne seront pas abordés.

Résultats

Effets des traitements sur le rendement et la croissance végétative

a) En 1986

Comme le montre le tableau I, chacun des trois traitements de fumier engendre une augmentation de rendement. Mais si statistiquement tous ces rendements sont significativement différents du témoin, ils ne le sont pas entre eux.

Tableau I. Influence du fumier et de l'irrigation de complément sur les rendements du riz pluvial en 1986.

	Doses fumier t/ha	Rendement (14 % hum) kg/ha	Signification
Pluvial strict	0	687	b
	10	2 215	a
	20	2 291	a
	30	2 525	a
Irrigation de complément	0	750	b
	10	2 185	a
	20	2 303	a
	30	2 602	a

CV : parcelles principales = 15 %.

CV : parcelles secondaires = 12,5 %.

Ppds 5 % = 452 kg/ha.

Par ailleurs, entre le traitement irrigation de complément et le témoin, la différence n'est pas significative.

En ce qui concerne la croissance végétative, on constate que les doses de fumier supérieures à 10 t/ha provoquent une croissance végétative importante aussi bien au niveau de la taille des plantes (figure 3) qu'à celui de la surface foliaire.

La quantité totale de pluies tombée durant la période de l'étude est de 791 mm. Les irrigations apportées sont au nombre de 3 : 2 dans la deuxième quinzaine de juin et 1 à la mi-août, mais leurs quantités n'ont pu être mesurées.

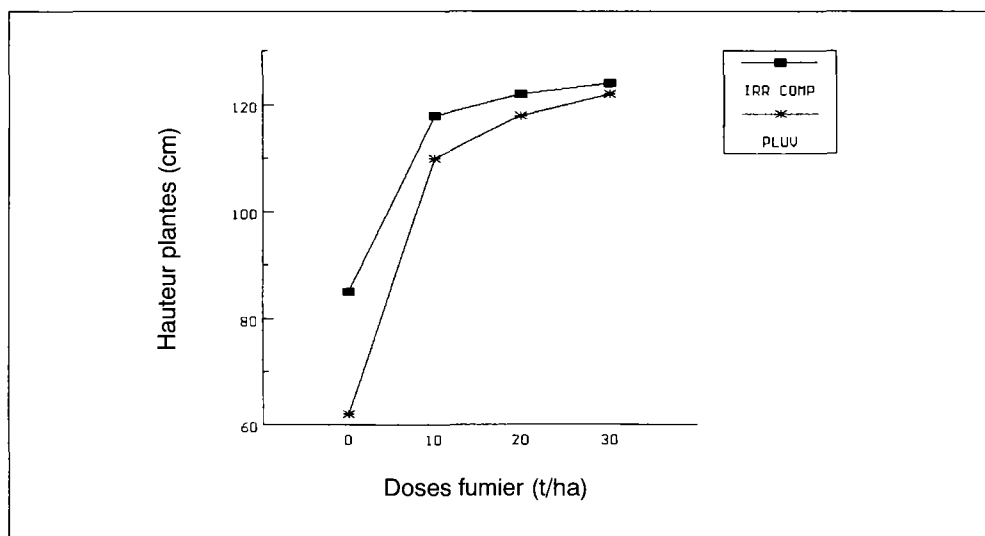


Figure 3. Courbe de croissance du riz en 1986.

b) En 1987

L'analyse statistique donne une différence significative entre les traitements de fumier alors qu'entre les "irrigations" la différence n'est pas significative, de même que leur interaction (tableau II).

La quantité de pluie tombée pendant la durée de l'étude est de 807 mm.

Pour ce qui est des irrigations, il n'y en a eu que 3 au début du cycle végétal dans la deuxième quinzaine de juin, où de longues périodes de sécheresse ont été observées (figure 2b).

La hauteur d'eau totale apportée par irrigation varie, selon les traitements, entre 165 et 185 mm (tableau II).

En ce qui concerne la croissance végétative, on voit sur la figure 4 que la hauteur du riz augmente assez régulièrement entre le témoin et le traitement de 10 t/ha de fumier (près de 20 cm de différence totale) et que les traitements irrigués sont légèrement plus hauts que les traitements en pluvial strict. Par ailleurs, la profondeur d'enracinement aug-

mente également assez régulièrement (figure 5), ce qui donne entre le témoin et la dose de 10 t/ha une différence totale de près de 10 cm. Le maximum de profondeur d'enracinement enregistré est de 40 cm, celle-ci est approximativement la même pour les traitements non irrigués.

Tableau II. Influence du fumier et de l'irrigation de complément sur le rendement du riz pluvial en 1987.

	Doses de fumier (t/ha)	Irrigations		Rendements (14 % hum) kg/ha	Signification
		Nombre	Quantité (mm)		
Pluvial strict	0			905	c
	2,5			1.336	b
	5			1.800	b
	7,5			2.285	a
	10			2.246	a
Irrigation de complément	0	3	185	925	c
	2,5	3	168	1.555	b
	5	3	170	2.204	b
	7,5	3	165	2.468	a
	10	3	170	2.505	a

CV : parcelles principales = 13,2 %.

CV : parcelles secondaires = 14,4 %.

PPDS 5 % = 251 kg/ha.

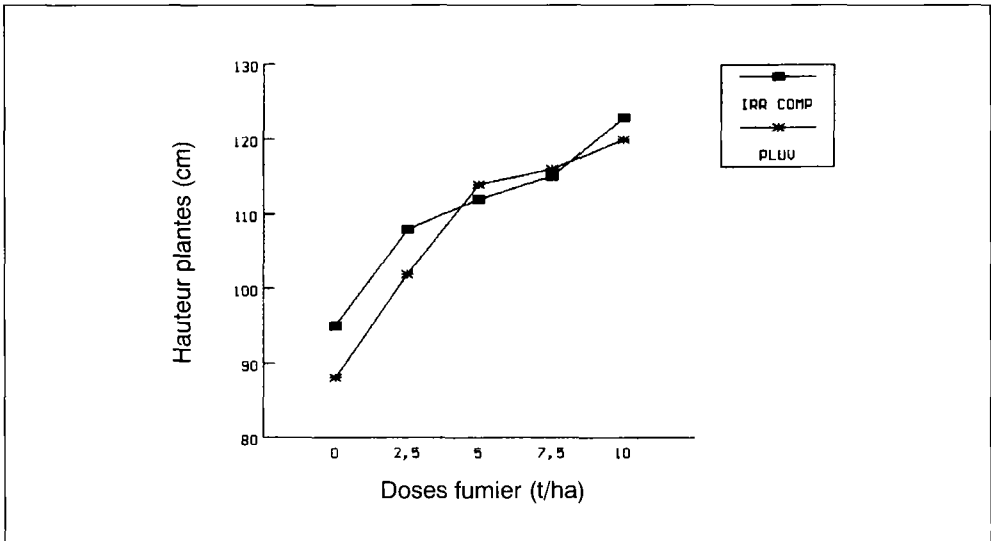


Figure 4. Courbe de croissance du riz en 1987.

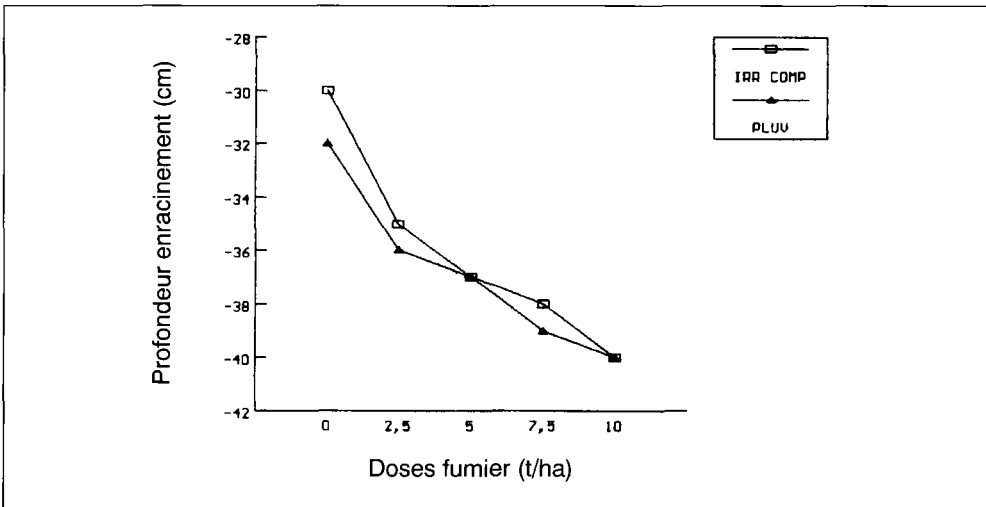


Figure 5. Influence du fumier sur la profondeur d'enracinement du riz.

Effets des traitements sur la rétention en eau du sol

Comme le montre la figure 6, un apport de fumier engendre un léger accroissement de la rétention en eau du sol. Mais l'augmentation de l'humidité pondérale du sol avec des doses croissantes de fumier est très faible. Elle est beaucoup plus faible au point de flétrissement (pF 4,2).

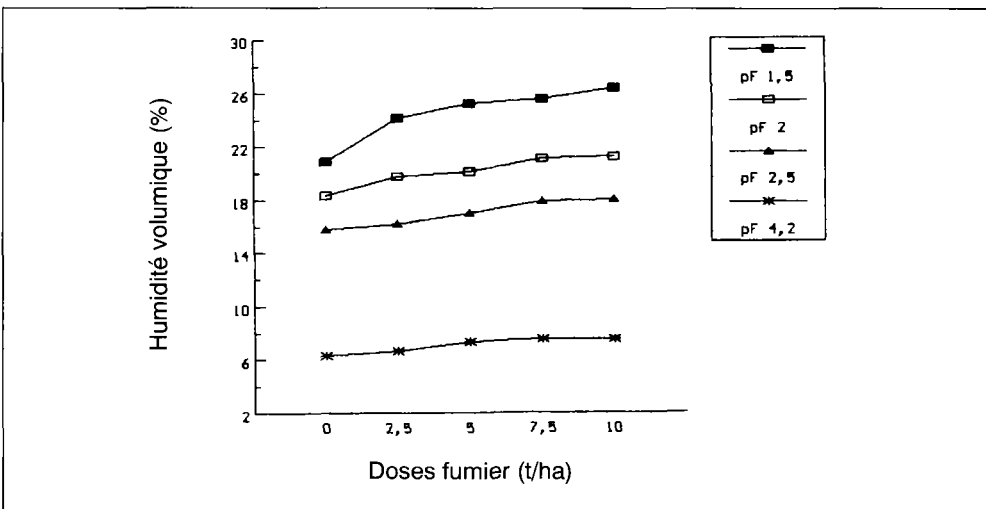


Figure 6. Influence du fumier sur la rétention en eau du sol.

L'effet de la matière organique sur la réserve utile (RU) est illustré par la figure 7. On constate que l'augmentation de la RU entre 0 et 10 t/ha de fumier est également faible. Elle est nulle entre 0 et 2,5 t/ha, légère entre 2,5 et 7,5 t/ha et négligeable entre 7,5 et 10 t/ha.

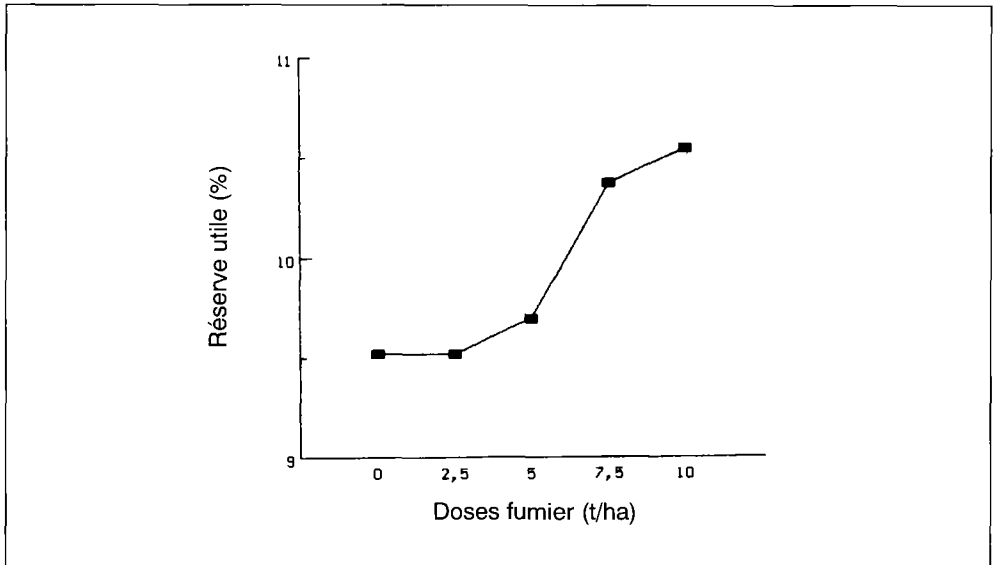


Figure 7. Influence du fumier sur la réserve utile.

Discussion et conclusion

Le dispositif expérimental utilisé en 1986 a été modifié en 1987. Les doses de fumier de 20 t/ha et de 30 t/ha n'ayant pas apporté un supplément de rendement en grain par rapport à la dose de 10 t/ha.

Par contre, leur action s'est traduite par une croissance végétative exagérée (taille, feuillage) favorisant la verse, une prolifération de mauvaises herbes et une apparition de symptômes de pyriculariose sur les feuilles ; or la variété utilisée est réputée assez résistante à cette maladie. Tous ces problèmes se sont manifestés de façon plus significative sur les traitements ayant reçu la dose de 30 t/ha.

C'est pour toutes ces raisons et compte tenu des difficultés que les paysans auraient à se procurer des quantités de fumier importantes que nous avons décidé en 1987 de limiter l'étude à des doses plus faibles (entre 0 et 10 t/ha). Mais si les niveaux de ces doses induisent nettement une augmentation parallèle de rendement en grain, ils ne favorisent qu'un accroisse-

ment très faible de la rétention en eau du sol. L'augmentation des rendements serait plutôt le résultat d'une amélioration de l'alimentation hydrique et minérale du riz due à l'effet de la matière organique sur l'enracinement. La même observation a été faite par Cissé et Vachaud [8] sur le mil et l'arachide au Sénégal.

Les résultats que nous avons présentés montrent qu'avec un apport de fumier de 5 à 10 t/ha, on peut espérer un rendement de 2 à 2,5 t/ha de riz pluvial. Ils indiquent également qu'en année de bonne pluviométrie (régulière), ces rendements peuvent être atteints avec ou sans irrigation de complément. Néanmoins, deux ou trois irrigations peuvent être nécessaires, notamment au début du cycle végétal, pour assurer une levée rapide et homogène, et éviter ainsi les resemis.

La part de l'alimentation minérale devra être bien précisée dans cette étude, la matière organique jouant un rôle important dans l'amélioration de la capacité d'échange de cations et la teneur en éléments fertilisants [6,7]. Le riz est par ailleurs considéré comme répondant bien à la matière organique [11]. L'évolution à long terme des propriétés du sol sous l'effet des apports organiques devra également être étudiée dans les conditions de Karfiguéla. C'est vers cela que notre travail sera orienté.

Références

1. Séré Y., Hebié S. (1989). La production du riz et la recherche rizicole au Burkina Faso. Rapport présenté à la session de la Commission internationale du riz tenue à Galan (Brésil) du 4 au 9 février 1990. INERA/Station Farakoba, Burkina Faso : 25-6.
2. Dembélé S. (1988). Aménagements hydro-agricoles et riziculture. La situation au Burkina Faso. Rapport technique. INERA/Projet BKF/87/001. Station de Farakoba, Burkina Faso : 13-20.
3. CILSS (1987). Développement des cultures irriguées au Burkina Faso. Tome I : Rapport principal CILSS club du Sahel : 5-10.
4. Baldy Ch. (1986). Agroclimatologie et irrigation de complément en zone soudano-sahélienne. La Météorologie, série VII, n° 14, oct. 86 : 36-40.
5. Cruz R.T., O'Toole J.C. (1982). Dryland rice response to and irrigation gradient at flowering stage. Agron. Journ., vol. 76, March-April, 1987 : 178-83.
6. Moormann F.R., Veldkamp W.J. (1977). Land and rice in Africa : constraints and potentials. Proc. Conf. rice in Africa. Ibadan, Nigeria, 7-11 March. Acard.Press, London-New York-San Francisco : 29-41.
7. Delas J., Molot Ch. (1983). Effet de divers amendements organiques sur les rendements du maïs et de la pomme de terre cultivés en sol sableux. Agronomie, 3 (1) : 19-26.
8. Cissé L., Vachaud G. (1988). Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. Bilan de consommation, production et développement racinaire. Agronomie, 8 (4) : 315-26.
9. Sommerfeldt T.G., Chang C. (1986). Soil-water properties as affected by twelve annual applications of cattle feedlot manure soil. Sci Soc. AM.J. vol. 51 : 7-9.
10. Clemmens A.J., Bos M.J., Repogle J.A. (1984). Portable RBC flumes for furrow and earthen channels. Trans of ASAE : 1016-26.
11. Chaminade R. (1958). Influence de la matière organique humidifiée sur l'efficacité de l'azote. ANN Afron. II : 167-72.

23

L'amendement organique des sols sableux : une assurance contre les préjudices de la sécheresse. Cas de Thilmakha (isohyète 300 mm)

F. GANRY¹, L. CISSE²

1. CIRAD, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

2. ISRA/CNRA, BP 51, Bambey, Sénégal

Nos études sur la régénération des sols dégradés de la zone sahélienne Centre-Nord visent deux objectifs majeurs : a) assurer une production minimale (objectif de production : 1 t/ha de grain de mil et 1 t/ha de gousses d'arachide) avec le minimum d'intrants coûteux ; b) accroître la tolérance à la sécheresse des cultures.

La présente note a pour but de montrer l'effet bénéfique de l'amendement organique, plus précisément l'effet cumulatif des apports de fumier, en année à très faible pluviométrie — moins de 300 mm — sur la production végétale d'un système de culture mil-arachide proche de son état d'équilibre. Ce concept de système à "l'équilibre" peut être défini de la façon suivante : un système a atteint son état d'équilibre, lorsque, sous l'action répétée des mêmes techniques culturales, les inputs compensent les outputs (essentiellement N, P et S) ; par exemple, en ce qui concerne N, la plante puise aux trois sources de N : engrais, fixation de N₂ et sol. L'apport de N (naturel et artificiel) compense la consommation de la plante lorsque le système a atteint l'état d'équilibre organique.

Matériel et méthode

Une expérience au champ pluriannuelle déjà décrite par ailleurs [1-4] a été mise en place en 1972 en vue d'étudier l'influence de certaines pratiques culturales (fumure minérale, chaulage, enfouissement de fumier) sur la symbiose fixatrice de N_2 et le rendement de l'arachide, ceci en raison de symptômes inquiétants de chlorose azotée, voire de "nanisme jaune", en extension, que présente l'arachide dans cette région.

Les différents traitements, chaulage ou enfouissement de fumier, sont appliqués tous les deux ans sur la culture d'arachide, en plus d'une fumure minérale (la fumure recommandée par les services de vulgarisation) appliquée annuellement ; les parcelles mesurent 6 m x 8,70 m :

– fumure minérale : - arachide : 150 kg/ha d'engrais ternaire 8-18-27

- mil : 150 kg/ha d'engrais ternaire 14-7-7

– chaulage : 600 kg/ha/2ans de $Ca(OH)_2$

– fumier : 10 t/ha/2ans à une humidité comprise entre 50 et 60 % par rapport au poids frais.

On considère le système de culture après un minimum de quatre ans de fonctionnement. De 1976 à 1983, la pluviométrie à Thilmakha a été respectivement chaque année de 307, 350, 441, 351, 263, 329, 406, 206 mm. Les deux années dont nous relatons les résultats sont 1980 et 1983, années les moins pluvieuses ayant eu respectivement 263 mm et 206 mm de pluviométrie. D'après Diagne et Vanderschmidt (communication personnelle), l'espérance de pluviométrie deux, cinq et huit années sur dix, est respectivement de 437 mm, 327 mm et 250 mm (estimations faites sur la période 1972-1987).

Résultats

Effet de l'amendement sur la symbiose

Les premières années d'application des différentes techniques culturales, de 1972 à 1976, on remarque un effet bénéfique sur l'efficiencia des nodosités, mais nul sur l'importance de la nodulation des systèmes racinaires ; en revanche, sur une période plus longue, on s'aperçoit que **l'effet cumulatif** des techniques culturales (chausage et/ou fumier) se révèle spectaculaire sur la nodulation évaluée en nombre et en poids de nodosités (tableau I) [2].

Effet de l'amendement sur le rendement

Comme indiqué au paragraphe précédent, nous présentons les résultats des années 1976 à 1983 dont la pluviométrie est inférieure à 300.

Année 1980 - Pluviométrie 263 mm à Thilmakha

• **Arachide :**

Les amendements calciques et organiques accroissent significativement le rendement de l'arachide. Le fumier permet de doubler le rendement en gousses qui atteint plus de 800 kg M.S./ha et de tripler le rendement en paille qui atteint 1,4 t M.S./ha (tableau Ia). Certes, ces rendements sont faibles, mais, comparativement aux rendements obtenus en champs paysans avoisinant ceux du témoin, ils assurent un revenu non négligeable, notamment en fourrage que constituent les pailles.

• **Mil :**

En absence d'amendement organique, les rendements en grains sont inférieurs à 100 kg M.S./ha ; avec apport de fumier, les rendements atteignent 1,2 t M.S./ha (tableau Ib). L'amendement organique permet de décupler les rendements ; il assure un revenu vivrier satisfaisant.

Tableau I. Rendements de l'arachide et du mil à Thilmakha en 1980 - Pluviométrie 263 mm. (Rotation mil-arachide en place depuis 1972 avec labour sur arachide et fumure minérale annuelle vulgarisée pour les 2 cultures).

a - Arachide C.V. 55-437 (semis-récolte : 90 jours)

Traitements	Rendements kg M.S./ha		Nodulation	
	Gousses	Pailles	Nombre par plante	Poids M.S. mg/plante
Témoin	413a	487a	15	51
+ chaux	725b	833b	97	116
+ fumier	816b	1367c	98	113
C.V. %	21	12	n.d.	n.d.

b - Mil Souna III (levée-récolte : 90 jours)

Traitements	Rendements	
	Grain kg M.S./ha	Paille t M.S./ha
Témoin	84a	1,0
+ chaux	96a	1,0
+ fumier	1196b	3,5
C.V. %	26	n.d.

Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au test de Newman et Keuls
P = 0,05.

n.d. : non déterminé.

Année 1983 - Pluviométrie de 206 mm à Thilmakha

La répartition décadaire de la pluviométrie indiquée au tableau III apparaît extrêmement défavorable à la production végétale. Avec aussi peu d'eau, les récoltes sont généralement fort compromises, voire inexistantes. Tel est le cas des témoins.

Sur ces témoins, malgré le labour et la fumure minérale, les rendements sont négligeables : de l'ordre de 125 kg M.S./ha de gousses et 300 kg M.S./ha de grain de mil ; les rendements en pailles sont également très faibles. En revanche, l'apport de fumier permet d'accroître sensiblement les rendements :

- pour l'arachide, le rendement en gousses passe de 125 à 600 kg M.S./ha et en pailles de 500 à 2 500 kg M.S./ha, représentant une quantité de 86 kg/ha N total¹ plante entière (parties aériennes), sept fois supérieures à celle du témoin (tableau IIa) ;

Tableau II. Rendements de l'arachide et du mil à Thilmakha en 1983. Pluviométrie 206 mm (Rotation mil-arachide en place depuis 1972 avec labour sur arachide et fumure minérale annuelle vulgarisée pour les 2 cultures).

a - Arachide C.V. 55-437 (Semis-récolte : 90 jours).

Traitements	Rendements kg M.S./ha			
	Gousses	Pailles	Plante entière	N total plante entière
Témoin	126	475	600a	13a
+ chaux	333	1294	1630b	45b
+ fumier	591	2500	3090c	86c
C.V. %	n.d.	n.d.	18	20

b - Mil souna 3/4 ex-Bornu (levée-récolte : 90 jours).

Traitements	Rendements kg M.S./ha			
	Gousses	Pailles	Plante entière	N total plante entière
Témoin	292 ¹	1878	2170a	28a
+ chaux	298 ²	2673	2970b	37b
+ fumier	400 ³	3334	3730c	51c
C.V. %	n.d.	n.d.	19	21

Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au test de Newman et Keuls $P = 0,05$
n.d. : non déterminé

(¹) 2 parcelles sur 6 n'avaient pas de grains. (²) 1 parcelle sur 6 n'avait pas de grains. (³) Toutes les parcelles avaient des grains.

1. 60 kg N/ha dans les pailles.

• pour le mil, le rendement en grain est un peu différent du témoin, mais le rendement en paille est accru sensiblement, il est de l'ordre de 3,3 t M.S./ha, presque deux fois supérieur à celui du témoin, représentant (grains + pailles) une quantité d'environ 50 kg N total/ha, deux fois supérieure à celle du témoin ; à noter que toutes les parcelles cultivées en mil ont donné du grain, comparativement à l'irrégularité de la production sur les témoins (tableau IIb).

Ces résultats de l'année 1983 montrent la potentialité de production du mil et de l'arachide recevant l'amendement organique (apporté sur l'arachide dans la rotation), mais qui n'ont pu exprimer leur production en grains en raison de l'arrêt précoce des pluies contrairement à 1980 (tableau II). La culture d'une variété de mil à cycle plus court (70 à 75 jours par exemple) aurait permis d'obtenir un rendement en grains vraisemblablement supérieur [5].

Avec une telle variété, si l'on se base sur un rapport grain/paille de 0,35 (valeur moyenne obtenue par nous-mêmes à Bambey pour un mil variété *syn. 75.1* de 75 jours recevant 30 kg N-engrais/ha et en conditions de production satisfaisantes), pour une production en grain + paille de 3,7 t M.S./ha (la production en matière sèche totale enregistrée cette année 1983 à Thilmakha pour une saison des pluies utiles de 60 jours), on aurait pu obtenir dans les conditions de l'année 1983 un rendement grain de l'ordre de 1,0 t M.S./ha. L'utilisation quasi totale de l'eau de pluie par les cultures dans les sols amendés par le fumier explique ce net accroissement de la production végétale par rapport au témoin [3,4].

Tableau III. Pluviométrie décadaire en mm à Thilmakha en 1980 et 1983.

Tableau IIIa

Année 1980	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Première décade	8	74	37	34 (récolte)
Deuxième décade	0	27	4	0
Troisième décade	23 (semis)	17	27	0
Total.	31	118	68	34

Tableau IIIb

Année 1983	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Première décade	0	9	67 (semis)	0	0
Deuxième décade	18	1	4	24	0
Troisième décade	0	0	68	16	0 (récolte)
Total	18	10	139	40	0

Discussion - conclusion

L'amendement organique : une assurance contre les préjudices de la sécheresse

Même sévère (jusqu'à 200 mm de pluviométrie), la sécheresse laisse un espoir de récolte car, au minimum, l'amendement organique permettra une production satisfaisante de paille de céréale (2,5 t à 3,5 t M.S./ha pour le mil) et de paille de légumineuse (fourrage) (1,5 à 2,5 t M.S./ha pour l'arachide). L'amendement organique est une assurance pour l'élevage, lequel est la voie la plus réaliste pour produire cet amendement *via* le fumier.

Aptitude des variétés de mil à cycle court (70 à 75 jours)

Si, par malchance, à la faible pluviométrie, s'ajoutait l'irrégularité des pluies, ces variétés augmenteraient la probabilité d'une production correcte de grain qu'on peut estimer à 1,0 t M.S./ha pour la zone ; il importe cependant de se soucier d'un rendement en paille suffisant pour satisfaire aux besoins de l'élevage.

Faisabilité de l'amendement organique en milieu rural

Trois conditions doivent être réalisées :

- disponibilités en résidus de récolte ;
- transformation des résidus de récolte en fumier composté ;
- incorporation du fumier dans le sol.

Condition 1. Connaître les disponibilités en pailles

Dans les conditions actuelles, ces disponibilités sont très faibles, de l'ordre de 1 t/ha [6]. Pour les accroître, il faut, d'une part sédentariser l'élevage afin d'inciter l'agriculteur à exploiter et valoriser ses pailles par lui-même et pour lui-même, et, d'autre part, amender les terres (pour prendre une image, nous dirons que cela devrait permettre "d'amorcer la pompe" à biomasse) ; dans l'expérience en objet, les amendements ne se sont révélés fructueux qu'après 8 années, soit après 4 à 5 apports de fumier.

Condition 2. Composter le fumier et apporter des doses réalistes

La production de fumier en élevage partiellement sédentarisé se fait essentiellement de juin à octobre, soit pendant 5 mois, en raison de la disponibilité en eau durant cette période. D'après une étude de Hamon [7], 4 UBT (Unité Bétail Tropical) peuvent utiliser en stabulation 5,6 t de paille de mil (soit environ 5,0 t M.S.) et produire 7,7 t de fumier à 45 % de M.S. (incluant 25 % de terre humifère). Cet auteur conclut qu'on peut espérer produire au Sénégal (zone de Bambey) pendant la saison des pluies, par UBT et par jour, 10 à 12 kg de fumier à 45 % de M.S.

Sur ces bases, la production en paille obtenue en année à très faible pluviométrie de l'ordre de 2,5 à 3,5 t M.S./ha (2,5 t dans le cas d'un mil à cycle court) permet d'estimer quelle pourrait être la production annuelle possible de fumier à partir des pailles de mil

d'un système mil-arachide. Cette production, donc l'apport possible au champ, serait de 4 à 5 t/ha (45 % M.S.). Faisant l'hypothèse que la totalité des pailles de mil récoltées sont utilisées comme litière, dont 1/5 à 1/4 sont ingérées par les animaux [7], il est réaliste de penser que 2 ha de terre en rotation arachide-mil² pourraient alimenter en litière et partiellement en fourrage³ de 2 à 3 UBT. Ces UBT produiraient 4 à 5 t de fumier à 45 % de M.S. tous les ans (jusqu'à 8 t en année à pluviométrie satisfaisante). La réalisation d'un bon fumier suppose son compostage, donc l'utilisation maximale des eaux d'hivernage. Le compostage (il s'agit d'un fumier pailleux) démarre en saison des pluies et se termine, soit en octobre si l'enfouissement est possible en fin de cycle, soit en avril-mai pour un épandage en début de cycle mais sans arrosage supplémentaire (Ganry et Gueye cités par Mustin [8]).

Ce compostage s'opère en fosse [9] ou en stabulation sous les animaux [7] ; dans ce dernier cas, l'apport d'une faible quantité de litière en saison sèche fera écran à l'évaporation de l'eau à partir des couches sous-jacentes, permettant au compostage de se poursuivre.

En pratique, dans la zone écologique de Thilmakha où la pluviométrie est inférieure à celle de Bambey d'environ 100 mm, il est à prévoir de réelles difficultés de compostage par manque d'eau. Pour cette raison, la fosse compostière et/ou l'étable fumière devront se situer dans une dépression ou bas-fond permettant de recueillir les eaux de ruissellement⁴ (bassin de réception des eaux). Un petit aménagement sera alors nécessaire, comprenant notamment un bassin de décantation.

Condition 3. Incorporer le fumier du sol

S'il n'existe pas de problèmes majeurs pouvant compromettre la fabrication du fumier en zone tropicale sèche, par contre son utilisation rationnelle au champ se heurte à des obstacles majeurs :

- le transport au champ est limité souvent par le manque de tombereaux ou de charrettes ;
- l'enfouissement, en fin de cycle derrière une variété hâtive de mil ou d'arachide, est conditionné par les dernières pluies ; la raréfaction des pluies rend très improbable la possibilité d'une telle opération ;

2. Assolement : 1 ha en arachide, 1 ha en mil.

3. Sur la base d'une ration quotidienne de travail de 8 kg, les 1,5-2,5 M.S./ha de paille d'arachide récoltée en 1980-1983 auraient pu nourrir 2 à 3 UBT durant 3 mois, le complément fourrager devant nécessairement être assuré par l'herbe de brousse et le foin "médiocre", à défaut de véritables légumineuses fourragères.

4. Un calcul rapide montre qu'on peut obtenir 3m³ d'eau sur une surface de 60m² sous une pluviométrie de 250 mm avec un coefficient de ruissellement de 20%. Ces 3m³ d'eau suffisent à la production de 5 t d fumier à 45% M.S.

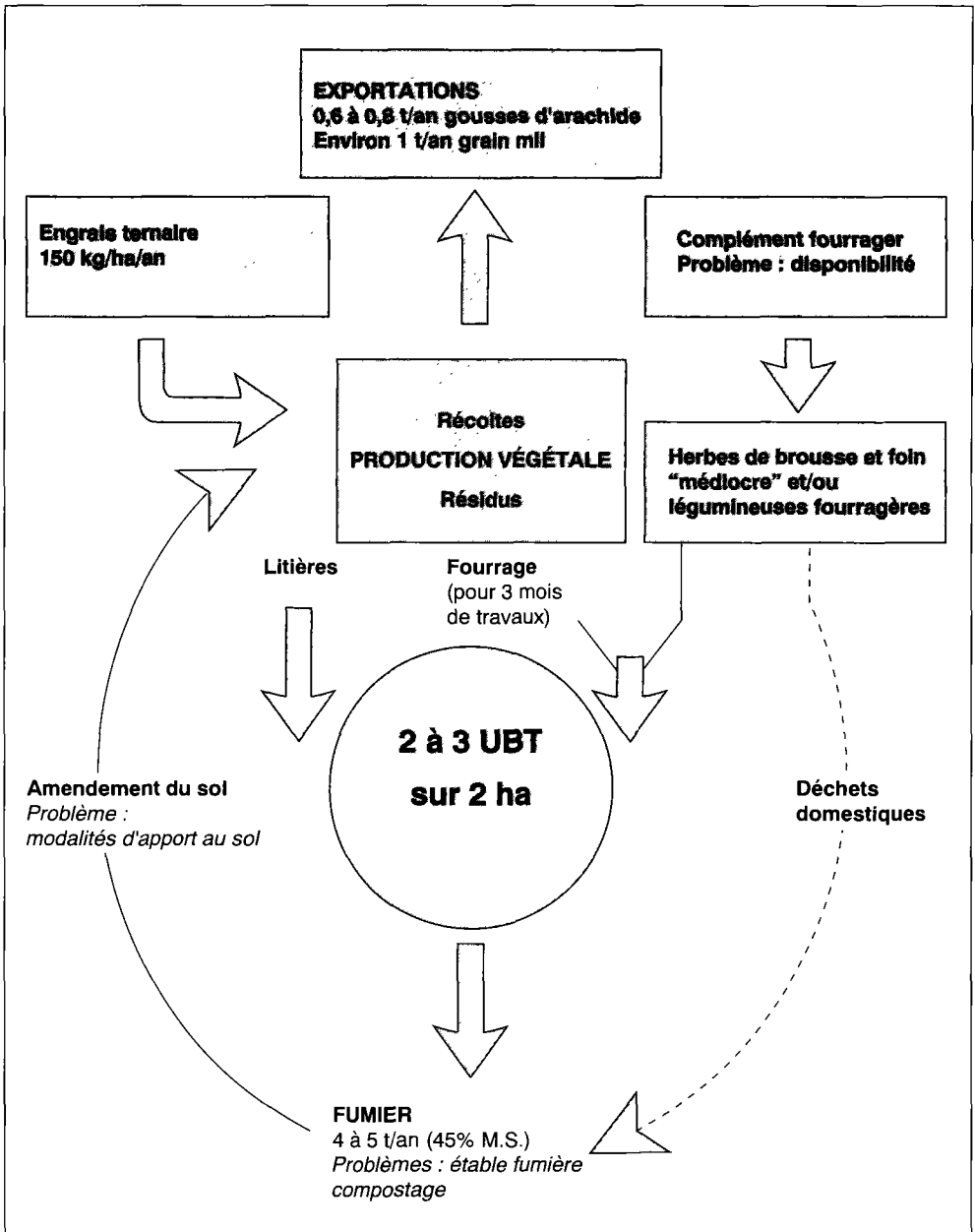


Figure 1. Conditions de fonctionnement en zone sahélienne et en sol régénéré du système de culture mil-arachide (objectif de production 0,6 à 0,8 t/ha de gousses d'arachide et 1 t/ha de grain de mil) en années sèches (200 mm < pluviométrie < 300 mm), et fondée sur l'intégration de l'élevage. (UBT = Unité Bétail Tropical).

– l'enfouissement en début de cycle avant l'arachide de la rotation serait possible juste après la première pluie utile, les paysans semant généralement l'arachide juste après la deuxième pluie utile. En cas d'impossibilité de labour, l'incorporation au sol par un travail profond au canadien peut être opérée ; mais cette opération culturale en début de cycle ne doit en aucune manière être une cause de retard des semis ;

– les difficultés du travail du sol en milieu rural nous font envisager l'enfouissement localisé (tous les mètres par exemple) ponctuel ou en ligne ou l'apport en bande en cours de cycle ; l'effet cumulatif de la répétition de ces opérations donnerait vraisemblablement le même résultat que l'effet cumulatif des enfouissements classiques par labour ou par canadien. Des expérimentations pluriannuelles sur ce thème sont à envisager, avec le concours indispensable des spécialistes du machinisme agricole.

Conclusion

Cette étude montre que la sécheresse même sévère, pluviométrie comprise entre 200 mm et 300 mm, analysée sous l'angle de son effet sur la production végétale, cesse d'être un fléau pour l'agriculteur s'il arrive à gérer son système de culture sous certaines conditions résumées ci-dessus et représentées schématiquement à la figure 1. Ce système à l'état d'équilibre organique peut produire même en année sèche de 600 à 800 kg/ha de gousse et 1 t/ha de grain. Il nécessite une gestion rationnelle des résidus de récolte dans le cadre d'une intégration de l'agriculture et de l'élevage (2 à 3 UBT pour 2 ha) et un complément fourrager pour la saison sèche. Il permet alors un amendement organique à une dose minimale de 4 à 5 t/ha/an de fumier à 40-50 % M.S.

La validité du modèle d'exploitation préconisé ne pourra être confirmée que par l'épreuve en milieu réel, d'autant plus que certains auteurs s'interrogent sur son réalisme et attestent même qu'il n'est pas un objectif de développement crédible [10].

Références

1. Wey J., Obaton M. (1978). Incidence de quelques techniques culturales sur l'activité fixatrice d'azote et le rendement de l'arachide. *L'Agron. Trop.* 33, 129-35.
2. Wey J., Siband P., Oliver R., Egoumenides C., Ganry F. (1987). Essai de régénération d'un sol de la zone arachidière du Centre-Nord du Sénégal. *L'Agron. Trop.* 42, 258-68.
3. Cissé L., Vachaud G. (1987). Une méthode simplifiée d'estimation *in situ* de l'extraction de l'eau par les racines. *L'Agron. Trop.* 42, 241-7.
4. Cissé L., Vachaud G. (1988). Influence d'apports de matière organique sur la culture du mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord Sénégal. I. Bilan de consommation, production et développement racinaire. *Revue Agronomie* 8, 315-26.

5. Dancette C. (1979). Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.* 34, 4, 331-55.
6. Allard J.L., Bertheau Y., Drevon J.J., Seze O., Ganry F. (1983). Ressources en résidus de récolte au Sénégal. *L' Agron. Trop.* 38, 213-21.
7. Hamon R. (1972). L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (Bilan de 3 années d'études). *L'Agron. Trop.* 27, 592-607.
8. Mustin M. (1987). Le compost - Gestion de la matière organique. Paris, Dubusc, 950 p.
9. Ganry F., Sarr F., Sarr P.L. (1983). Valorisation du recyclage organique dans un objectif d'économie des engrais et de maintien de la fertilité des sols au Sénégal. Collection : Etudes Techniques du CNRA, 100/83, 20 p.
10. Landais E., Lhoste P. (1990). Les relations Agriculture-Elevage en Afrique intertropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. Doc. Ronéo IEMVT, Paris, 37 p.

SESSION V

Gestion agricole des précipitations sur le bassin versant

Animateur : L. Sarr

Rapporteur : N. Aho

24

Influence des cordons pierreux sur la relation entre le bilan hydrique et le rendement du mil dans le bassin versant de Oualaga à Namsiguia au Burkina Faso

H.J.W. VAN DUIJN¹, W.F. VAN DRIEL¹, O. KABORE²

1. CIEH/UAW, 01 BP 369, Ouagadougou, Burkina Faso

2. IDR, Université de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso

Introduction

En 1988, le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), en collaboration avec le Centre régional de promotion agro-pastorale du Centre-Nord (CRPA-CN), a commencé un programme de recherche dont l'objectif était l'évaluation technique des aménagements anti-érosifs sur microbassins versants pour la conservation des eaux et des sols. Cette recherche est financée par le projet de Programmation et d'exécution de développement intégré (PEDI).

A cet effet, deux microbassins versants adjacents, dans le bassin de Oualaga à Namsiguia (20 kilomètres au nord-ouest de Kaya) (figure 1), ont été sélectionnés.

Dans ce cadre, une recherche a été exécutée pendant la saison pluvieuse de 1991, avec

l'appui de l'université agronomique de Wageningen, dont l'objectif était justement d'analyser l'impact de l'augmentation du taux d'humidité du sol (résultant de la présence des cordons pierreux) sur le rendement du mil.

Description de la zone d'étude

La région de la recherche est caractérisée par une pluviométrie annuelle variant entre 500 et 800 mm.

Les deux bassins versants ont une superficie de 43 hectares, et sont semblables du point de vue morphopédologique. Ils ont été aménagés par les paysans avec des cordons pierreux sur les terres hautes et des digues filtrantes dans le thalweg (figure 1).

La partie amont des bassins versants est un plateau latéritique durci en surface, sans champs de culture. Cette partie sert d'impluvium pour la partie aval et le glacis inférieur. Elle est cultivée par les paysans (mil, sorgho et maïs) et composée de sols sableux et sablo-limoneux. Deux quartiers d'habitation se trouvent juste à l'aval de l'escarpement entre le plateau et le glacis. La limite aval des bassins est formée par les ouvrages de mesure des débits et leurs digues latérales construites pour la recherche.

L'aménagement du bassin versant A a été exécuté pendant la saison sèche (février à juin) de l'année 1988. Le bassin versant B a été partiellement aménagé en 1990. Le plan d'aménagement compte trois éléments : une digue d'épandage, des pierres alignées et des traitements de ravines.

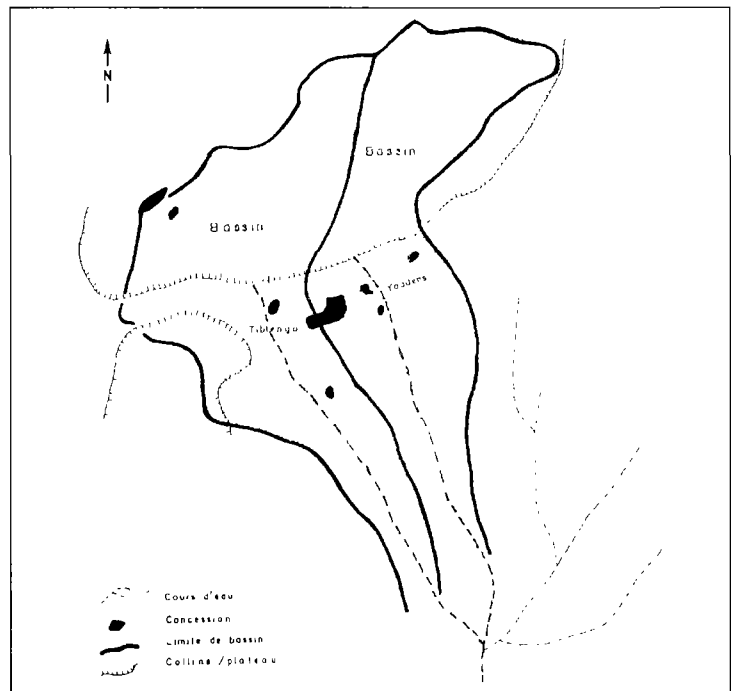


Figure 1. Les bassins versants de la recherche à Namsiguia, centre-nord du Burkina Faso.

Description du cordon de pierres

Les cordons pierreux sont composés d'un alignement de blocs de cuirasse, alignés le long des courbes de niveau. Ils font partie des dispositifs utilisables sur les zones de ruissellement en nappe, où les passages de l'eau sont encore peu marqués. Leur rôle est de :

- laisser infiltrer l'eau,
- favoriser l'étalement de l'eau,
- diminuer la vitesse de l'eau et donc son énergie,
- provoquer le dépôt de particules de terre, de grains et de débris végétaux transportés par le ruissellement,
- permettre la rétention d'une faible quantité d'eau en amont, son infiltration et donc le stockage d'une quantité d'eau supplémentaire au niveau du cordon de pierre [1].

Méthodologie

Six sites, sur les sols ferrugineux peu lessivés du glacis inférieur, ont été choisis en fonction des critères suivants : ils présentent tous des textures de sol semblables et une topographie identique (pente de 1,1 à 1,3 % uniforme). De plus, tous les terrains ayant reçu une fumure ménagère ou se trouvant à l'ombre des arbres ont été éliminés.

En procédant de la sorte, on s'assure de conditions d'infiltration et de ruissellement identiques sur l'ensemble des sites.

Les sites de forme rectangulaire ont une largeur de 6 mètres et une longueur variant entre 20 et 30 mètres. Chaque site comporte deux cordons pierreux : l'un à l'amont, l'autre à l'aval, perpendiculairement à la ligne de plus grande pente (donc à la direction du ruissellement). Les sites sont tous situés dans un rayon de 700 mètres.

Un suivi agronomique a été effectué pour l'ensemble des 6 sites ; l'humidité du sol a été suivie uniquement sur 3 sites pour des raisons pratiques.

Chaque site se compose de trois parcelles d'égales dimensions (4 x 6 m) (figure 2) :

- parcelle amont : directement en amont d'un cordon pierreux ;
- parcelle aval : directement en aval du cordon pierreux supérieur ;
- parcelle du milieu : entre les parcelles amont et aval.

Au niveau des bassins versants, les volumes précipités ont été calculés en appliquant la méthode de Thiessen, à partir des données pluviométriques fournies par trois pluviomètres de type "professeur Hellmann". Les prélèvements ont été faits systématiquement pendant toute la saison pluvieuse. Parallèlement aux volumes précipités, les volumes de ruissellement ont été calculés à l'aide des limnigraphes ayant enregistré les hauteurs en amont des ouvrages de mesure calibrés, situés à l'exutoire de chaque bassin versant.

Les 9 parcelles expérimentales des 3 sites mentionnés précédemment ont été équipées pour le suivi de l'humidité du sol.

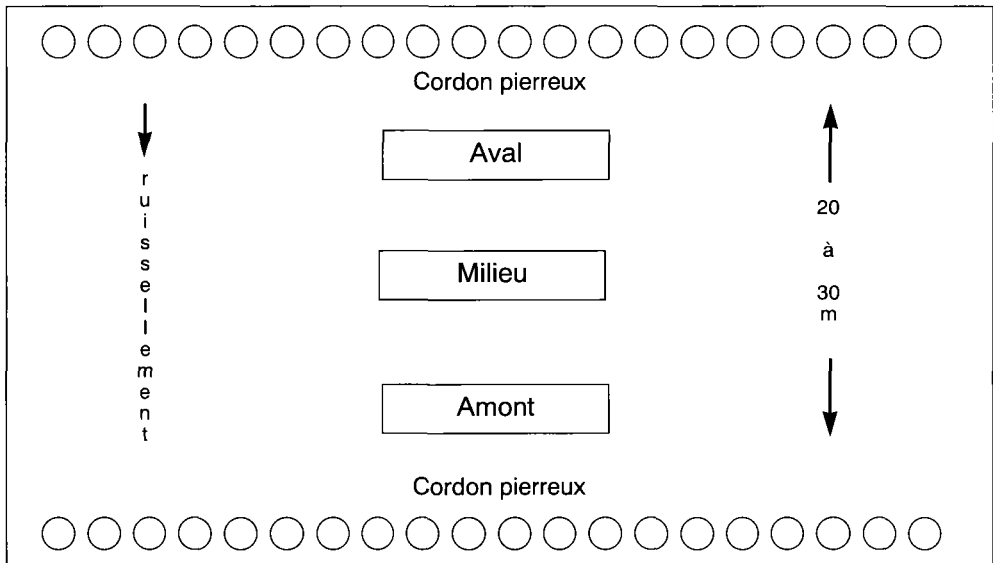


Figure 2. Position des parcelles entre les cordons pierreaux.

Un humidimètre neutronique type CPN 503 DR a été utilisé afin de connaître l'évolution dans le temps du taux d'humidité du sol en amont, au milieu et en aval des cordons pierreaux. Pour cela, trois tubes d'accès pour l'humidimètre neutronique ont été disposés dans les parcelles, chacun à une profondeur effective de 1,2 mètre. A cause de l'arrivée tardive de l'humidimètre neutronique, les premières mesures du programme ont été faites le 10 juillet, 48^e jour après le semis (JAS) et le 17 juillet (54^e JAS). A partir du 23 juillet, le taux d'humidité a été suivi tous les trois jours, et ceci jusqu'à la fin de la récolte, le 18 octobre. Le taux d'humidité pour les 27 tubes a été mesuré à 12 profondeurs différentes. A la fin de la saison des pluies, une calibration de l'humidimètre a été faite sur les 9 parcelles : des échantillons de sol non perturbé ont été prélevés, l'humidité volumique a été déterminée et une relation linéaire entre ces données et celles de l'humidimètre neutronique a été établie. 8 échantillons pour déterminer la courbe de pF ont été prélevés et analysés au laboratoire.

Toutes les parcelles expérimentales ont été semées le 23 mai avec du mil local (*Pennisetum typhoides*), les paysans y ont appliqué les consignes suivantes :

- la non-utilisation de fumure,
- l'application du semis en ligne,
- le traitement des semences au thioral.

Le semis a été fait à la main à l'aide de la pioche locale ; le nombre de graines par poquet était de l'ordre de 5. La distance entre les lignes et entre les poquets du mil a été obtenue par l'utilisation d'un rayonneur (resp. 80 cm et 40 cm). Pendant la saison, 3 sarclages ont été faits pour détruire les adventices et améliorer l'infiltration de l'eau.

Le développement des plantes a été suivi. Les mesures portent sur 10 échantillons de plantes choisies au hasard dans les 3 lignes internes de chaque parcelle.

Sur l'ensemble de la saison on a noté les phases suivantes lorsque 50 % des plantes de l'ensemble des parcelles avaient atteint ces phases :

- le tallage (42^e JAS, le 4 juillet) : cette phase commence quand les talles apparaissent au niveau du nœud jusqu'à leur développement ;
- la montaison (58^e JAS, le 20 juillet) : cette phase commence quand les entre-nœuds s'allongent ;
- l'épiaison-floraison (84^e JAS, le 15 août) : elle va de la formation de la panicule à la floraison sur la tige principale ;
- la récolte (135^e JAS, le 5 octobre) : cette phase se situe à la fin du stade de la floraison et au moment de la maturité physiologique.

La méthode d'étude de l'enracinement est celle proposée par Chopart [2]. Les principaux paramètres racinaires retenus sont la profondeur du front racinaire, le degré de colonisation du sol par les racines et le nombre de racines principales émises par la plante.

La récolte a été faite à l'aide de coupe-coupe, uniquement sur les plantes des lignes internes. Les plantes de la périphérie ont été proscrites pour éviter l'effet de bordure.

En ce qui concerne les rendements, on peut distinguer la production de grains et celle de paille.

– Les grains : les épis récoltés des plantes des lignes internes sont regroupés et séchés par parcelle ; on en extrait les grains à l'aide d'un mortier. Ces derniers sont ensuite pesés après séchage.

– La paille est formée des tiges et des feuilles après récolte (partie aérienne de la plante diminuée des épis). Pour mesurer le rendement, on pèse la paille après 7 jours de séchage au soleil.

La fertilité des sols pour chacune des 9 parcelles a été estimée en prélevant et en mélangeant 5 échantillons de sol, et en analysant le mélange. Les prélèvements ont été effectués à une profondeur de 0 à 20 cm et de 20 à 40 cm. Les paramètres de la fertilité retenus sont : le taux de NPKC et celui de matière organique. On a également mesuré le taux de NPK dans les feuilles, les tiges et les graines des lignes internes des parcelles.

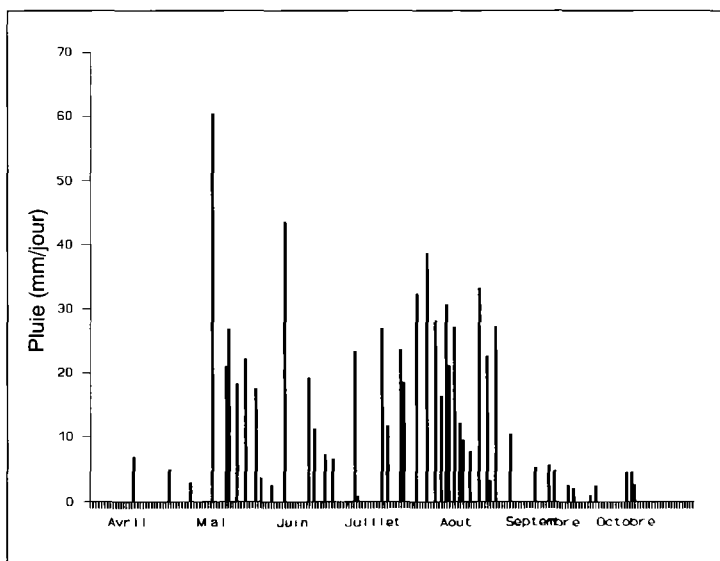
Résultats et analyses

La pluviométrie

La figure 3 illustre la pluviométrie de l'année 1991.

La pluviométrie totale, mesurée à Namsiguia pour l'année 1991, a été de 740 mm. Les pluies ont débuté très tôt dès mi-avril (habituellement, elles commencent en mi-juin). En mai, la pluviométrie dans tout le centre-nord du Burkina Faso a été largement excédentaire par rapport à la moyenne de la période 1951-1980. Mais dans les mois qui ont suivi cet excédent s'est réduit. La pluviométrie du mois de juin a été caractérisée par de fréquentes périodes sèches et de faibles pluies. Les mois de juillet, août et septembre ont été normaux ou déficitaires par rapport à la moyenne de 1951-1980. La saison pluvieuse de 1991 est

Figure 3. Pluviométrie de 1991 à Namsiguia, région Centre-Nord, Burkina Faso.



normale par rapport à 1951-1980 (720 mm), mais largement excédentaire par rapport à celle des dix dernières années (497 mm) [3]. Pendant la saison de croissance des plantes, on a enregistré une pluviométrie de 599 mm (81 %) et les pluies ont été bien réparties. Au total, pendant la période culturale on a mesuré 38 pluies par rapport à 47 pluies sur l'ensemble de la saison pluvieuse (80 %). Il y a eu deux périodes sèches de 8-9 jours, du 1^{er} au 8 juillet (phase de tallage) et du 10 au 18 juillet (phase de montaison). Ces deux périodes se sont respectivement terminées par une pluie de 24 et 27 mm.

Evolution de l'humidité du sol

Les données de l'humidimètre neutronique de chacun des trois tubes d'une parcelle sont analysées, et pour les trois tubes une moyenne est calculée. A partir de cela, on a calculé une moyenne générale des trois parcelles (amont, milieu, aval) pour plusieurs profondeurs de sol (de 20 à 120 cm) ; celles-ci sont présentées dans la figure 4. Les analyses du pF ont indiqué un taux moyen d'humidité à pF 2,5 de 14,2 %, à pF 3,0 de 11,1 % et à pF 4,2 de 8,2 %.

Cette figure montre que pour les parcelles aval, le taux d'humidité à une profondeur de plus de 40 cm est compris entre 9 % (pF 4) et 17 % (pF 2) pendant la période de mesure.

Au niveau des parcelles du milieu, on observe que le taux d'humidité augmente progressivement à partir du début du mois d'août, avec un maximum à la fin de ce même mois. A l'exception de la profondeur à 120 cm (gardant une humidité de 22-24 %), le taux d'humidité baisse après cette période pour toutes les profondeurs de mesure. Le taux d'humidité se trouve pendant toute la saison entre 10 % (pF 3,5) et 22 % (pF < 2), à l'exception de la profondeur à 20 cm.

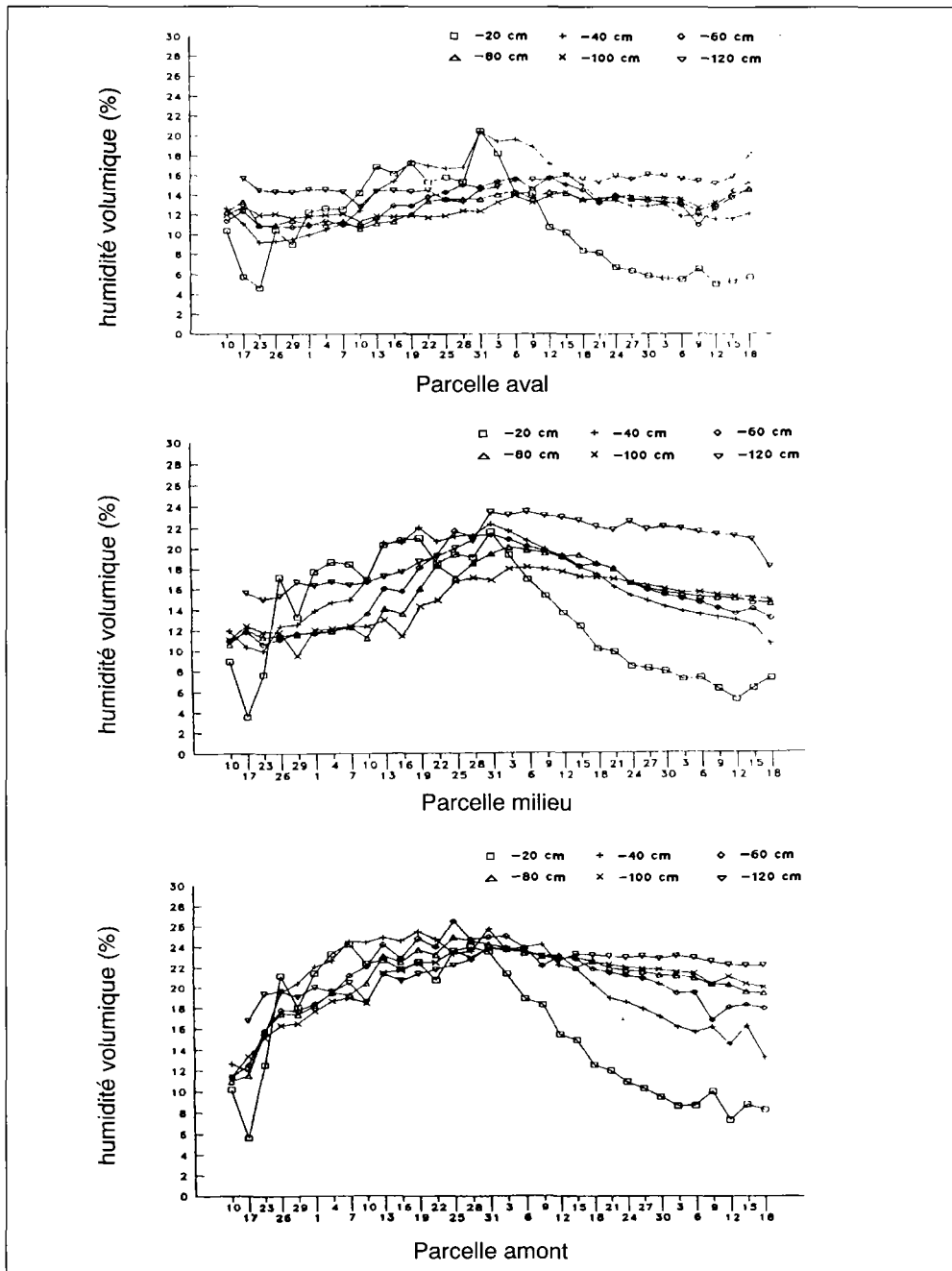


Figure 4. Distribution du taux d'humidité moyen pour les parcelles en aval, au milieu et en amont pendant la période du 10 juillet au 5 octobre 1991 [4].

Au début de la période de mesure, l'humidité initiale des parcelles amont est plus élevée que dans les autres parcelles. Pour l'ensemble des profondeurs mesurées, le taux d'humidité a continué à monter fortement à partir du 10 juillet. A l'exception de la profondeur à 20 cm, le taux varie entre 16 % (pF 2,5) et 26 % (pF < 2). Même dans les couches supérieures, les taux des parcelles amont restent plus élevés. Les couches supérieures des parcelles aval ont à partir de la fin août un pF supérieur à 4,2. Pour les parcelles du milieu, on trouve un pF de 4,2 à la mi-septembre et pour les parcelles amont un pF de 4,2 seulement au début d'octobre.

En conclusion, pendant la saison pluvieuse le taux d'humidité est de 4 à 9 % plus élevé au niveau des parcelles en amont des cordons pierreux, que celui des parcelles en aval et du milieu. Les parcelles du milieu ont également un taux d'humidité plus élevé que celles en aval ; la différence varie ici de 1 à 5 %.

Des profils hydriques ont été réalisés pour mesurer l'influence de la période sèche du 10 au 17 juillet (figure 5), et de la période humide du 10 au 16 août (figure 6) sur le taux d'humidité du sol.

La figure 5 montre que pendant la période sèche le taux d'humidité est seulement influencé dans la zone racinaire (± 30 cm). La diminution importante du pourcentage d'humidité pour toutes les trois parcelles ($\pm 4\%$) au cours de la période sèche dans cette zone est remarquable. Les 3 parcelles ont un comportement semblable. L'évapotranspiration (ETP) pendant cette période (d'environ 3,5-4,0 mm/jour) [3] joue un rôle important au niveau du dessèchement des couches supérieures. Les profils de la figure 6 indiquent que la quantité d'infiltration est approximativement la même pour toutes les 3 parcelles. Mais au niveau des parcelles amont on observe une redistribution d'humidité plus profonde à cause des taux d'humidité plus élevés au début de la période humide dans la zone racinaire. L'ETP dans cette période a varié entre 3,0 et 3,5 mm/jour.

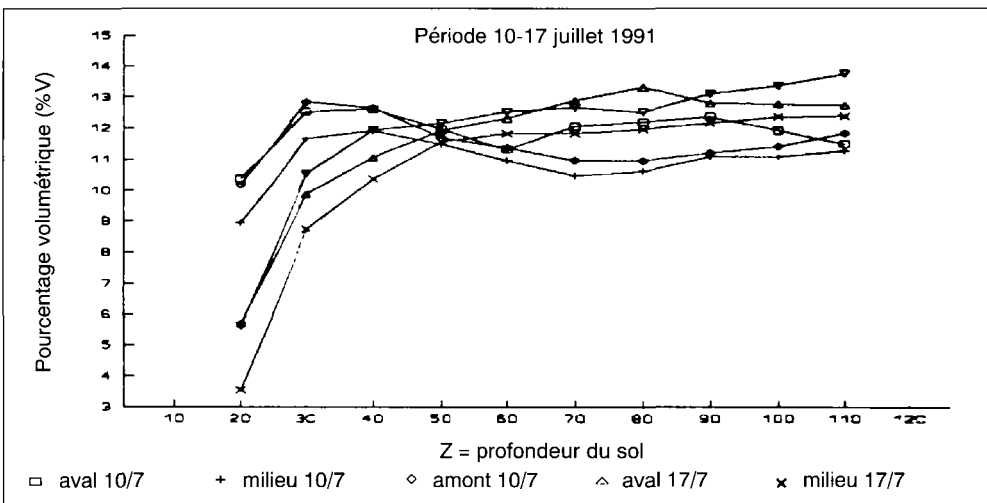


Figure 5. Profils hydriques pour les parcelles aval, milieu et amont des cordons pierreux pendant une période sèche.

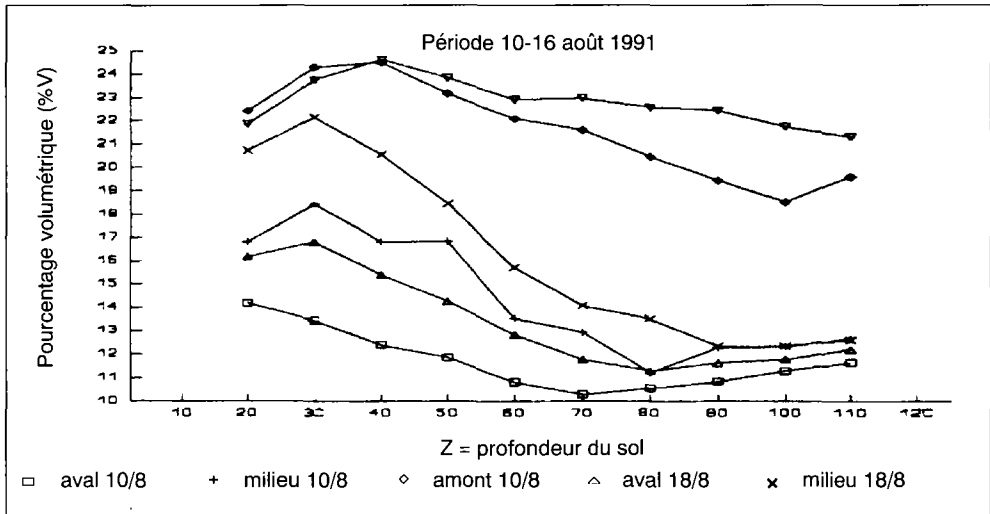


Figure 6. Profils hydriques pour les parcelles aval, milieu et amont des cordons pierreux pendant une période humide.

Le développement végétal du mil

Un résumé des résultats est présenté dans le tableau I.

Tableau I. Développement moyen des talles, hauteur des tiges et profondeur des racines du mil dans les trois sites, pendant la saison agricole de 1991.

	Parcelle aval	Parcelle milieu	Parcelle amont
Talles /ha			
58 JAS (20/7)	50.510	57.718	50.135
130 JAS (30/9)	83.062	100.480	100.87
Tiges			
42 JAS (04/7)	38 cm	44 cm	41 cm
58 JAS (20/7)	54 cm	60 cm	59 cm
84 JAS (15/8)	167 cm	172 cm	164 cm
135 JAS (5/10)	222 cm	222 cm	214 cm
Racines			
58 JAS (20/7)	30 cm	25 cm	27 cm
84 JAS (15/8)	73 cm	79 cm	75 cm

Pendant la période du 42^e JAS au 58^e JAS, la croissance végétale dans la parcelle amont (18 cm) a été comparable à celle des parcelles aval et milieu (16 cm). Pendant la période suivante (58^e-84^e JAS), on observe la même égalité de croissance végétale des tiges. La hauteur des tiges sur les parcelles en aval et au milieu est comparable au moment de la

récolte. La variation de 8 cm n'est pas significative. Ainsi, on peut conclure que les tiges se développent identiquement sur les trois parcelles. On observe la même tendance pour le développement racinaire.

Au niveau du nombre de talles, on observe qu'au 58^e JAS, les parcelles amont et aval ont un même stade de développement et les parcelles du milieu un petit avantage. Au 130^e JAS, les parcelles amont et milieu sont comparables ; le nombre de talles en aval est inférieur de 17 % à celui en milieu et en amont.

Le tableau II donne pour les 9 parcelles les moyennes des talles par hectare, de panicules fertiles et leur pourcentage par rapport au nombre de talles.

Le nombre des panicules fertiles en aval et amont est moins important que pour les parcelles fertiles du milieu.

Tableau II. Nombre des talles et des panicules fertiles du mil pendant la saison 1991.

	Nbr. talles (par ha)	Nbr. fertiles (par ha)	Fertiles/talles (%)
Aval	83.062	35.139	42,0
Milieu	100.480	39.309	39,0
Amont	100.874	36.399	36,0

En conclusion, malgré les différences sensibles des taux d'humidité entre les trois types de parcelles, le développement végétal du mil s'y fait de manière quasiment identique.

La fertilité

Les tableaux III et IV montrent que les pourcentages de matière organique, le carbone total et l'azote total sont comparables pour les trois niveaux à une profondeur de 0 à 40 cm.

Les rapports C/N du sol ont été inférieurs à 30 ; ceux-ci indiquent une activité élevée des micro-organismes consommant le carbone mobilisable dans le sol. On a observé que le K disponible et le P total, dans la couche supérieure en amont, ont été inférieurs à ceux des parcelles aval et milieu. Un certain lessivage des éléments nutritifs par une infiltration abondante aurait pu avoir lieu juste en amont des cordons pierreux.

Tableau III. Résultats des analyses de la fertilité du sol à différents niveaux entre les cordons pierreux (0-20 cm).

		Aval	Milieu	Amont
Matière organique	%	0,60	0,60	0,57
Carbone total	C %	0,35	0,35	0,33
Azote total N	%	0,024	0,025	0,023
C/N		15	14	15
K dispo	ppm. K	151,5	163,2	99,1
K total	ppm. K	1375	1350	1225
(K total/K dispo)		(9)	(8)	(12)
Total	ppm. P	82,1	82,1	62,4

Tableau IV. Résultats des analyses de la fertilité du sol à différents niveaux entre les cordons pierreux (20-40 cm).

		Aval	Milieu	Amont
Matière organique	%	0,55	0,53	0,55
Carbone total	C %	0,32	0,31	0,32
Azote total	N %	0,038	0,043	0,039
C/N		8	7	8
K dispo	ppm. K	248,6	202,0	218,5
K total	ppm. K	2125	2050	2100
(K total/K dispo)		(9)	(10)	(10)
P total	ppm. P	111,7	105,1	101,8

Les paysans ont récolté toutes les plantes aériennes, et transporté la paille à la maison. A l'aide des tableaux V et VI, on a calculé le poids des minéraux exportés au moment de la récolte. En comparant avec les données de la mobilisation des minéraux [5], on a constaté une consommation par la plante du potassium mobilisable dans le sol, ce qui entraîne une diminution de la fertilité du sol.

Tableau V. Analyses de NPK au niveau des tiges, des feuilles et des graines pour chaque parcelle.

	Tiges			Feuilles			Graines		
	N (%)	P (%)	K (%)	N(%)	P (%)	K (%)	N(%)	P(%)	K(%)
Aval	0,35	0,07	3,61	0,82	0,13	1,88	1,38	0,60	0,44
Milieu	0,35	0,08	3,07	0,84	0,15	1,88	1,40	0,65	0,56
Amont	0,27	0,10	2,32	1,01	0,22	1,79	1,22	0,72	0,44

Tableau VI. Production moyenne des graines et de la paille en kg/ha, pour les sites de 1991.

Position parcellaire	Grain (kg/ha)	Paille (kg/ha)
Aval	1073	4026
Milieu	1362	4127
Amont	1082	3245

Rendements du mil

Pendant l'année 1991, nous avons mesuré sur les trois sites un rendement en grains (tableau VI) plus grand dans les parcelles du milieu (+ 26 %) que dans celles aval et amont.

Par contre, on a observé que le développement des panicules fertiles des parcelles du milieu n'a été que de 10 % supérieur à celui des parcelles aval et amont (tableau II).

La production de paille de l'année 1991 a été très supérieure dans les trois parcelles aval et milieu par rapport à celle du parcelles amont (respectivement + 24 % et + 27 %). Cette

différence de production de paille a été observée, tandis que le nombre de panicules et de talles en amont et au milieu était quasiment le même.

Les attaques phytosanitaires expliquent cette différence pour les parcelles amont. On a observé plus de striga (*Striga hermonthica*) en amont des cordons pierreux et le taux des attaques de borers (*Sesamia spp.*) en amont était de 20 % plus élevé que sur les parcelles aval et milieu. Cette même tendance a été observée au niveau de la production de paille en amont par rapport à celle du milieu (21 %). On a estimé que le taux d'attaques phytosanitaires est lié aux conditions d'humidité sur place.

Les productions des 3 sites (3, 4, 6) de l'étude détaillée et des autres 3 sites (1, 2, 5) de la recherche générale sont présentées dans la figure 7.

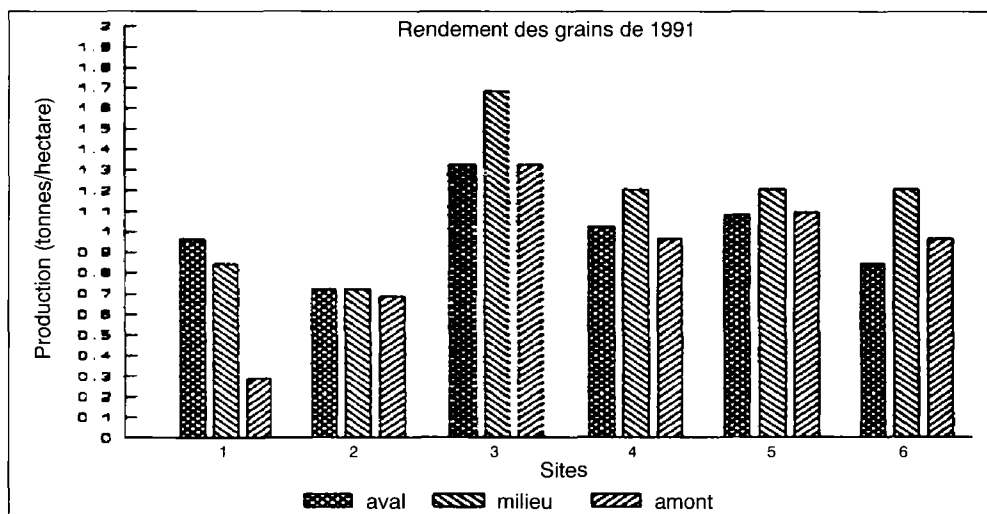


Figure 7. Rendements des 6 sites de 1991.

On observe une même tendance entre la production des parcelles aval, milieu et amont, à l'exception du site 1 : la production au milieu est toujours plus élevée que celle des parcelles en amont et en aval.

On a constaté alors que les rendements de l'ensemble des parcelles ne suivaient pas l'augmentation du taux d'humidité du sol de la parcelle aval vers la parcelle amont.

En 1990 une recherche avait été menée pendant une saison pluvieuse déficitaire (346 mm) sur 4 des 6 sites étudiés en 1991. Les sites ont été composés des mêmes dispositifs amont, milieu et aval. La moyenne des rendements a été récapitulée dans le tableau VII [6].

Tableau VII. Production moyenne des grains et de la paille en kg/ha, pour les sites de 1990.

Position parcellaire	Grain (kg/ha)	Paille (kg/ha)
Aval	359	1114
Milieu	467	1271
Amont	549	1098

On a constaté que la moyenne de la production des grains en 1990 avait augmentée de la parcelle aval vers la parcelle amont (figure 8), et que la production de paille du milieu avait été de 15 % supérieure à celle des parcelles aval et amont.

En comparant les données de 1991 avec celles de 1990, on a trouvé une relation différente entre les rendements et la situation par rapport aux cordons pierreux. En moyenne, les rendements en grains en 1991 ont été de 173 % supérieurs à ceux de 1990.

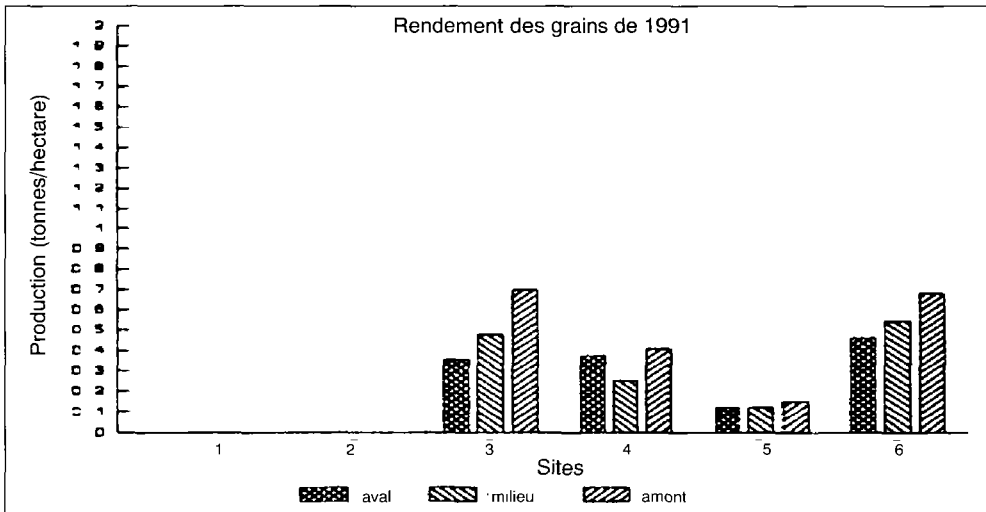


Figure 8. Rendements des 4 sites de 1990.

En conclusion, il apparaît que l'impact des cordons pierreux sur les rendements du mil dépend de la pluviosité. Pendant une année sèche, on trouve les rendements les plus élevés juste en amont, alors que pendant une année humide les rendements les plus élevés se trouvent au milieu entre les cordons pierreux.

Conclusion

Dans le cadre de la recherche d'évaluation technique des aménagements, une étude détaillée a été menée en 1991 sur 3 des 6 sites expérimentaux à l'intérieur de deux bassins versants aménagés. L'objectif était d'analyser l'impact de l'augmentation du taux d'humidité du sol (résultant de la présence des cordons pierreux) sur le rendement du mil.

Au terme de l'expérimentation de 1991, on a constaté que :

- le taux d'humidité du sol décroît de la parcelle amont d'un cordon vers la parcelle aval d'un cordon (ce qui confirme le rôle d'augmentation de la disponibilité en eau dû au cordon pierreux) ;

- le développement végétal est semblable pour les trois niveaux : en amont, en aval et au milieu des cordons pierreux ;
- la fertilité du sol est quasiment la même en amont, en aval et au milieu ;
- le rendement du mil est sensiblement plus élevé dans la parcelle du milieu que dans les parcelles amont et aval.

D'après cette expérimentation, le taux d'humidité du sol est le facteur expliquant la différence de rendement entre les trois niveaux. Il semble qu'il y ait un taux d'humidité optimal pour le rendement du mil (voisin de celui de la parcelle du milieu en 1991). Ce taux optimal ne dépend pas uniquement des besoins en eau des cultures, mais également du risque des attaques phytosanitaires (qui augmente avec le taux d'humidité).

Dans une année déficitaire comme 1990, le rendement du mil en amont des cordons pierreux a été plus important qu'en aval et au milieu, ce qui confirme l'influence positive de l'augmentation de la disponibilité en eau sur le rendement du mil, grâce au cordon pierreux. Le rendement le plus faible mesuré en 1991 (parcelle aval) est resté 95 % plus élevé que le rendement le plus fort mesuré en 1990 (parcelle amont). Le cordon pierreux ne suffit pas à réduire cet écart, qui se justifie par la très nette différence de la pluviométrie entre les deux années.

Références

1. ISRA (1990). Défense et Restauration des sols. Coll. Fiches techniques. Vol I, n° 1, Dakar (Sénégal).
2. Chopart J.L. (1989). Méthodes d'étude de l'enracinement, à mettre en œuvre dans le projet de recherche R3S/PF2. In : L'amélioration de l'alimentation hydrique par les techniques culturales, 24-8.
3. Météorologie nationale (1991). Bulletin agrométéorologie n° 1-19. Ministère du transport et des communications, Ouagadougou (Burkina Faso).
4. Duijn V.H. (1991). Evaluation technique des aménagements anti-érosifs sur micro-bassin versants, recherche à Namsiguia (version provisoire). PEDI/CRPA-CN/CIEH, Kaya (Burkina Faso).
5. IRAT (1980). Fertilisation minérale, proposition-conditions d'application. Ouagadougou (Burkina Faso).
6. Kaboré R. (1990). Evaluation technique des aménagements anti-érosifs sur micro-bassin versants, recherche à Namsiguia (volet agronomique). PEDI/CRPA-CN/CIEH, Kaya (Burkina Faso).

25

Amélioration de la fertilité des rizières de Basse-Casamance (Sénégal) en relation avec la gestion des eaux de ruissellement d'un bassin versant : premiers résultats et perspectives

A. DOBOS¹, F. MANKEUR¹, J.P. MONTOROI²

1. ISRA, BP 34, Djibelor-Ziguinchor, Sénégal

2. ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

La Casamance, soumise à un climat favorable, a très tôt été l'objet d'un intérêt particulier en matière agricole. Pour exprimer ses fortes potentialités et développer une agriculture plus productive, l'aménagement de l'espace devient impératif. Cet objectif est à l'origine de la mise en valeur des terres occupées par la mangrove, où se pratique la riziculture "salée". Des terres vierges, susceptibles d'être défrichées, ne posaient pas de problèmes fonciers particuliers.

Les paysans diolas, occupant ces terres hostiles, ont parfaitement su maîtriser l'eau pour rendre productive des vasières difficiles à travailler [1]. Les casiers rizicoles, aménagés savamment, sont cantonnés près des villages. La récolte suffit à la subsistance de ces populations. Les surplus sont stockés soit en prévision de mauvaises années, soit pour les fêtes villageoises et les échanges commerciaux. La mangrove apporte en complément d'autres ressources.

Les besoins en riz se faisant de plus en plus sentir au niveau national, une politique de mise en valeur rationnelle de ces terres a été mise en œuvre au lendemain de l'indépendance du pays.

Dans un premier temps, il s'est agi de reprendre les méthodes traditionnelles à une plus grande échelle et d'y adjoindre des techniques plus performantes, en particulier en matière de drainage, afin de provoquer un meilleur dessalement du sol. Cette expérience, réalisée durant la période 1963-1975, s'est malheureusement soldée par un échec à cause de la non-connaissance des processus d'acidification de ces sols [2].

Les années 80 ont vu la situation climatique empirer. Les petites vallées qui se ramifient dans le plateau continental se sont rapidement dégradées. Pour enrayer l'avancée inexorable des eaux salées, les populations ont entrepris l'édification de petites digues antisel avec un appui financier extérieur. Un ouvrage bétonné muni d'un dispositif d'ouverture permet le stockage des eaux de ruissellement et l'évacuation des eaux lessivant les sols salés en début de saison des pluies [3]. Le PIDAC (Projet intégré de développement agricole en Casamance) a été chargé de la construction et du suivi de 25 petits ouvrages de ce type, situés tous en Basse-Casamance. Ils viennent s'ajouter à d'autres ouvrages réalisés par la mission chinoise et les organisations non gouvernementales. C'est dans le cadre de ces aménagements qu'a été construite la digue antisel de Djilakoun en 1983-1984.

Au début du programme, en 1988, il a été conçu une amélioration technique du barrage antisel pour permettre une évacuation rapide des eaux les plus chargées en sel [4-5]. Les paysans ayant abandonné l'agriculture dans cette vallée depuis plus d'une dizaine d'années, il fallait refaire des aménagements pour les expérimentations agronomiques. Trois casiers rizicoles ont été mis en place pour tester l'effet de la gestion du barrage sur le dessalement des sols et sur la production agricole. Le premier casier a été un aménagement traditionnel avec comme objectif l'étude de la possibilité de réintroduire la riziculture suivant les techniques culturelles pratiquées dans la région [6-8]. Les deux autres casiers ont cherché à tester des alternatives techniques pour une intensification de cette production, tout en respectant les contraintes du système de production. Cette communication se propose de présenter les résultats agronomiques obtenus sur ces derniers casiers. La figure 1 montre l'emplacement de ces différents aménagements ainsi que les principales infrastructures présentes sur le bassin de Djiguinoum.

Les contraintes de la production du riz

Les contraintes naturelles de la production rizicole dans les bas-fonds de Casamance sont l'eau, le sol et le matériel végétal.

Il n'y a pas de réserves naturelles importantes en eau douce. Celle-ci ne provient que des pluies, pendant une saison qui s'est raccourcie considérablement (3 à 4 mois) durant la période actuelle de sécheresse. La riziculture nécessite une alimentation régulière en eau douce. Le stockage des eaux pluviales par un barrage et la gestion du niveau de l'eau dans les parcelles cultivées en riz sont devenus indispensables.

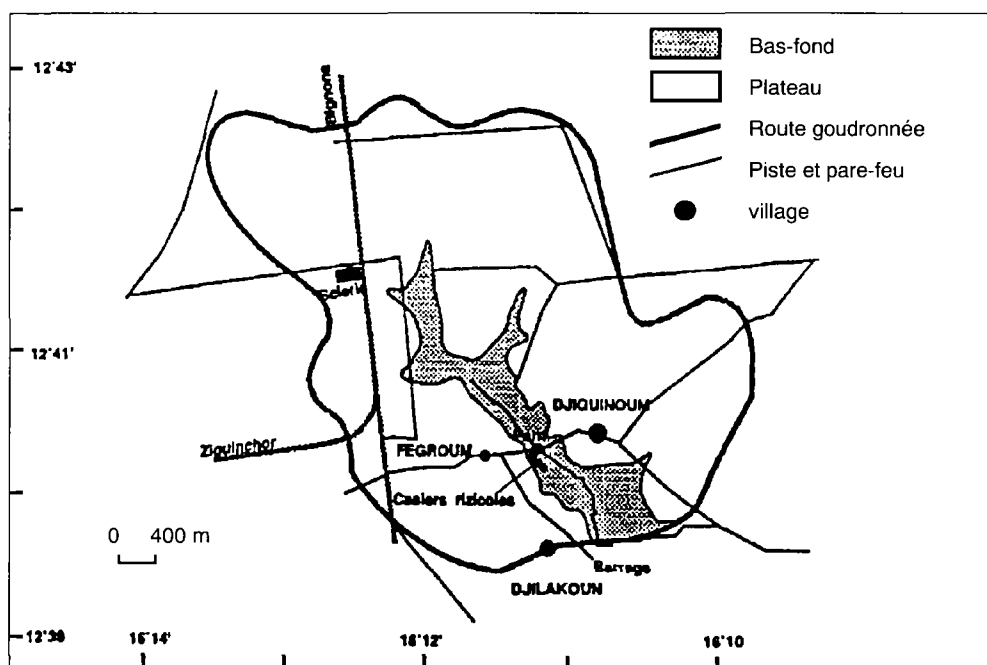


Figure 1. Aménagement et infrastructure du bassin versant de Djiguinoum (d'après [4]).

Les sols salins et acides constituent le deuxième obstacle majeur à surmonter. La salinité est entretenue par les eaux marines, la fonction antisel du barrage n'empêchant cependant pas les intrusions *via* la nappe. L'acidité, présente dans ces sols par suite de leur exondation durant une grande partie de la saison sèche, engendre dans le milieu des éléments solubles, toxiques pour les plantes. La stérilisation de ces terres a entraîné l'abandon de la culture de riz en zone salée. La reconstitution de la fertilité de ces sols nécessite de diminuer leur degré de salinité par un lessivage approprié et de neutraliser l'acidité par des amendements organiques et/ou minéraux raisonnés. Dans les années 70, avant que les effets de la sécheresse ne se fassent trop désastreux, de nombreuses études ont porté sur l'amélioration de la fertilité et de la lutte contre la salinisation des terres [9-15]. Plus récemment, l'effet des amendements sur la production de riz a été démontré en cases lysimétriques [16].

Un troisième obstacle réside dans la capacité limitée des végétaux à supporter un milieu agressif. Le végétal doit supporter pendant son cycle végétatif une variabilité de la pluviométrie plus importante qui favorise les possibilités de stress hydrique et chimique. La sélection de variétés tolérantes est une alternative prometteuse si ces variétés, une fois testées au champ, sont largement diffusées auprès des populations rurales.

Les contraintes socio-économiques actuelles sont également à prendre en considération pour que la riziculture reprenne la place qui était la sienne dans le système de production [17].

Dispositif et protocole expérimentaux

Pour lutter contre ces contraintes, deux itinéraires ont été empruntés :

- la recherche de techniques culturales simples pour tester et confirmer l'impact de la gestion hydraulique du barrage antisel ;
- la recherche de solutions améliorant les propriétés physico-chimiques des sols sulfatés acides.

Le modèle en micro-cuvettes a été adopté pour tester différentes combinaisons d'apports organiques et minéraux. La mise en place des essais a été effective en 1990. Une seule variété a été testée. Le dispositif a également fonctionné en 1991 [7, 8, 18, 19].

Description des micro-cuvettes

Deux modules expérimentaux ont été construits en aval du casier traditionnel. Il s'agit de micro-cuvettes construites en forme d'hexagone (de 25 m de côté extérieur et de 19 m de côté intérieur) et d'une superficie cultivable de 1 875 m². C'est une variante améliorée du "micro-polder Diola" composé d'un canal de ceinture et d'une digue périphérique (figure 2). L'hexagone, ainsi délimité, est divisé en trois parcelles ou blocs (A, B et C) en forme de parallélogramme, facilement divisibles, suivant les sujets ou expérimentations demandés (billonnage, culture à plat, amendements organiques et/ou minéraux, variétés tolérantes au sel, aux toxines et à l'acidité, etc.). Chaque parcelle a une superficie de 625 m².

Le déversoir de la micro-cuvette, raccordé au canal de ceinture, permet le drainage en début et en fin de saison des pluies.

Le dispositif, étant situé au creux profond de la vallée, est entièrement submergé pendant trois à quatre mois de l'année (août, septembre, octobre et novembre). Le dessèchement total intervient en novembre et décembre pour une durée de huit mois.

Dans la partie la plus basse de chaque parcelle, un bac de captage d'eau de drainage permet de concentrer les sels dans une partie de la parcelle. Il s'agit d'une cuve enterrée d'environ 60 l devant servir à l'échantillonnage des eaux. En 1990, ce dispositif, initialement prévu, n'a pas été installé. Il sera mis en place pour des aménagements ultérieurs.

Sur un des côtés de l'hexagone, une tranchée a été creusée pour servir de cuve de traitement des eaux salées. Après les premières pluies, la moquette, humectée par les eaux de ruissellement, est mélangée aux divers amendements afin de neutraliser les éléments toxiques. Ce mélange est ensuite épandu sur la surface des parcelles au moment de la préparation du sol.

Dans le premier module, des billons ont été installés dans les parcelles à la façon Diola. Dans le second module, les parcelles ont été traitées pour une culture à plat du riz.

Protocoles des essais agronomiques

Ils se distinguent par le type de préparation du sol (culture en billons ou à plat) et par la nature de l'amendement (uniquement minéral pour celui cultivé en billons, minéral et organique pour le second).

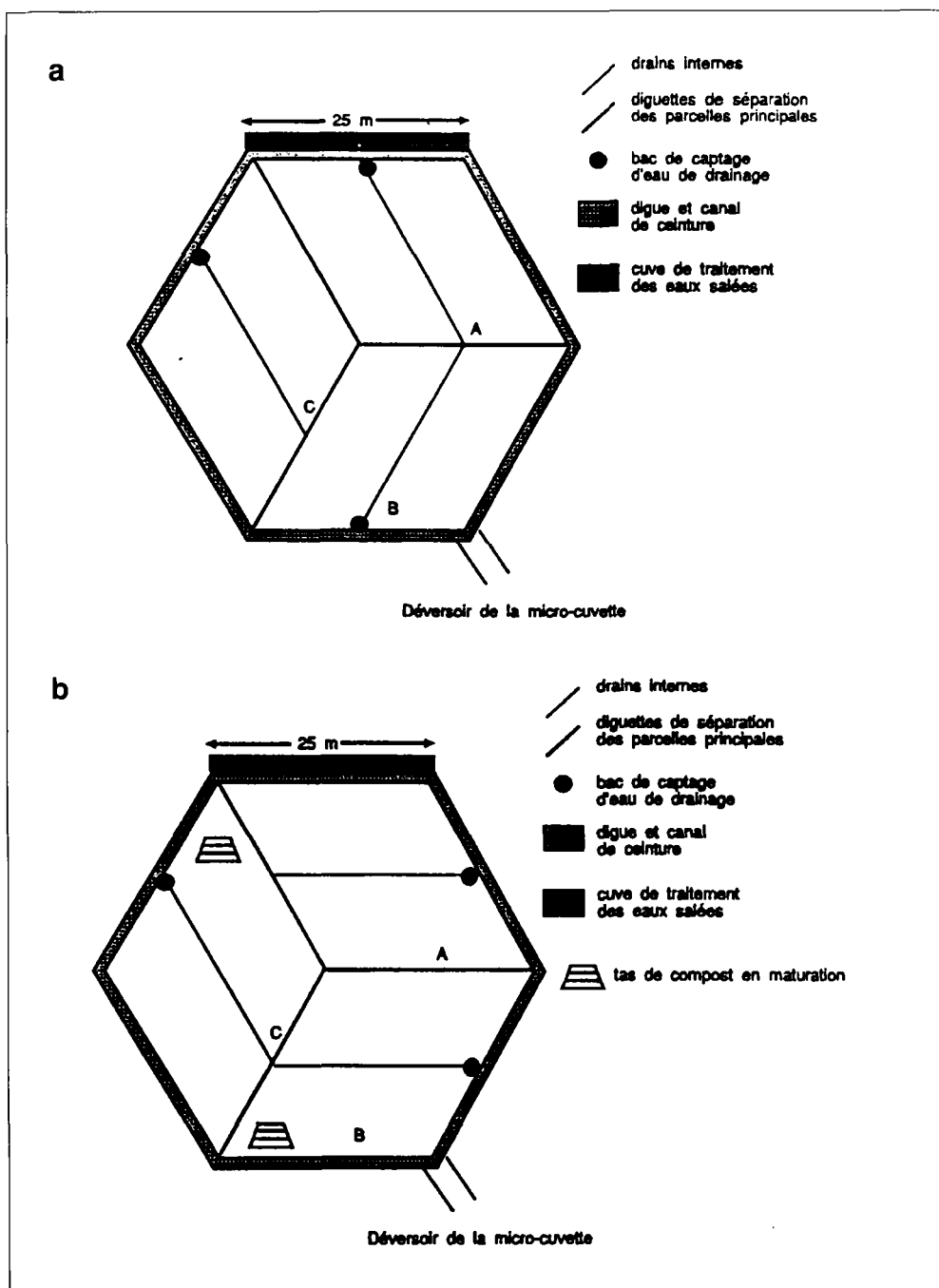


Figure 2. Casiers rizicoles. a : culture en billons ; b : à plat.

– Pour la micro-cuvette cultivée en billons, les trois parcelles A, B et C, dont la superficie est de 625 m², ont reçu les traitements suivants (figure 2) :

A : chaux agricole à 300 kg/ha (18 750 kg/parcelle) ;

B : chaux agricole à 300 kg/ha + phosphate tricalcique à 100 kg/ha (6 250kg/parcelle) ;

C : phosphogypse à 1 300 kg/ha (81 250 kg/parcelle) ;

Une parcelle témoin, située en dehors du casier, n'a reçu aucun apport.

– Pour la micro-cuvette cultivée à plat, le protocole est identique pour ce qui concerne l'amendement minéral, mais diffère par l'introduction d'une composante organique.

La paille est un sous-produit peu valorisé en agriculture traditionnelle. On la brûle généralement avant les travaux de mise en valeur. Les dégâts causés par les feux de brousse sont connus comme les avantages de l'amendement organique dans la reconstitution, l'amélioration et le maintien de la fertilité du sol. L'exportation de la paille pour l'alimentation du bétail et la production de fumier ou compost nécessitent des travaux supplémentaires et des manutentions coûteuses. Son utilisation directe sur place comme amendement organique permet de réduire les coûts de sa valorisation à un niveau économiquement favorable.

Cet apport organique est constitué par les pailles des cypéracées présentes naturellement sur le site. Celles-ci sont brûlées, déchiquetées sur place ou bien utilisées pour préparer du compost. Les combinaisons minérales et organiques sont présentées dans le tableau I. Elles ont été appliquées sur des sous-parcelles.

Tableau I. Amendements de la micro-cuvette cultivée à plat.

Parcelle	Amendement (minéral)	Quantités apportées	Paille
A	1		brûlée
	2	chaux 9 375 kg	déchiquetée
B	3	chaux + phosphate + 3 125 kg	déchiquetée
	4	tricalcique	en terre + mise en compost
C	5		déchiquetée
	6	phosphogypse 40 625 kg	en terre + mise en compost

Le déchiquetage des pailles a été effectué par un nouvel appareil mis au point à l'ISRA et permettant de faciliter l'opération sur le terrain. Cette déchiqueteuse manuelle pèse environ 13 kg et se compose d'une barre de coupe fixée sur un cadre en bois prolongé par deux bras. L'instrument est manié verticalement par deux hommes.

Le compost est constitué par de la terre mélangée aux pailles de cypéracées et aux divers amendements. Les tas sont disposés en bordure de la sous-parcelle traitée et vont y séjourner pendant toute la période d'inondation jusqu'à la prochaine campagne rizicole. Ce compost mélangé aux apports minéraux sera épandu au moment de la préparation du sol.

Le système de culture

Calendrier cultural

Les deux micro-cuvettes ont été construites en mars et en juin 1990, à environ 100 m en aval de la piste Ziguinchor-Koubalan.

Quel que soit le mode de préparation du sol (culture à plat ou en billons), le calendrier cultural adopté en 1990 est identique (tableau II).

Tableau II. Calendrier cultural sur micro-cuvettes.

Pratiques culturales	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Travail du sol	* (27/6 au 4/7)						
Pépinières		* (18/7) ... (18/7)					
Amendement	*						
Repiquage			* (23/8)				
Surveillance et entretien			*				
Récolte						* (24/11 au 3-4/12)	

Techniques culturales

Travail du sol

Il se fait à l'aide d'un instrument aratoire local : le kayendo. Cet outil est particulièrement efficient dans les sols lourds encore bien humides. Il sert aussi bien à élever les digues de protection des parcelles cultivées qu'à effectuer les travaux de préparation du sol proprement dits. Le paysan diola, riziculteur par tradition, a pris l'habitude de cultiver en billonnant la surface du sol. Les raisons principales sont de permettre l'entraînement et la dilution des sels contenus dans les sols du domaine fluvio-marin, d'oxygéner le milieu, de maîtriser l'enherbement et de créer une couche meuble pour le repiquage.

Cette technique a été reprise pour se situer dans le même système de culture. La date idéale pour pratiquer ce billonnage n'est pas toujours facile à programmer. On peut attendre soit les premières pluies, soit la baisse du niveau de la nappe dans la première moitié de la période sèche.

La première option a l'inconvénient d'être trop aléatoire. Si le sol est trop engorgé, les travaux risquent de ne pas se dérouler dans les meilleures conditions (manque de cohésion du matériau). La seconde option est sans doute la plus sage : on peut procéder au travail du

sol au moment le plus propice et les pailles enfouies peuvent se décomposer lentement jusqu'à ce que le sol soit totalement desséché. La nature même de ce sol fait qu'en se desséchant il se rétracte de façon considérable. Les billons se structurent en mottes, celles-ci se recouvrant d'une couche poudreuse salée. Les digues nécessitent un compactage important pour éviter les risques de fissuration.

Entre chaque campagne, les digues et diguettes sont réhaussées et remises en état.

Les aménagements à l'intérieur du module (drains, renforcement de la diguette périphérique) se sont déroulés à la même période que les travaux de billonnage.

L'utilisation du kayendo est un travail difficile qui ne peut être réalisé que par les hommes. Cette main-d'œuvre est de moins en moins disponible et la période pour retourner le sol est courte. Aussi a-t-on essayé de tester le travail à plat sans retournement du sol, cette pratique laissant la couche salée en surface.

Amendement

Les amendements minéraux sont apportés au moment des travaux de préparation du sol. Le déchiquetage de la paille, préconisé dans l'essai à plat, a été réalisé lorsque le sol a été suffisamment humecté par les premières pluies. Les conditions idéales sont, comme pour le billonnage, de pratiquer cette opération après la récolte pour faciliter sa décomposition. Des observations ont montré que l'épaisseur de la couche de paille, initialement de 15 à 20 cm, est ramené à environ 8 cm après déchiquetage. Sur les parcelles B4 et C6, le poids de paille utilisée pour le compostage est respectivement de 172,7 kg (soit environ 5,8 t/ha) et de 215,75 kg (soit environ 7,2 t/ha).

Mise en place de la pépinière

La pépinière se situe à Fegroum, sur un sol beige de plateau billonné, et n'a reçu aucun amendement particulier. La variété Rock 5, présentant un bon potentiel, a été utilisée.

Désherbage et repiquage

Cette phase particulièrement pénible est le fruit du labeur des femmes diolas. Elles procèdent selon un rituel ponctué par des chants entraînants. Les plants, issus de la pépinière, sont disposés dans les parcelles inondées. Le semis se fait sur deux lignes situées dans la partie sommitale du billon. La reprise de ces plants est effective une fois passée la période de stress occasionnée par cette transplantation.

Sur billons, le riz s'est très bien comporté pendant toute la saison culturale. Le développement et le tallage ont été bons. Les cas de reprise difficile ont été remplacés par de nouveaux plants. Il n'y a pas eu d'invasion d'adventices (cypéracées). L'apparition de nénuphars a été notée et la profondeur excessive de l'eau dans la parcelle C, notamment en septembre et octobre, a gêné le tallage par endroits.

Traitement et surveillance

Une surveillance permanente a permis d'éviter les dégâts dus aux oiseaux et aux animaux errants.

Lutte contre les cypéracées

Ces adventices constituent une forte concurrence pour le riz, car ils se mettent à pousser abondamment avec les premières pluies. Le billonnage tardif (enfouissement avant le repiquage) et l'arrachage sont des remèdes efficaces pour protéger le riz.

Dans le module à plat, l'opération d'arrachage s'est faite en eau profonde, le 22/8, juste avant le repiquage. Les pieds arrachés avec la racine flottent à la surface de l'eau et sont entassés pour le compostage. Le volume récolté est exprimé en m³ dans le tableau III.

Tableau III. Production de paille sur la micro-cuvette en culture à plat.

Traitements	Volume moyen de paille produit (m ³ /ha)	Pourcentage par rapport au témoin
Après brûlage	61,9	130
Après enlèvement	54,2	114
Après déchiquetage	47,7	100

Le déchiquetage présente un effet positif pour éviter la repousse des cypéracées, contrairement au brûlage traditionnel qui favorise l'enherbement du sol.

Récolte

Elle est pratiquée de façon traditionnelle par les femmes diolas. Les panicules sont coupées un par un au couteau et sont regroupés en petits paquets.

– Sur le module billonné, la récolte s'est effectuée par le prélèvement de 250 échantillons de plants entiers. La récolte en vrac a été faite au couteau dans les parcelles A, B et C sur un terrain encore boueux. Les gerbes coupées et séchées pendant deux jours sur la diguette ont été rassemblées sur terrain sec pour le battage (5/12), le vannage (7/12) et le pesage (17/12).

La variété Rock 5 a séjourné 36 jours en pépinière, 102 jours en rizière, soit un cycle végétatif total de 138 jours.

– Sur le module à plat, le développement du riz s'est effectué, mais sa distribution spatiale dans les parcelles a été très hétérogène. Pour diverses raisons techniques et organisationnelles (pépinière tardive, manque de plants hauts pour les besoins du repiquage en eau profonde), les résultats obtenus ne sont qu'indicatifs mais très encourageants. Une production de grains a pu être mise en évidence, cependant insuffisante pour être prise en considération.

A titre de comparaison, une surface de 140 m² a été préparée le 3/9/1990 pour servir de témoin et montrer que la production de riz a été possible dans les conditions les plus extrêmes. Elle n'a reçu aucun aménagement ni traitement particulier. Seul un désherbage manuel en eau profonde (40 à 50 cm) a été réalisé. Les cypéracées, hauts de 70 cm, formaient une végétation dense ayant poussé grâce aux 850 mm de pluies. Les variétés Etouhal (sur 28 m²) et Rock 5 (sur 112 m²) ont été testées. La reprise a été lente, le tallage faible et le développement souffreteux. Les cypéracées n'ont pas repris sauf au niveau des souches restées en place. Le riz a toujours dominé jusqu'à la récolte intervenue les 4 et 5/12/1990, après 88 jours en rizière.

Résultats

Impact sur les rendements

La gestion hydraulique du barrage antisel de Djilakoun a permis d'obtenir une production de riz satisfaisante dans une zone particulièrement dégradée par la sécheresse et abandonnée par les paysans depuis une quinzaine d'années.

Sur le périmètre témoin non aménagé, c'est-à-dire sous la seule influence du barrage antisel, la production de riz est faible mais a le mérite d'exister. Elle a été de 0,1 t/ha en paddy pour la variété Rock 5.

Seuls les résultats obtenus sur la micro-cuvette billonnée présentent une signification. Le tableau IV rassemble les résultats de la campagne 1990. Le rendement moyen sur l'ensemble du module est de 1,0 t/ha. L'effet de l'amendement combiné chaux-phosphate tricalcique est le plus positif. Il l'est également pour la chaux seule. Seul le traitement au phosphogypse donne un résultat au-dessous du rendement moyen de la micro-cuvette.

Tableau IV. Rendements en riz paddy sur la micro-cuvette billonnée.

	Traitements parcelle	Poids de grains (en kg)		Total parcelle (en kg)	Rendement (en t/ha)
		sur 250 poquets	en vrac sur parcelle		
A	chaux seule	12,0	50,0	62,0	1,0
B	chaux + phosphate tricalcique	14,5	60,0	74,5	1,2
C	phosphogypse seul	15,0	29,0	44,0	0,7
Total		41,5	139,0	180,5	1,0
Témoin		4,3	25,0	29,3	0,5

Le repiquage a été réalisé à 125 000 plants/ha. La production de paille est importante. Sur chaque parcelle (A, B et C), une série de 100 mesures de la hauteur totale des plants a été réalisée le 23/11/1990. Quel que soit le traitement, la hauteur moyenne pour chacune des parcelles est comprise entre 110 et 115 cm. On a plus de 70 plants sur 100 présentant une taille supérieure à 105 cm. Cette valeur atteint même 90 % pour le traitement au phosphogypse.

Impact sur la sécurisation de la production

Tout le problème de la gestion des barrages se pose encore avec acuité, car aucune solution n'est idéale et unique. Il s'agit de choisir celle qui présente le moins d'inconvénients sur un milieu déjà bien dégradé. Il est certain qu'un fonctionnement en barrage antisel s'impose maintenant en saison sèche pour sécuriser les rizières douces et limiter la dégradation chimique des sols. La mise en valeur des terres amont est plus que jamais à l'ordre du jour. C'est un travail de longue haleine, qui nécessite la mobilisation de moyens humains et matériels importants.

L'acidité du sol peut être corrigée par des amendements minéraux et organiques qui doivent compléter les effets de la gestion hydraulique du barrage. En conditions naturelles,

l'acidité potentielle des vasières, occupées par la mangrove, est neutralisée par les eaux saumâtres. En milieu temporairement inondé, la forte acidité du milieu engendre des éléments toxiques préjudiciables au développement normal des végétaux. La reconstitution, d'un milieu fertile doit ramener le pH du sol à des valeurs neutralisant l'aluminium échangeable. Les amendements minéraux améliorent la réserve minérale du sol en insolubilisant les éléments acidifiants, tels que l'aluminium.

La paille et la matière organique décomposée protègent le sol, en saison sèche, contre l'assèchement profond qui accentue le processus d'acidification. En créant une couche perméable en surface, elles favorisent, en début de saison des pluies, le dessalement superficiel et l'enracinement des semis.

La stratégie actuelle de développement agricole en Basse-Casamance doit abandonner les objectifs initiaux qui consistaient en un accroissement des terres emblavées et des rendements. Elle doit d'abord viser la sécurisation de la production rizicole et la réhabilitation de terres dégradées, lorsque cela est techniquement et économiquement possible.

Pour sécuriser la production, il faut pouvoir limiter les effets néfastes du sel et des éléments toxiques et maîtriser la ressource en eau, qu'elle soit salée ou douce.

Les observations montrent que les racines du riz explorent la couche superficielle du sol (soit les 20 premiers centimètres), d'où la nécessité de maintenir une lame d'eau assurant la submersion permanente des billons afin d'éviter un ressalement. Ces conditions favorisent également une légère remontée du pH.

Impact sur l'extension de la superficie cultivable

Les résultats obtenus sur les différents casiers pilote permettent d'envisager l'extension du dispositif à l'ensemble du bas-fond salé, soit environ 90 ha. Associée aux rizières actuellement productives en tête de vallée et sur les bas de versant, c'est la totalité du bas-fond qui pourra être mise en valeur, soit 150 ha.

Parler d'extension des terres est impropre. Il s'agit plutôt de reconquérir un milieu agricole, jadis productif, et maintenant laissé à l'abandon sous les effets néfastes du climat.

La réhabilitation des terres est possible si on combine judicieusement les techniques suivantes :

- la maîtrise de l'eau ;
- les amendements ;
- les variétés tolérantes ;
- la protection contre la salinisation des sols.

Cependant, la mise en œuvre de ces techniques nécessite un encadrement suffisant des populations rurales devant assurer l'aménagement général du terroir que constituent les bas-fonds rizicoles.

La situation environnementale rencontrée dans la vallée de Djiguinoum est similaire aux autres petites vallées casamançaises. Néanmoins, on devra tenir compte de la spécificité de chacune de ces vallées, notamment dans les aspects liés à la gestion hydraulique des aménagements.

Conclusion

Quelles que soient les techniques utilisées et les conditions pluviométriques rencontrées en 1989 et 1990, les essais rizicoles montrent de manière évidente que la production de riz est désormais possible sur les terres dégradées de Basse-Casamance. Une troisième campagne, actuellement en cours, se présente favorablement. Il importe de respecter certaines règles et de combiner un certain nombre de techniques améliorantes pour assurer la pérennité du dispositif expérimental et envisager son intégration dans le système de production casamançais.

Le plus important est la maîtrise de l'eau pluviale *via* la gestion raisonnée des ouvrages antisel. Cette gestion en un point unique de la vallée ne résout pas totalement les besoins en eau des populations pour l'exploitation de leurs parcelles. Il a l'avantage actuellement d'améliorer sa qualité et par conséquent de créer un terrain propice à la reprise de l'activité rizicole. Privilégier cette phase de réhabilitation au détriment de la préservation des rizières productives en tête de vallée n'est pas la solution à préconiser. Nécessairement des retenues d'eau intermédiaires permettront de gérer harmonieusement la ressource en eau sur l'ensemble de la vallée.

Indéniablement, la technique du billonnage a montré son avantage, notamment sur le casier traditionnel où les rendements sont prometteurs. C'est une solution incontournable sur les sols stérilisés et durcis en surface. Elle ameublit la terre, facilite l'entraînement des sels et facilite le repiquage du riz. Sa demande importante en main-d'œuvre et en temps de travaux peut nuire à sa réintroduction dans le système de production.

La reconstitution d'une couche meuble et fertile à la surface du sol par apport régulier de matière organique paraît nécessaire pour remplacer la technique du billonnage par celle des cultures à plat sur les terres sulfatées acides dégradées. Les observations faites en 1991 sur le même dispositif sont, à ce titre, révélatrices. L'utilisation du compost préparé l'année précédente a montré l'effet bénéfique de cet apport sur le développement du riz en culture à plat. La production de grains devra confirmer ce fait au moment de la récolte.

Les amendements minéraux sont une pratique à encourager pour atténuer l'acidité de ces terres. Leurs effets sont plus ou moins nets sur une année culturale. C'est à plus long terme que l'on pourra juger de leur réelle efficacité, ceci sans tenir compte des aspects économiques qui peuvent constituer un frein à leur diffusion. Combinés à des apports organiques, ils deviennent plus performants.

Références

1. Pelissier P. (1966). Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Imp. Fabrègue, St Yrieix. 320 p.
2. ILACO (1967). Aménagements hydro-agricoles en Casamance. Rapport de gestion des casiers de Médina et de Dieba (1965-1967). Rapport ORSTOM, Dakar.

3. USAID/SOMIVAC/ISRA (1985). Actes de la II^e Table ronde sur les barrages antisel, 12-15 juin 1985, Multigr. Ziguinchor.
4. Albergel J., Brunet D., Dobos A., Fall M., Montoroi J.P., Zante P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : Aménagement/ Génie rural. Programme CEE-DG XII, ORSTOM/ISRA, Multigr ; 13 p.
5. Montoroi J.P. (1991). Réhabilitation des sols salés et acides de Basse-Casamance. Rapport final du programme MRES n° 121. Multigr. ORSTOM/Dakar ; 15 p. + annexes.
6. Brunet D., Zante P., (1990). Essai rizicole de la vallée de Djiguinoum, Basse-Casamance. Rapport agro-pédologique 1989. Multigr. ORSTOM/Dakar ; 42 p. + annexes.
7. Brunet D., Zante P., Duprey J.L. (1991). Essai rizicole en culture traditionnelle. Vallée de Djiguinoum (Basse-Casamance). Rapport agro-pédologique 1990. Multigr. ORSTOM/Dakar ; 66 p. + annexes.
8. Brunet D., Dobos A., Fall M., Montoroi J.P., Zante P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : Agronomie. Programme CEE-DG XII, ORSTOM/ISRA (à paraître).
9. Beye G. (1973). Une méthode simple de dessalement des sols de tanne de Casamance : le paillage. *Agro-Trop* 28 : 537-49.
10. Beye G. (1973). Etude comparative de différents engrais phosphatés pour la fumure phosphatée du riz en sols de rizière très acides de Basse-Casamance. *Agro Trop*, 28 : 937-45.
11. Beye G. (1973). La fertilisation phosphatée et azotée du riz sur sols sulfatés acides du polder de Médina (Basse-Casamance). *Agro Trop*, 28 : 767-75.
12. Beye G. (1974). Etude comparative de l'action de la potasse et de la paille enfouie sur le développement et le rendement du riz sur sol argileux de Basse-Casamance. *Agro Trop*, 29 : 803-11.
13. Beye G. (1977). Influence de la longueur de la submersion avant repiquage et de l'enfouissement de paille sur les propriétés physico-chimiques de deux sols de rizière et sur le développement et les rendements du riz. *Agro Trop*, 32 : 31-40.
14. Beye G., Touré M., Arial G. (1978). Action de la paille enfouie sur les caractéristiques physico-chimiques des sols submergés de rizières de Basse-Casamance et sur le développement du riz. *Agro Trop*, 33 : 381-89.
15. Beye G., Touré M., Arial G. (1979). Etude de la chimie des principaux sols submergés de Basse-Casamance en relation avec le développement et la nutrition minérale du riz. *Agro Trop*, 34 : 271-300.
16. Boivin P., Zante P. (1986). Essai de récupération d'un sol sulfaté acide en cases lysimétriques. Rapport de campagne. Multigr ORSTOM/Dakar : 9 p. + annexes.
17. Montoroi J.P. (1990). Les sols et l'agriculture dans le domaine estuarien de Basse-Casamance. Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal) ; 21 p.
18. Dobos A. (1991). Essais de mise en valeur rizicole des sols salés et sulfatés acides. Multigr Doc n° 26, ISRA/Djibelor : 30 p.
19. Fall M. (1991). Volet pédologie et aménagement des bassins versants. Aménagement en micro-cuvettes sur billons. Multigr ISRA/Djibelor ; 7 p.

26

Apports de la télédétection pour la caractérisation des bas-fonds et de leur bassin versant au Sahel

A. NONGUIERMA, A.I. MOKADEM, S. DAUTREBANDE

Faculté des sciences agronomiques, Gembloux, Belgique

Introduction

On relève depuis le cycle des graves sécheresses qui compromettent chaque année les productions agropastorales dans la région sahélienne, deux grands ensembles d'obstacles handicapant la mise en œuvre de palliatifs efficaces à ces drames :

- manque d'informations sur le milieu et son exploitation par l'homme ;
- manque de logistique : la collecte, la compilation et l'élaboration d'un tissu cohérent d'informations spatialisées ou statistiques d'aide à la décision, nécessitent de recourir à des moyens humains ou matériels importants, qui font le plus souvent défaut.

C'est un constat regrettable pour les pays de la région qui ont singulièrement besoin de données fiables sur les potentialités en ressources naturelles de leur territoire, afin d'en optimiser la mise en valeur et de minimiser les effets adverses :

- étude des potentialités physiques du milieu ;
- localisation et suivi des secteurs d'extension de l'activité anthropique ;

– évaluation et surveillance continue de l'évolution de certains écosystèmes consécutive aux effets conjugués de la variation climatique et de l'intervention humaine.

La télédétection permet aujourd'hui de répondre en partie à ces préoccupations. En effet, les évaluations récentes s'accordent à penser que la télédétection satellitaire, intégrée dans un plan d'information sur les ressources terrestres, permettrait d'obtenir des estimations suffisamment fiables et de minimiser par ailleurs le coût des investigations (réduction par exemple du nombre de campagnes de sondage au sol). Elle apporte les composantes de répétitivité et de spatialisation dans la collecte des connaissances environnementales :

- appréhension du milieu sur de vastes étendues ;
- capacité de discrimination des composantes du paysage ;
- approche de la dynamique du paysage par une observation temporelle des variations de ses unités.

Cette étude explore les critères d'utilisation des techniques de télédétection pour contribuer à l'élaboration d'un outil de diagnostic et d'aide à la décision en matière d'aménagement des bas-fonds, notamment dans la régionalisation des caractères décrivant le fonctionnement de ces milieux. L'objectif est ainsi d'évaluer l'apport de la télédétection pour reconnaître, analyser et replacer dans leur environnement physique global les bas-fonds.

La démarche méthodique globale a comporté trois niveaux de traitement de l'information satellitaire haute résolution :

- reconnaissance et mise en évidence des zones humides potentielles au sein du paysage ;
- hiérarchisation des états de surface au sein de ces zones ;
- analyse de relations entre dynamiques de l'eau et information satellitaire.

Les fonctions d'abstraction de l'information font appel à des techniques variées, combinant l'emploi de l'informatique, des statistiques et des observations ponctuelles représentatives sur le terrain :

- procédures de traitements analogique et numérique d'images satellitaires à haute résolution, basées sur l'analyse diachronique d'une image LANDSAT THEMATIC MAPPER de fin de saison des pluies et d'une image SPOT multispectrale de fin de saison culturale ;
- analyse statistique expérimentant l'incidence de niveaux de nappe dans les rizières sur l'information satellitaire ;
- sondage sur le terrain en amont et en aval de l'analyse de l'information satellitaire en vue d'initialiser les différents traitements et d'estimer la précision numérique des résultats obtenus.

Il faut retenir enfin que la recherche a été conduite de telle manière que la télédétection soit davantage un outil de caractérisation plutôt que de suivi dans le temps.

Problématique des bas-fonds en Afrique

Les bas-fonds en Afrique intertropicale sont les zones de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques alimentées par les pluies. Ce sont des éléments du paysage relativement stables. Leur empreinte dans le paysage est déterminée par la dynamique d'évolution de processus génétiques physiques :

géogénèse, morphogénèse, pédogénèse et flux hydriques en interactions intimes. On estime à 1,3 million de km² la superficie des bas-fonds en Afrique [1].

La richesse physicochimique des sols des bas-fonds et l'humidité relative qu'ils conservent, confèrent à ces zones des potentialités agronomiques incontestablement meilleures que celles des versants.

Depuis la vague de fortes sécheresses (1973-1974, 1984-1985), on note un déplacement des fronts de culture vers ces milieux, naguère délaissés pour des raisons diverses : humidité excessive, lourdeur des sols, persistance des endémies...

Ainsi, diverses spéculations se développent autour des bas-fonds, singulièrement propices à la culture du riz. Cependant, au regard des faibles rendements obtenus dans les bas-fonds pour cette production [2], on note une insuffisance dans l'exploitation de la plus-value agronomique de ces zones. Le constat est dès lors établi, de la nécessité de comprendre et de maîtriser au préalable les mécanismes régissant le fonctionnement hydrologique des bas-fonds et de suggérer les aménagements types permettant d'optimiser l'exploitation de ces milieux.

Des efforts de recherche certains ont été accomplis pour caractériser les bas-fonds et en résumer les types morphologiques fondamentaux (classifications de Raunet, Kilian et Tessier, Albergel, etc.).

Malheureusement, les méthodes de diagnostic et de collecte des données qui ont alors été mises au point, sont restées ponctuelles, seulement applicables localement aux bas-fonds pour lesquels elles ont été développées.

Si l'on veut pourtant initier des stratégies de mises en valeur cohérentes à l'échelon régional, la nécessité s'impose de trouver des fonctions de typologie partagées par tous. La traduction pratique de cet effort comporte :

- l'identification des variables les plus déterminantes pour la connaissance et la mise en valeur des bas-fonds, ce qui permet de concentrer l'effort sur des thèmes pragmatiques ;
- la comparaison, l'échange et la transposition des résultats obtenus sur des sites pilotes représentatifs, au moyen d'outils de perception spatiale à grande échelle, la télédétection.

Bas-fonds et télédétection : approche de zones humides

Les satellites d'observation de la terre offrent indéniablement aujourd'hui des possibilités immenses pour obtenir des informations spatialisées en termes qualitatifs (nature, signification, état...) ou quantitatifs (superficie, intensité, densité...) sur des objets de la surface terrestre, notamment au niveau des bas-fonds.

Mais il est tout autant certain que des problèmes se posent lorsqu'il faut définir des critères pertinents adaptés au phénomène considéré, pour le traitement des données satellitaires. Au niveau des bas-fonds, les variables physiques qui usuellement servent à la caractérisation de ces milieux, se révèlent à l'échelle des outils de télédétection assez restrictives. En effet, les réponses spectrales des bas-fonds ainsi que la distribution des luminances dans les différentes bandes du spectre, correspondent à une réponse globale qui

intègre la réflectance particulière de facteurs aussi divers que le substratum géologique, les caractères du sol (texture, structure, couleur, humidité...), la couverture végétale (densité, teneur en eau, phénologie...), les modifications anthropiques, l'humidité ambiante de surface (liée aux effets du vent), etc.

Les traits morphologiques, pédologiques ou hydrologiques décrivant les bas-fonds ne suffisent (ou ne permettent) donc plus, à ce niveau de perception spectrale des phénomènes, de circonscrire spécifiquement ces milieux.

Il devient indispensable d'introduire une notion plus étendue, mieux adaptée aux méthodes et techniques de télédétection : les zones humides [3]. Le concept est fondé sur la détection des milieux (écosystèmes) où la présence de l'eau tient une part prépondérante. Cette eau est soit libre en surface, soit incluse dans les sols plus ou moins engorgés et dans les communautés végétales ripisylves.

Ces écosystèmes se localisent sur le terrain, dans les zones déprimées à drainage naturel généralement médiocre, sujettes à des submersions temporaires ou permanentes. Sur l'information satellitaire, ils se singularisent (toutes autres conditions étant constantes) par une réflectance variant en raison inverse de l'humidité et ce, pour toutes les longueurs d'onde : visible et infrarouge.

On le voit donc, la notion de zones humides englobe en plus d'autres éléments qui ne sont pas repris ou qui ne peuvent être classés dans les définitions de bas-fonds habituellement proposées. Il s'agit en l'occurrence de toutes les surfaces et terres humides (ou en eau) prolongeant en aval la partie terminale de la différenciation morphopédologique des bas-fonds, définie par [1] : plaines ou parties de plaines alluviales dont le drainage du sol est déficient, plans d'eau permanents ou temporaires, naturels ou artificiels ; mais également les lits et berges de cours d'eau bien imprimés (rivières, fleuves...).

L'élargissement de la notion de bas-fonds à celle de zones humides apparaît alors plus exploitable au niveau de l'information satellitaire, où la présence de l'eau se révèle par des valeurs radiométriques globalement faibles dans les bandes spectrales du moyen infrarouge et de l'infrarouge thermique plus particulièrement.

La méthode et les traitements utilisés dans cette étude pour la reconnaissance des zones humides sont basés alors sur l'analyse de ces propriétés spectrales.

Cadre de l'étude

Le site d'étude est localisé dans les confins sud-ouest du Burkina Faso et sud du Mali (figure 1). Il s'agit nommément des bas-fonds, plaines et bassins versants de Kawara, Moadougou, Badini, Niofila, Douna et Damana au Burkina et de Kambo, Sikasso, Lotio, Bamadougou et Samogosso au Mali.

Le climat de la zone est de type soudano-guinéen à deux saisons bien contrastées. Le bilan hydrique est globalement négatif sur une grande partie de l'année : seuls les mois de juillet, août et septembre accusent un bilan positif [4].

La région dans son ensemble repose sur un vieux socle granitogneissique. Le modelé du

terrain est une vaste pénéplaine monotone, dominée par un plateau haut de 520 m en moyenne.

Les bas-fonds taillés dans le manteau d'altérite qui recouvre le socle précambrien sont peu encaissés, avec des fonds plats et larges. Les sols sont hydromorphes gleyifiés ou à pseudogley.

La végétation est à dominante de formations savanicoles denses à moyennement denses, à forte diversité spécifique.

L'activité rurale est résumée par une agriculture de subsistance, itinérante, principalement axée sur les productions vivrières, et par un élevage extensif de menu bétail et aviaire.

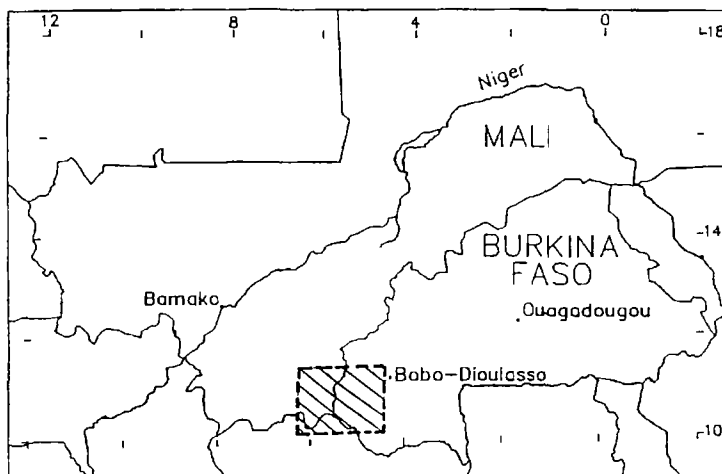


Figure 1. Situation de la zone d'étude.

Méthodes de reconnaissance et de mise en évidence des zones humides

La méthode est résumée par la figure 2. La démarche appliquée dans l'étude est un système intégré de télédétection combinant les phases de photo-interprétation, d'observations sur le terrain et de traitements analogiques et numériques d'images satellitaires.

Une approche comparative permet de tester la pertinence de quatre types d'analyse d'images pour reconnaître et mettre en évidence les zones humides au sein du paysage :

- deux techniques de perception visuelle : photo-interprétation, interprétation manuelle (ou analogique) d'images ;
- deux procédures de traitements numériques d'images satellitaires : seuillage et classifications.

A chacun des niveaux de traitement, les résultats obtenus sont satisfaisants. L'estimation de la qualité numérique des résultats (tableau I) montre cependant que le traitement analo-

gique se révèle plus performant pour mettre en évidence les zones humides d'une région et minimiser les risques d'erreurs par omission et par confusion.

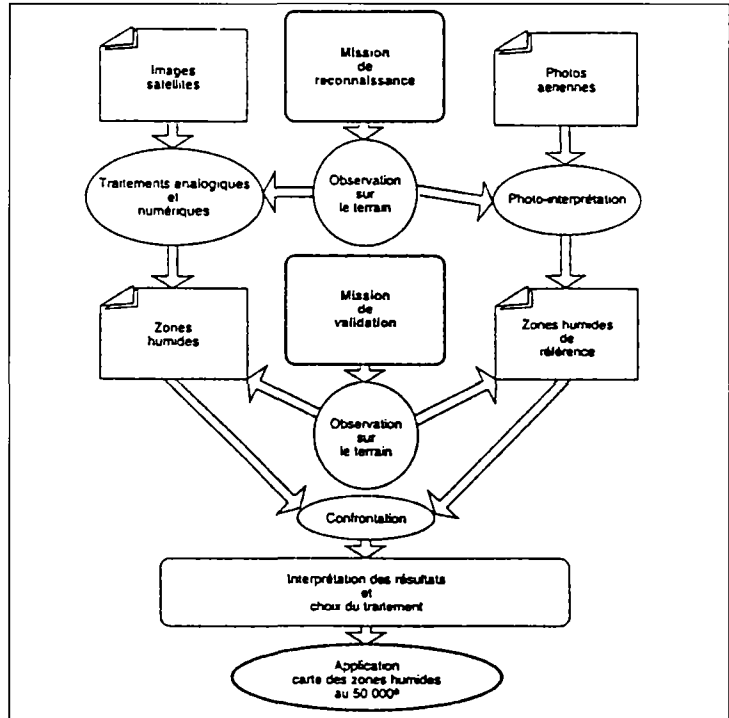


Figure 2. Méthode suivie pour la mise en évidence de zones humides.

Discrimination des principales composantes agroécologiques au sein des zones humides

La détermination de l'aire d'extension des zones humides à l'étape ci-dessus permet à présent de pouvoir effectuer une hiérarchisation de l'information au sein de ces unités en classes discrètes. C'est une approche de type systémique qui est envisagée, c'est-à-dire que l'observation spatiale est prolongée par une observation temporelle des variations des différentes unités pour mieux diagnostiquer les principaux éléments (dynamiques) du milieu.

La démarche s'appuie donc sur une analyse bitemporelle d'images satellitaires pour discriminer les différents objets. C'est une fonction de plusieurs types de traitements numériques (seuillage, divers algorithmes de classification supervisée...) regroupant l'information selon des critères thématiques bien définis.

La première étape de traitement s'effectue sur une image LANDSAT-TM de fin de saison de pluie. L'information sur cette image est stratifiée selon l'état de submersion des

unités, en examinant les caractéristiques spectrales des zones humides dans l'infrarouge moyen et proche (figure 3). Une partition binaire par seuillage sur ces deux canaux permet de déterminer deux classes : eau et "non-eau".

Tableau 1. Appréciation de la qualité numérique des résultats de mise en évidence des zones humides sur l'image LANDSAT-TM (05-11-88). Confrontation avec la réalité-terrain intermédiaire issue de la photo-interprétation.

Traitements	S1 (ha)	S2 (ha)	E1 (%)	E2 (%)
Traitement analogique	2 891	2 556	11,60	8,50
Classification supervisée	2 412	2 036	15,60	27,10
Classification non supervisée	2 577	2 229	13,50	20,20
Seuillage sur TM6	3 171	2 461	22,40	11,90
Seuillage sur TM5	3 242	2 279	29,70	18,40
Seuillage sur TM5 et TM6	2 941	2 385	18,90	14,60

S : superficie des zones humides révélées par l'interprétation des photographies aériennes (10-11-89) au 1 : 20 000° S = 2793 ha.

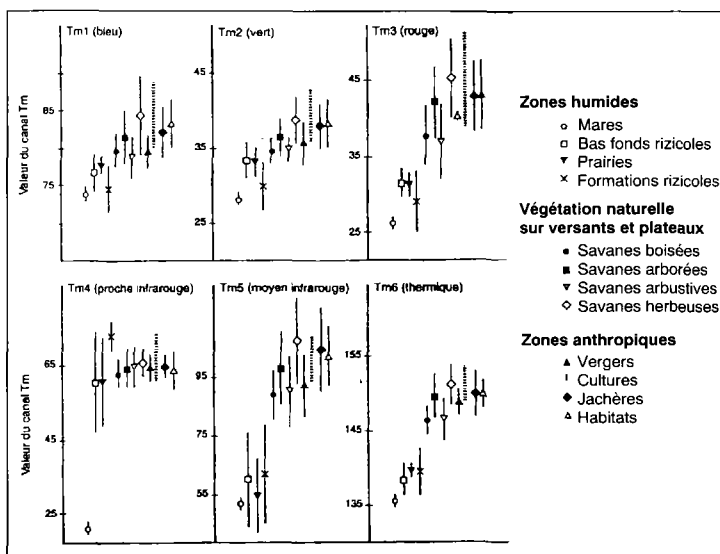
S1 : superficie des zones humides révélées par le traitement de l'image LANDSAT-TM.

S2¹ : superficie des classes de zones humides révélées par le traitement considéré, comme par la photo-interprétation.

E1 : erreur de confusion : zones humides mises en évidence par le traitement, se localisant en dehors des zones relevées par la photo-interprétation. $E1 = (S1-S2)*100/S1$.

E2 : erreur d'omission : zones humides mises en évidence par la photo-interprétation, mais non relevées par le traitement. $E2 = (S-S2)*100/S$.

Figure 3. Signatures spectrales de quelques thèmes sur l'image LANDSAT-TM.



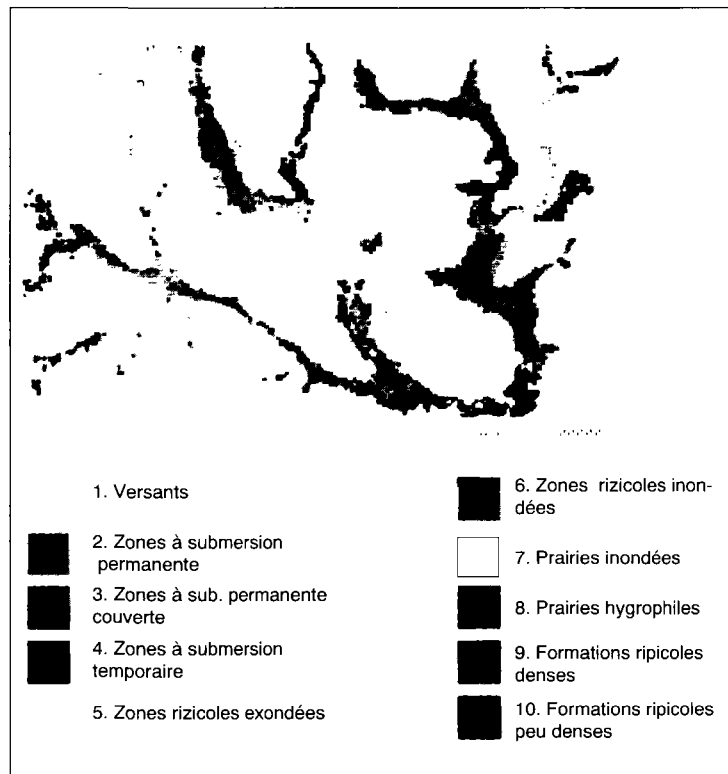
1. Ces superficies sont déterminées par la superposition des zones entre les deux traitements, pixel par pixel. Les pixels de bordure sont éliminés pour minimiser les éventuelles distorsions de rectification.

La seconde étape génère sur une image SPOT¹ multispectrale de fin de saison culturale une agrégation de l'information au sein des zones humides en ses principaux constituants agroécologiques. La détermination des grandes structures présentes sur l'image se fait selon les méthodes de classification supervisée. Les classes obtenues sont stables et sont le reflet des conditions du milieu au moment de l'acquisition de l'enregistrement satellitaire.

Une analyse diachronique, réalise *in fine* la superposition cartographique des résultats issus des traitements séparés de TM et SPOT (figure 4). On effectue un croisement des images pour obtenir des classes multitudes qui rendent compte à la fois du type d'occupation du sol (traitement sur SPOT) et de son niveau de submersion (traitement sur TM).

La précision globale des traitements, évaluée par la matrice de confusion entre les classes observées sur le terrain et celles issues des traitements, est de 88 %.

Figure 4. Résultat de l'analyse bitemporelle à l'intérieur des zones humides.



1. Le choix de cette image SPOT est expliqué par l'absence d'enregistrement LANDSAT-TM pour la région à cette période.

Caractérisation des versants

Sur les versants, le paysage a été stratifié suivant les faciès d'anthropisation et selon le niveau de couverture végétale. Une telle façon de caractériser le milieu peut aisément se comprendre quand on mesure l'influence prépondérante que prennent les traits de l'action de l'homme et la végétation dans les processus hydrologiques au sein d'un bassin.

La discrimination des grandes structures identifiables sur les images est effectuée par les mécanismes de la classification supervisée, en reconnaissant les zones d'intervention humaine des zones de végétation (naturelle).

Au sein des zones anthropiques, une analyse plus fine permet de distinguer trois sous-classes : les cultures (parcellaires agricoles de l'année), les jachères et l'habitat (dans le cas des grandes agglomérations).

Au niveau de l'entité "zones de végétation", il s'est avéré difficile de discerner des types physiologiques particuliers correspondant aux nomenclatures usuelles de la végétation pour cette région. Néanmoins, l'information au sein de ce vaste ensemble a pu être hiérarchisée en termes de couverture du sol par la végétation chlorophyllienne, grâce à une relation¹ donnant le recouvrement en fonction de l'indice de végétation RVI (Ratio Vegetation Index : TM4/TM3). Quatre classes sont par ce moyen alors distinguées :

1. Végétation peu dense : $R \% < 20 \%$
2. Végétation moyennement dense : $R \% : 20-40 \%$
3. Végétation dense : $R \% : 40-70 \%$
4. Végétation très dense : $R \% : > 70 \%$.

Etude de l'engorgement et de la submersion dans les bas-fonds

En Afrique soudano-sahélienne, l'efficacité des principales opérations agricoles est liée au bilan hydrique de la plante et du terrain. La connaissance de l'engorgement dans les bas-fonds est dès lors une contribution déterminante à l'amélioration de l'exploitation optimale de ces ressources. C'est d'ailleurs un des points essentiels du programme de recherche sur la mise en valeur des bas-fonds au Sahel (R3S).

L'objectif de cette partie de l'étude est de développer une méthode permettant d'évaluer et de modéliser l'engorgement et la submersion des bas-fonds rizicoles à partir des données satellitaires. Deux aspects sont considérés :

1. $\log_{10} (R\%) = - 2.718 \text{ RVI} + 3.33$. C'est une relation (Defourny, 1990 : communication personnelle) étalonnée pour la région de Bobo-Dioulasso, au Burkina Faso (écologiquement fort proche de nos zones d'études).

- définir, d’une part, l’incidence du niveau de nappe d’eau sur l’information spectrale ;
- déterminer par ailleurs, sur base de relations établies à l’étape précédente, des gradients d’engorgement permettant une reconnaissance d’unités hydrologiques homogènes au sein des rizières.

Pour le premier aspect, l’analyse de la sensibilité des informations enregistrées par le satellite aux valeurs de niveau de nappe est effectuée en calculant des corrélations entre celles-ci et les comptes radiométriques moyens dans les six canaux bruts de TM, les valeurs de six indices classiques : NDVI, RVI4/3, DVI, SLI, PVI et Brillance, et les valeurs d’indices dérivés de la combinaison du canal moyen infrarouge (TM5) avec certaines bandes spectrales de l’image TM. Ces derniers indices, nous les intitulons par la suite “ indices d’humidité ” (IH).

L’enregistrement satellitaire utilisé est l’image LANDSAT-TM de fin de saison de pluies.

A cette période, nous disposons de données de terrain reprenant les valeurs de fluctuation de la nappe sur 31 points de mesure dans les parties rizicoles du bas-fond de Kawara (Burkina Faso). Ces points de mesure ont été répartis dans le bas-fond de façon à représenter différentes situations toposéquentielles : amont, aval, berge, lit mineur...

L’expérience montre que ni les canaux bruts, ni les indices classiques ne semblent être reliés aux niveaux de nappe (le coefficient de corrélation le plus élevé en valeur absolue a été obtenu pour le canal thermique TM6 : $R = -0,36$).

Par contre, elle révèle l’existence d’une étroite corrélation entre niveaux de nappe et indices d’humidité. L’intensité de la liaison obtenue à chaque fois (tableau II) est très élevée.

Tableau II. Matrice de corrélation entre information satellitaire et niveau de fluctuation de la nappe.

	PIEZO	IH1	IH2	IH3	IH4	IH5
PIEZO	1					
IH1	0.871	1				
IH2	0.885	0.976	1			
IH3	0.890	0.980	0.998	1		
IH4	0.538	0.353	0.502	0.504	1	
IH5	0.762	0.748	0.843	0.824	0.643	1

IH1 = $TM4 - TM3$;

IH2 = $TM4/TM3$;

IH3 = $(TM4 - TM5)/(TM4 + TM5)$;

IH4 = $((TM3 - TM5) + 5)/((TM4 - TM3) + 5)$;

IH5 = $((TM4 - TM5) + 5)/((TM4 - TM3) + 5)$;

PIEZO : Niveau de la nappe par rapport à la surface du sol.

On remarquera que :

- l’indice IH3 impliquant uniquement le moyen infrarouge (TM5) et le proche infrarouge (TM4) exprime mieux, ponctuellement, l’incidence du niveau de la nappe sur l’information satellitaire ;

- les coefficients de corrélation entre indices d’humidité sont très élevés et traduisent alors globalement leur équivalence.

Pour l'indice le mieux corrélé avec les niveaux de nappe (indice IH3), une régression simple est calculée par la méthode des moindres carrés. La relation établie paraît satisfaisante :

$$\text{PIEZO} = -256 + 1,64 \cdot \text{IH3} \quad (R^2 = 0,79)$$

La figure 5 présente la droite calculée par régression simple pour relier les valeurs indicielles aux valeurs de niveau de nappe.

Dans le second aspect de cette partie du travail, il s'agit d'exploiter les différentes relations précédemment établies entre indices d'humidité et niveaux de nappe, pour caractériser les bas-fonds en zones hydrologiquement homogènes.

L'information dans les unités rizicoles est hiérarchisée en termes de niveau d'engorgement.

La partition permet de constater l'existence d'un gradient d'engorgement des sols entre les berges et le lit central des bas-fonds. Cette tendance passe d'un niveau phréatique très bas (engorgement nul) sur les berges, à des hauteurs d'eau plus superficielles (engorgement total) dans l'axe central du bas-fond (figure 6).

La validité de ces indices d'humidité est vérifiée en éprouvant la partition découlant de l'indice IH3 (données satellitaires de 1988), à des mesures de fluctuation de nappe, réalisées sur le terrain (118 points de sondage, systématiquement distribués au pas de 30 m sur 16 transects coupant l'axe principal du bas-fond de Kawara d'amont en aval) à la même période, et entre deux années.

La figure 7 ci-après montre (noter la forte similarité dans la variation des différentes courbes à chacune des dates) qu'en plus de la validité des relations définies, la caractérisation des bas-fonds rizicoles en zones hydrologiques homogènes est stable dans le temps.

Il faut cependant rester conscient du problème du droit à l'extrapolation dans l'espace et dans le temps des relations qui ont été déterminées, mais également de la nécessité d'une

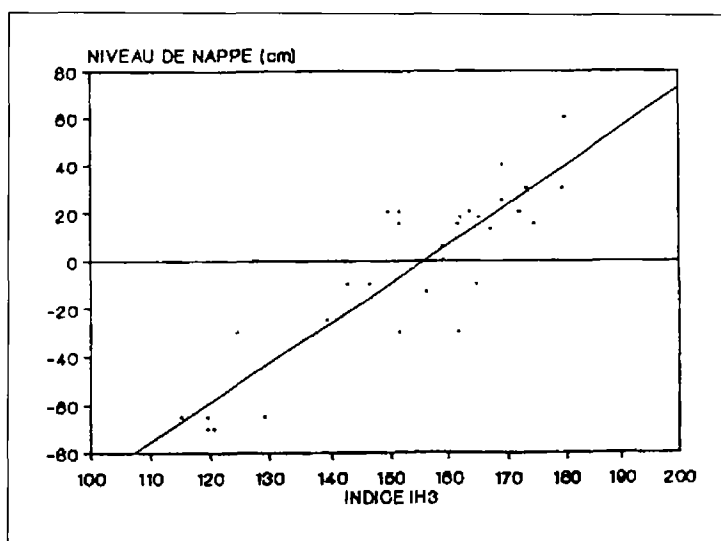


Figure 5. Relation entre l'indice d'humidité IH3 et le niveau de nappe.

Figure 6. Classement de l'image TM selon le niveau d'engorgement du sol dans les bas-fonds rizicoles.

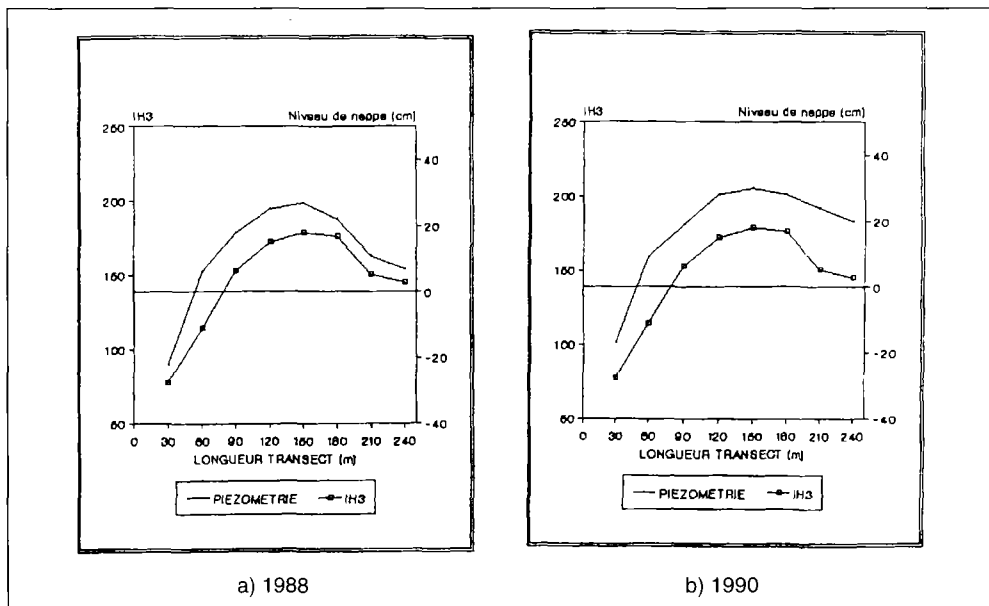
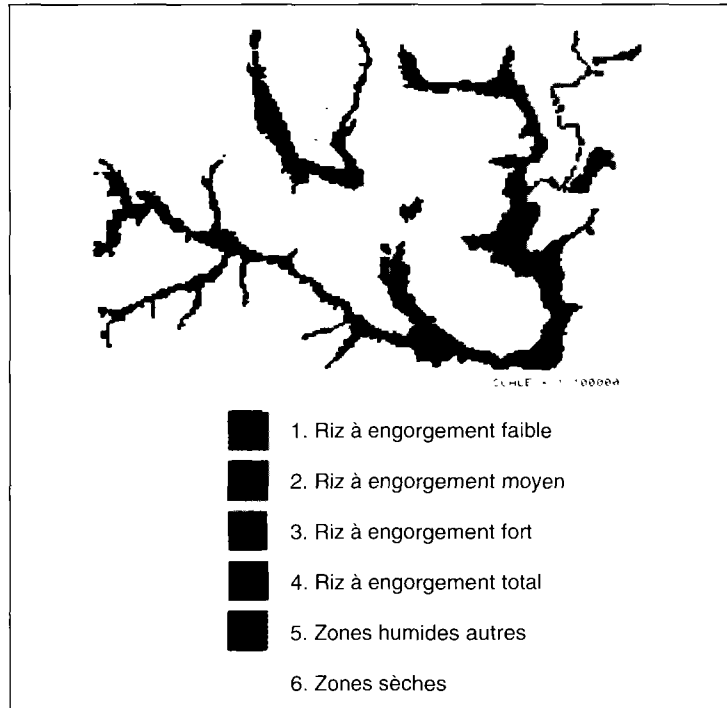


Figure 7. Courbes de variation de l'indice d'humidité et du niveau de nappe.

analyse complémentaire pour mieux préciser ces relations, en étendant largement l'échantillonnage pour couvrir la diversité écologique au sein des zones humides et en travaillant sur des données satellitaires contemporaines aux mesures de terrain.

Toutefois, il apparaît que cette étude a permis de dépasser le stade d'approche globale classique de l'analyse du paysage, pour prétendre aux mécanismes particuliers du comportement de ses constituants.

Conclusion

L'emploi des images satellitaires dans les pays en voie de développement en général, et particulièrement dans les pays sahéliens, en est encore à une phase initiale, prospective.

L'absence de cartes thématiques actualisées dans ces régions, la difficulté d'obtenir des séries d'informations fiables et la nécessité d'agir rapidement face aux contingences climatiques justifient cependant amplement le recours à cet outil nouveau qu'est la télédétection.

Au cours de cette étude des bas-fonds au Sahel, nous nous sommes efforcés de circonscrire notre investigation autour de la mise en œuvre de techniques simples, éprouvées, et d'une démarche sobre, facile à générer, fiable et suffisamment maîtrisée.

Les résultats auxquels nous sommes arrivés révèlent la possibilité d'aboutir à des renseignements précieux pour les objectifs fixés. Nous avons pu établir qu'il est possible de trouver de bons critères télédétections pour mettre en évidence les zones humides, en discriminer les principales composantes et en déterminer les niveaux d'engorgement.

A chacun des trois niveaux d'abstraction de l'information relevés ci-dessus, peut correspondre une fonction de typologie des bas-fonds à un ou deux critères.

- La mise en évidence des zones humides peut servir à sérier les bas-fonds selon un critère dimensionnel (par exemple la largeur moyenne du bas-fond) ou un paramètre morphologique.

- Sur la base du zonage agroécologique, il est possible de distinguer des types de bas-fonds selon un critère "chorologique" (par exemple distribution géographique des rizières à l'intérieur des bas-fonds).

- L'occupation du sol sur les versants peut servir indirectement de base à l'établissement d'une typologie des bas-fonds, fondée sur un critère descriptif du fonctionnement hydrologique des versants (par exemple le potentiel de ruissellement).

- La détermination de la dynamique de la nappe peut servir à établir une typologie des bas-fonds, fondée alors sur un critère d'engorgement.

Plus concrètement nos résultats à tous les niveaux peuvent connaître des perspectives d'utilisation fort intéressantes.

- Le rendu cartographique des zones humides à une échelle appropriée est un outil de base utile pour les décideurs et les aménageurs dans l'optique de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. L'échelle du 1 : 50 000^e par exemple suffit pour estimer les potentialités d'une région en zones humides en vue d'une politique globale de mise en culture de ces zones.

La répétition périodique de la démarche, par ailleurs, permet de suivre l'évolution des zones humides face à l'impact général de la désertification et de l'action anthropique.

- La détermination des principales composantes agroécologiques à l'intérieur des zones humides permet d'évaluer la superficie du secteur rizicole et contribue ainsi à l'amélioration des statistiques agricoles d'une région ou d'un pays.

La carte des états de surface facilite également le choix d'emplacement des nouvelles surfaces à aménager en vue d'une meilleure exploitation des terres et de l'orientation des activités des communautés rurales.

- Sur les versants, la carte d'occupation du sol est très utile pour des actions locales de compréhension et de modélisation des phénomènes d'écoulement superficiel dans les bassins.

- Les résultats dégagés au cours de l'analyse de l'engorgement des bas-fonds sont également importants. En effet, l'efficacité des principales opérations agricoles est liée au bilan hydrique de la plante et du sol. Le défaut ou l'excès d'eau se répercute immédiatement sur la physiologie des cultures et, dès lors, présente une incidence significative sur les productions attendues. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de la culture de riz, où le facteur limitant au développement de cette production est essentiellement l'eau. C'est dire donc que déterminer des gradients d'engorgement à l'intérieur des rizières est particulièrement utile pour :

- faciliter la découverte de secteurs qui requièrent d'urgents besoins d'aménagement : drainage ou irrigation ;

- suggérer les emblavures à mettre en riz (ou en d'autres spéculations agricoles) et donc programmer en temps utile tous les inputs nécessaires pour les cultures ;

- moduler les calendriers culturaux en fonction de l'état d'engorgement des sols au cours de la saison ;

- éveiller l'attention de l'aménageur sur les difficultés susceptibles de gêner son action (humidité excessive par exemple).

- Intégrés à d'autres données cartographiques numériques (climatiques, géologiques, démographiques...), nos résultats peuvent servir à alimenter un système d'information géographique (SIG) qui permettrait de définir une typologie pragmatique des zones humides, en fonction de la localisation, de la morphologie, de la superficie, de l'état des surfaces, de la dynamique hydrologique... identifiés par la télédétection, et d'autres caractéristiques recensés dans les autres couches de la base de données ainsi constituée.

En outre, pour la région du Sahel, la possibilité d'acquisition d'images sans nuage durant la période novembre-janvier permet d'envisager plus sûrement l'opérationnalité et l'extrapolation de la méthode et des traitements proposés.

Bien sûr, nous n'avons pas dans le cadre de cette recherche épuisé toutes les questions liées à l'utilisation de la télédétection dans l'investigation des bas-fonds en Afrique sahélienne. Néanmoins les quelques approches méthodologiques utilisées démontrent que la télédétection est apparue comme une technologie adéquate pour révéler les zones de bas-fonds, les stratifier et en déterminer la dynamique hydrologique. Elle s'est par ailleurs indiscutablement révélée apte à généraliser dans l'espace les variables descriptives fondamentales des bas-fonds.

Références

1. Raunet M. (1985). Bas-fonds et riziculture en Afrique : approche structurale comparative. *Agronomie Tropicale* 40-3, 181-202.
2. Zeppenfeldt T., Vlaar J. (1990). Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Synthèse préliminaire sur l'état des connaissances. Comité interafricain d'études hydrauliques. Ouagadougou, Burkina Faso, 137 p.
3. Mokadem A., Nonguierma A., Dautrebande S. (1991). Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'étude des bas-fonds au Sahel. *Sécheresse*, vol. 2, 3 : 189-198.
4. Dewez A. (1990). Apports de la télédétection satellitaire dans la typologie des zones de bas-fonds en région soudano-guinéenne. Mémoire de fin d'études. UER Hydraulique agricole (FSAGx), Gembloux, 121 p.

27

Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle (Saria, Burkina Faso, 1990)

S. GUILLOBEZ, R. ZOUGMORE

INERA, station de Kamboinsé, Burkina Faso

Le ruissellement est un élément qui est difficile à estimer dans le milieu ; son influence sur le bilan hydrique des cultures est important, surtout en début de campagne quand le front d'humectation n'a pas atteint la base du profil cultural. Ses incidences sur l'alimentation des retenues d'eau et des nappes sont d'une grande importance pour les populations rurales.

Principales formules du ruissellement

L'étude mathématique montre que la quantité d'eau qui ruisselle (en régime stable) sur le sol, lors d'une pluie, est fonction des paramètres suivants [1] :

- pluviosité (P) ;
- intensité de la pluie (I) ;
- vitesse de filtration (K) ;

- longueur de la parcelle (L) ;
- durée de la pluie (T).

Formules empiriques du ruissellement

Parmi les différentes formules ou algorithmes proposés, notre étude a porté sur une formule générale utilisée aux Etats-Unis (modèle EPIC [2]) et une série de formules expérimentales établies par l'ORSTOM en régions sahélienne et soudanienne [3].

Modèle EPIC

Cette formule empirique a été développée dans le cadre d'un modèle général de prévision des rendements et de l'érosion.

Erosion/Productivity Impact Calculator

$$L = (P - 0,2.S)^2 / (P + 0,8.S)$$

Les paramètres pris en compte sont :

- P : la pluviométrie,
- S : un paramètre de rétention qui dépend du “coefficient hydrologique” (*Runoff curve number*), de l'humidité du sol (HR) et de la pente du sol.

Algorithme ORSTOM

Il s'agit d'une série de formules expérimentales proposées par Casenave et Valentin [3] qui dépendent des différents états que le sol peut prendre en fonction de son utilisation et des pluies.

L'expression générale est :

$$L = a.P + b.I_k + c.P.I_k + d$$

Les paramètres sont les suivants :

- L : ruissellement en mm ;
- P : pluie en mm ;
- I_k : indice de Kohler (lien avec l'état hydrique du sol),
- a, b, c et d : paramètres expérimentaux qui dépendent de l'état de surface du sol.

Le ruissellement : aspect pratique

Le régime du ruissellement, dans les conditions naturelles, peut être décomposé en quatre phases :

- une phase d'imbibition qui correspond en début de pluie au piégeage des eaux par le micro-modélé du sol ;
- un régime transitoire, le ruissellement commence ;
- un régime permanent, le ruissellement est important ;
- une phase de vidange, après l'arrêt de la pluie, le ruissellement diminue et s'arrête, il y a “détention superficielle” d'eau par le micro-modélé.

Principaux facteurs conditionnant le ruissellement

Ces différentes formules permettent de dégager les principaux facteurs qui expliquent le ruissellement (hauteur d'eau ruisselée).

Facteurs climatiques

C'est essentiellement la pluviosité, aspect quantitatif (P en mm) et dynamique (intensité en trente minutes I_{30} en mm/h, durée T et agressivité R_w). Il a été montré au Burkina [4] que l'agressivité au sens de Wischmeier était en relation étroite avec le produit de P par I_{30} .

Facteurs du sol

L'expression "sol" comprend à la fois le sol au sens pédologique et au sens commun (surface sur laquelle on marche). Dans ce dernier cas, la végétation superficielle est incluse dans cette acception.

Le principal facteur est la perméabilité, qui est représentée, du point de vue physique, par le coefficient K (vitesse de filtration par unité de pente). Les notions d'états de surface (ORSTOM) ou de coefficient hydrologique (*Runoff curve number* du modèle EPIC) influent sur la perméabilité du sol.

L'humidité du sol a également un rôle sur l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle est prise en compte directement dans le modèle EPIC et indirectement dans les formules ORSTOM (indice de Kohler).

Le second facteur est la rugosité au sens général ; elle intervient dans le ruissellement de deux façons :

- rôle de friction, sur la vitesse d'écoulement à l'interface sol-atmosphère,
- rôle de piégeage de l'eau par le micro-modélé lors des phases d'imbibition et de vidange.

La pente est à l'origine du ruissellement mais son influence sur la lame d'eau ruisselée n'a pas été établie théoriquement [9]. Le modèle EPIC prend en compte celle-ci mais avec une faible incidence ; elle n'intervient pas dans les formules ORSTOM. La pente a, en revanche, une influence importante sur la vitesse de ruissellement et donc sur l'érosion.

Système expérimental

Parmi les paramètres qui jouent sur le ruissellement, deux sont pratiquement fixes dans les conditions des parcelles expérimentales de la station de Saria, au centre du Burkina Faso : ce sont la pente dont la valeur est de 0,7 % et la longueur des parcelles (une parcelle, P_w , de 22 m environ, et quatre parcelles de 16 m). Il n'y a pas de répétition.

Du point de vue statistique, les individus suivis sont l'événement pluie, et les caractères qui leur sont liés sont de plusieurs types : il s'agit de mesures, d'observations ou d'estimations.

Paramètres mesurés

– climatique :

P (mm), I_{30} (mm/h), R_w

I_k tel que : $I_{kn} = I_{kn-1} + P_{n-1} \cdot e^{-0,5 \cdot t}$

($n-1$, pluie précédant la pluie n , t = jours entre les pluies n et $n-1$).

– sol : rugosité : Rug (mm, mesure au profilomètre, figure 1). Par définition la rugosité est l'écart type des mesures du déplacement des tiges [5] (six répétitions par parcelle).

– ruissellement : L (mm). Hauteur d'eau totale ruisselée.

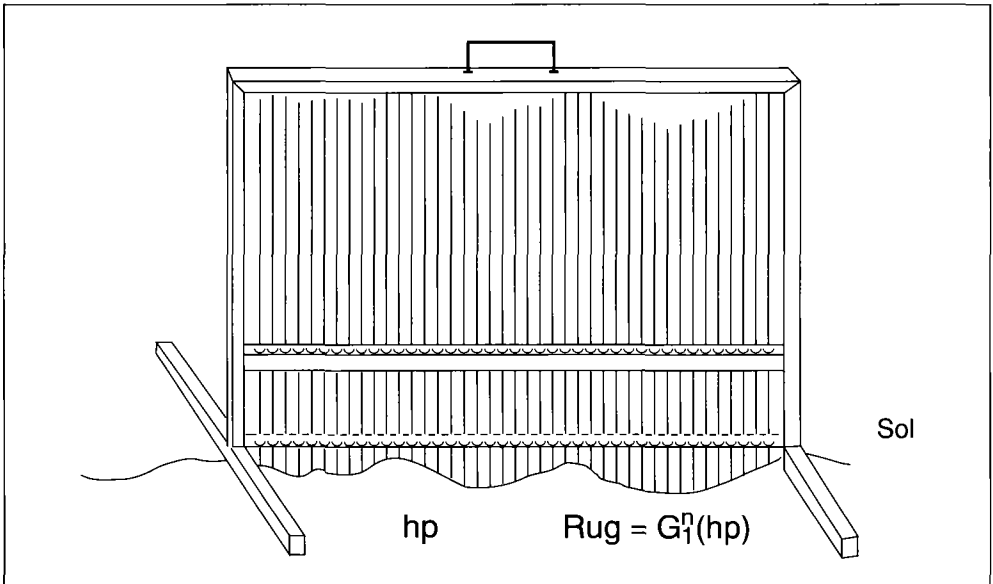


Figure 1. Profilomètre.

Paramètres observés

Etats de surface C_1 , C_2 ou C_3 (selon nomenclature de Casenave et Valentin [3]).

Paramètres estimés

– Humidité du sol : HR.

Pour ne pas perturber le sol par des prélèvements, ce paramètre a été estimé à l'aide du bilan hydrique (culture de sorgho ou sol nu).

– Coefficient hydrologique : CN_2 .

Il a été déterminé à partir des lames d'eau ruisselées (L) et de la pluie (P), ce qui donne la valeur du paramètre de rétention S . Connaissant cette valeur et HR, on calcule CN_2 .

Les traitements

P _w	labour à la daba (grattage), sol nu			pas de compost
P ₁				compost (5t/ha)
P ₂		sol nu		deux sarclages
P ₃	labour à la charrue (traction bovine)	sorgho		
P ₄	labour à la daba (grattage), sorgho, deux sarclages			

Etude de la rugosité

Les mesures ont été effectuées après chaque pluie supérieure à 10 mm ou après chaque travail du sol (labour, sarclages).

Après chaque travail du sol, les valeurs de rugosité obtenues décroissent au cours de la saison des pluies ; une relation a été établie pour chaque parcelle entre la rugosité et la somme des pluies qui sera notée ΣP . Ce paramètre devant logiquement tendre vers 0, la courbe d'ajustement a été cherchée sous la forme d'une exponentielle négative (e^-).

Pour les parcelles P_w et P_1 (même traitement), les rugosités sont pratiquement identiques tout au long de la campagne. La figure 2 correspond partiellement à la parcelle P_1 .

D'une façon générale, les relations sont de la forme :

$$\text{Rug} = \text{Rug}_0 \cdot e^{-\delta \Sigma P}$$

(le coefficient δ dépend du sol)

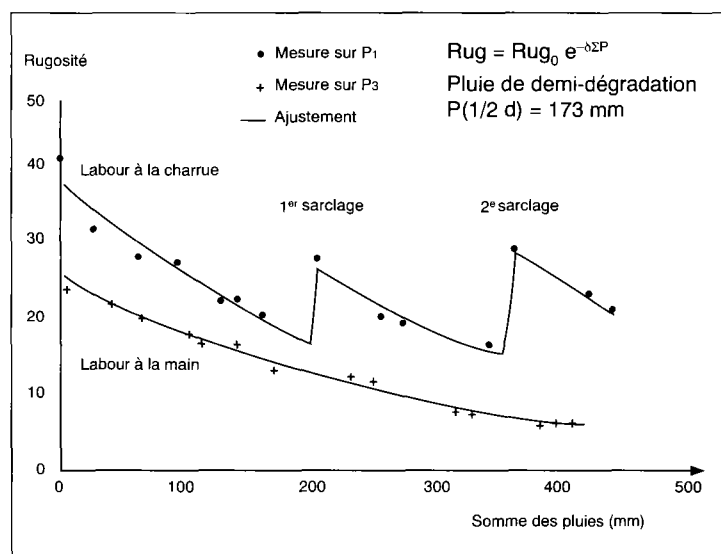


Figure 2. Evolution de la rugosité (parcelles P_1 et P_3).

Pour la parcelle P_3 , la figure 2 met en évidence les fluctuations de la rugosité en fonction de la somme des pluies et des travaux culturaux ; ainsi, on voit que les sarclages permettent de remonter de façon importante la rugosité. Les ajustements ont été faits par période culturale. Les dates des sarclages sont celles préconisées pour le cycle de la culture.

Si l'on compare les deux courbes de la figure 2, on constate que celle relative à la parcelle P_3 est toujours supérieure à celle de la parcelle P_1 . Le coefficient δ est différent selon les parcelles. Il n'a pas été possible de relier ces différentes valeurs aux traitements ou aux périodes de culture. Ce coefficient, qu'on peut appeler "coefficient de dégradation", dépend des caractéristiques du sol (texture, teneur en matière organique, stabilité structurale) ; il pourrait être influencé par les techniques culturales. A titre d'exemple, la somme des pluies de demi-dégradation (division par deux de la rugosité) est de 173 mm pour toutes les parcelles, sauf P_4 où elle est la moitié (période après le labour).

La figure 3 compare les résultats du ruissellement sur les parcelles P_4 (ordonnée) et P_3 (abscisse) ; ces parcelles ont été toutes deux cultivées en sorgho et sarclées deux fois à la même date. La différence de position des points par rapport à la bissectrice provient d'une rugosité toujours supérieure de la parcelle labourée à la charrue (P_3) tout au long de la campagne, par rapport à P_4 (labour à la daba). Les lames d'eau ruisselées sont toujours supérieures sur la parcelle à plus faible rugosité. On montre ainsi le rôle positif de la rugosité pour limiter le ruissellement, mais il est difficile de quantifier l'effet de la rugosité sur le ruissellement. Collinet et Valentin [6] notent une influence de la rugosité sur l'estimation de la "détention superficielle". Lamachère [7] montre que la capacité de stockage superficiel du sol dépend du micro-relief.

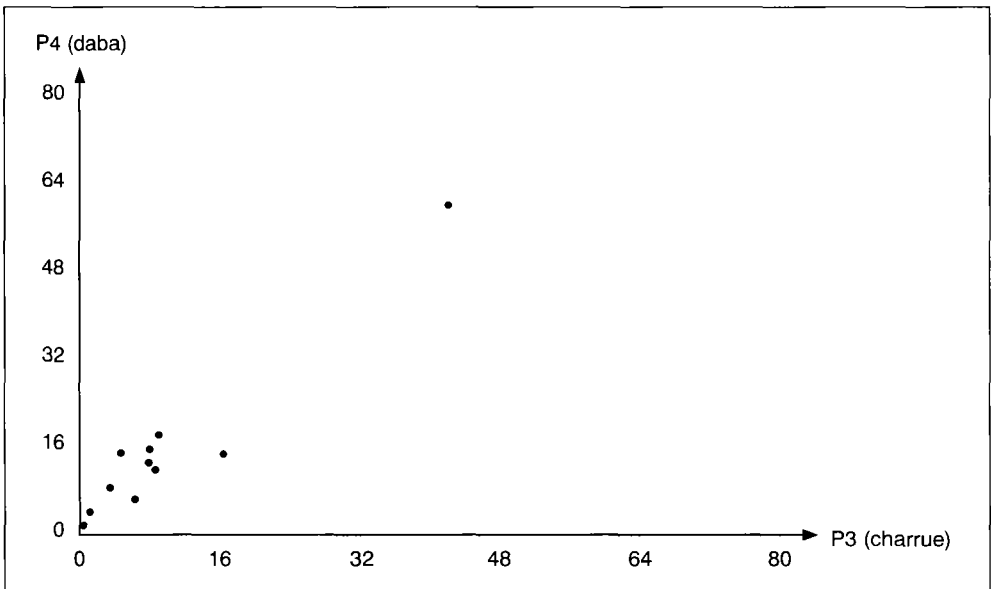


Figure 3. Effet de la rugosité sur le ruissellement.

Etude du ruissellement à l'aide de l'algorithme EPIC

Le modèle EPIC a été établi aux Etats-Unis où des tables des coefficients hydrologiques (*Runoff curve number* pour les conditions hydrologiques du complexe sol-couvert végétal) ont été publiées en fonction des sols, du couvert végétal et des conditions hydrologiques. Ce concept pourrait correspondre ou se rapprocher des notions de rugosité ou d'état de surface.

Les résultats obtenus n'ont pas permis d'envisager l'utilisation de cette formule. Les coefficients CN_2 déterminés pour chaque pluie varient trop brutalement d'une pluie à l'autre, alors qu'ils devraient fluctuer peu autour d'une valeur moyenne caractéristique du sol. Les conditions climatiques du Burkina Faso sont bien différentes de celles des Etats-Unis, aussi pourrait-on envisager une fluctuation qui suive l'évolution de la rugosité ou de l'état de surface, mais cela n'a pas été le cas pour la campagne 1990. Aussi cette formule a-t-elle été jugée inopérante dans les conditions de l'étude.

Etude du ruissellement à l'aide de l'algorithme ORSTOM

En fait, on utilise une famille de formules dont la forme est voisine.

Plusieurs valeurs pour les coefficients a, b, c et d sont proposées, en fonction des états de surface [3]. Dans le cas des sols cultivés, trois types d'états de surface sont définis :

- C_1 : ce type correspond à un travail du sol, il n'y a pas de croûtes mais une pellicule structurale de type 1 dominant ;
- C_2 : sous l'action des pluies, il y a peu à peu formation de diverses croûtes superficielles qui limitent l'infiltration et favorisent le ruissellement (pellicule de ruissellement non dominante) ;
- C_3 : l'évolution de ces croûtes se poursuit, il y a extension des croûtes de ruissellement et même d'érosion et diminution des croûtes structurales ; ces conditions rendent le ruissellement très important.

Pour ces trois états de surface, les coefficients prennent les valeurs suivantes (tableau I) :

Tableau I. Valeurs des quatre coefficients pour les trois états de surface.

	a	b	c	d
C_1	0,20	0,03	0,004	- 3
C_2	0,35	0,04	0,004	- 3
C_3	0,90	0,05	0,002	-10

Dans un premier temps, on a tenté de retrouver par les régressions multiples ces différents paramètres. Pour les différentes parcelles, les résultats n'ont pas été concluants en ce qui concerne I_k et $P.I_k$; seul P est un bon estimateur du ruissellement.

Il est logique d'utiliser ces formules pour estimer le ruissellement, mais ceci demande de connaître l'évolution de l'état de surface en cours de culture afin de sélectionner la formule

adéquate. L'établissement d'une formule unique basée sur des variables quantifiées est nécessaire.

L'observation du tableau I montre que le coefficient **a** par lequel on multiplie la pluie **P** (le meilleur coefficient régresseur du ruissellement) augmente nettement avec la dégradation de l'état de surface.

A partir des états de surface, des valeurs du coefficient **a** ont été établies par parcelle. Des valeurs intermédiaires pour **a** ont été utilisées (valeurs moyennes) quand l'état de surface n'était pas nettement proche d'un des trois états. Les lames d'eaux ruisselées ont été estimées à l'aide des valeurs de **a** observées, de **P** et de **I_k** mesurées ou calculées, les résultats ont été comparés aux valeurs mesurées par les méthodes classiques de régression. Pour tous les traitements, les coefficients de corrélation sont très significatifs et les coefficients de régression sont peu différents (tableau II).

Tableau II. Coefficients de corrélation et de régression entre valeurs mesurées et calculées du coefficient **a**, pour les différents travaux du sol.

Parcelle	Coefficient de corrélation	Coefficient de régression
P _w	0,98	0,98
P ₁	0,95	1,02
P ₂	0,98	0,89
P ₃	0,95	1,06
P ₄	0,97	1,16

Ainsi, on peut dire que le coefficient **a** déduit des observations des états de surface permet une bonne estimation de la lame d'eau ruisselée et cela quels que soient les traitements. Ce résultat en lui-même est très intéressant mais l'utilisation des formules ORSTOM serait plus opérationnelle si l'on arrivait à quantifier l'évolution de ce coefficient en fonction de paramètres mesurables.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour préciser l'évolution de **a** :

a varie en fonction :

- de la somme des pluies
- de la rugosité,
- de la somme des agressivités.

Somme des pluies

Cette première variable n'a pas donné de résultats concordants pour toutes les parcelles. Ceux-ci varient toujours dans le même sens mais diffèrent selon les traitements et n'expliquent pas les valeurs du ruissellement très différentes lors d'une forte pluie (**P** = 67 mm) à très forte intensité (**I₃₀** = 90 mm/h), donc à forte agressivité, qui s'est produite au cours de la deuxième période de culture (soit après le premier sarclage sur des parcelles présentant des rugosités et des états de surface différents). Boiffin [8] sur les sols de limon du Bassin parisien, note une influence de la somme des pluies, depuis l'exposition du sol aux pluies, sur le régime d'infiltration donc indirectement le ruissellement. Lamachère [7] constate à Bidi, au Burkina Faso sur sol sableux, une variation du "coefficient partiel de ruisselle-

ment” en fonction de la somme des pluies depuis le dernier sarclage. Ce paramètre est donc intéressant, mais il est, à lui seul, insuffisant pour estimer l'évolution de l'état de surface du sol et le ruissellement.

Liaison entre a et la rugosité

Il a été possible de relier le coefficient a à la rugosité surtout pour les parcelles n'ayant reçu qu'un labour et pas de sarclage, et dont la rugosité diminue avec les pluies.

Sur la figure 4, la courbe en S représente la variation du coefficient a en fonction de la rugosité pour les parcelles P_w et P_1 tout au long de la campagne ; elle a été tracée à l'aide d'un algorithme qui représente logiquement les variations au voisinage des valeurs extrêmes, ce que la droite d'ajustement obtenue ne permet pas. Pour la parcelle P_3 , les points de la période après labour et avant le premier sarclage ont été reliés. On constate que les segments de droite épousent la forme d'une courbe ($P_3^{(1)}$). Les variations de a dépendent également de la rugosité initiale pour une même période.

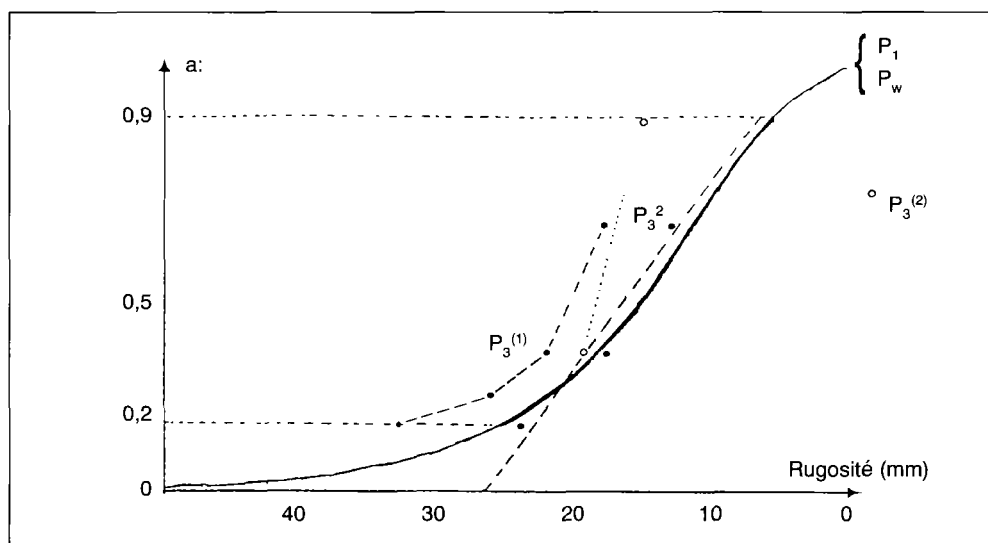


Figure 4. Relation entre le coefficient a (état de surface) et la rugosité.

La prise en compte de la période après sarclage pour la parcelle P_3 (droite $P_3^{(2)}$) ne confirme pas l'hypothèse d'une liaison due uniquement à la rugosité. Tout se passe, dans ce cas, comme si la pente de cette droite était plus forte. Cette période correspond à la pluie la plus agressive qui se produit sur une parcelle récemment sarclée pour P_3 (état de surface amélioré) et sur des parcelles très dégradées (P_w et P_1 , sans sarclage).

La courbe en S de la figure 4 n'est valable que pour les valeurs de a comprises entre 0,2 et 0,9. La rugosité initiale (labour à la daba) est faible (27 mm), $a = 0,2$; quand elle décroît vers de faibles valeurs (6 mm), a croît fortement, $a = 0,9$ (soit une rugosité divisée par 4,5).

Il est possible de rattacher les valeurs de a à un paramètre mesurable comme la rugosité, mais il faut alors tenir compte de la valeur initiale de celle-ci. En effet, selon le labour en début de campagne a est dépendant de l'état de surface. Il semble alors préférable de rattacher a directement à un paramètre climatique unique. La somme des pluies ne convenant pas pour la forte pluie, l'étude a porté sur la somme des agressivités.

Liaison entre a et l'agressivité des pluies

La méthode utilisée est identique à celle développée dans le paragraphe précédent. La disposition des valeurs de a , observées en fonction des valeurs moyennes de la somme des agressivités (ΣR_w) depuis le dernier travail du sol (pour tous les traitements), a une forme en S. Il est possible d'expliquer l'évolution du phénomène de façon identique pour tous les traitements, sans être obligé d'intégrer un autre paramètre. Le coefficient a peut être appelé coefficient d'état de surface. Il représente l'évolution de l'état de surface du sol et dépend essentiellement de l'agressivité des pluies.

L'évolution de a en fonction de ΣR_w peut être modélisée de deux façons différentes :

- soit par trois fractions de droites ;
 - soit par une courbe en S qui est asymptotique aux droites de valeurs $a = 0,2$ et $a = 0,9$;
- dans ce dernier cas la fonction utilisée est de type tangente hyperbolique.

Sur la figure 5, on constate que a passe de 0,2 (sol travaillé) à 0,5 quand la somme de l'agressivité des pluies dépasse 50, et la valeur de 0,9 est atteinte quand ΣR_w est supérieur à 120. Au cours de la saison des pluies 1990 à Saria, la pluie la plus agressive a pour valeur de $R_w = 83$, et la somme des agressivités pour la campagne a été de 250. La moyenne annuelle à Saria de R_w est de 419 [9].

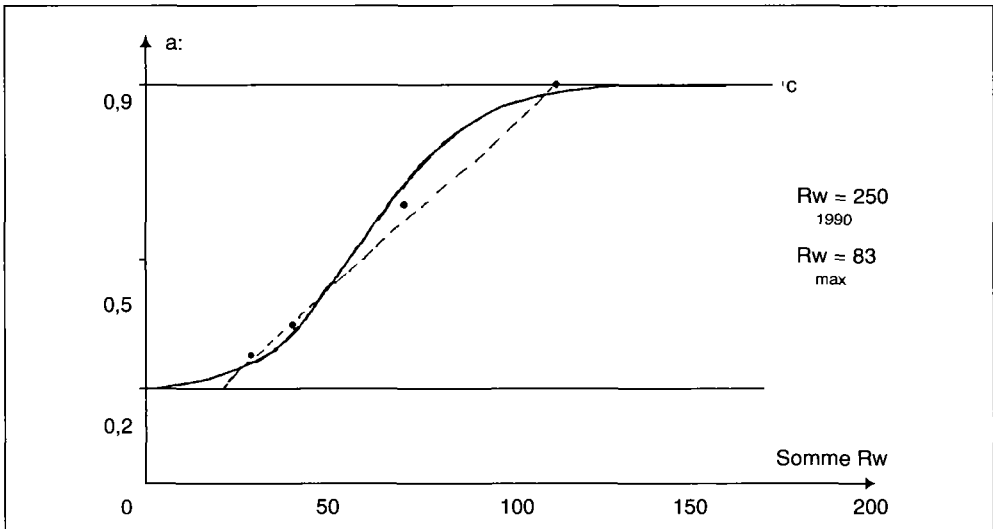


Figure 5. Relation entre le coefficient d'état de surface (a) selon la somme des agressivités des pluies depuis le dernier travail du sol.

Conclusion

Il est possible, en connaissant les données pluviométriques locales, de fournir une estimation de la lame d'eau ruisselée, qui soit utilisable dans les modèles de bilan hydrique. Au Burkina Faso, il est nécessaire de connaître la pluviosité et l'intensité en trente minutes.

Pour limiter le ruissellement et améliorer le stockage de l'eau, un labour à la charrue est nécessaire mais il doit être impérativement suivi de sarclages. Ces techniques permettent d'éviter un effondrement trop rapide de la rugosité ; elles favorisent entre autres la "déten-tion superficielle".

Les binages fréquents constituent la meilleure technique susceptible de limiter la dégradation de l'état de surface en maintenant le coefficient *a* à une valeur limitée. La date des binages doit alors être déterminée par l'évolution de la somme des agressivités des pluies depuis le dernier travail du sol.

L'agressivité des pluies est la principale cause du ruissellement, à travers son influence sur les états de surface ; aussi les méthodes de protection de la surface du sol sont-elles également intéressantes (paillage, cultures associées, etc.).

Les recherches à mener dans le futur doivent permettre de mieux cerner l'influence de la rugosité sur le ruissellement, en essayant d'éliminer si possible le facteur état de surface qui évolue parallèlement à la rugosité.

Références

1. Guillobez S. (1991). Etude des intensités et de l'agressivité des pluies à la station de Saria. INERA, station de Kamboinsé, ESFIMA/CES, 12 p.
2. Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T. (1985). The EPIC Model.
3. Casenave A., Valentin V. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. ORSTOM (Paris), CEE.
4. Galabert J., Millogo E. (1973). Indice d'érosion par la pluie en Haute-Volta. Ministère Agriculture, CTFT.
5. Kuipers H. (1957). A reliefmeter for soil cultivation. *Studies Neth. J Agric Sci*, 5 : 255-62.
6. Collinet J., Valentin C. (1979). Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah ORSTOM, sér Pédol*, Vol XVII, n° 4 : 238-328.
7. Lamachère J.M. (1991). Aptitude du ruissellement et de l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In : *Soil water balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of the Niamey Workshop*. Feb, 1991, IAHS, n° 199 : 109-19.
8. Boiffin J. (1983). Les comportements physiques du sol. In : *Fertilité et systèmes de production*. INRA : 137-67.
9. Guillobez S. (1991). Réflexions théoriques sur les modalités du ruissellement et de l'érosion. Bases d'un contrôle. Applications à la détermination des écarts entre dispositifs anti-érosifs. *Bois et Forêts des tropiques*, n° 226, 4^e trimestre 1990 : 37-47.

28

Fonctionnement hydrique des sols ferrugineux du nord du Cameroun. Tentatives d'amélioration de leur régime hydrique

G. VALLEE¹, L. SEINY BOUKAR², M. M'BIANDOUN³, J.P. OLINA¹

1. CIRAD-CA, Institut de Recherche agronomique, BP 1146, station de Garoua, Cameroun

2. Institut de Recherche agronomique, BP 33, centre de Maroua, Cameroun

3. Institut de Recherche agronomique, BP 145, centre de Garoua, Cameroun

Introduction

L'agriculture du nord du Cameroun est soumise à deux problématiques distinctes : édaphoclimatique et agronomique.

La grande variabilité spatiale et temporelle de la pluie dans le nord du Cameroun constitue le principal facteur climatique qui influe sur la variation des rendements agricoles. La diversité régionale observée est fondée essentiellement sur deux caractéristiques des précipitations : le volume pluviométrique annuel et la durée de la saison des pluies. De façon générale, ces deux paramètres augmentent en allant vers le sud. Les valeurs

moyennes qui permettent de définir généralement des grandes zones de pluviométrie sont : l'isohyète 650 mm au-dessus de laquelle s'étend la zone sahélienne et l'isohyète 1 000 mm au sud de laquelle se trouve la zone soudano-guinéenne. Entre ces deux repères, on a une zone de transition dite soudano-sahélienne.

Ces limites géographiques ne sont pas statiques. Elles varient avec la dérive climatique qui s'est accentuée depuis ces dernières années.

Cependant, l'agressivité des précipitations devient préoccupante dès lors que les sols concernés sont fragiles, ce qui est le cas des sols ferrugineux tropicaux, objets de cette étude. Cela se traduit par les phénomènes d'érosion bien connus : perte d'éléments fins et de matière organique en surface. Dans ces sols de fertilité originelle déjà médiocre, cet appauvrissement accélère la formation des croûtes de battance et accentue le dysfonctionnement hydrique.

Sur le plan agronomique, la situation est tout aussi préoccupante car les pratiques paysannes traditionnelles (culture extensive avec exportation des résidus, élevage nomade, droit foncier inexistant) sont de nature à accroître les processus de dégradation du milieu. En effet, la terre n'appartenant pas de façon formelle à l'agriculteur, les techniques que celui-ci met en œuvre ne visent que le gain immédiat, sans souci de préservation du capital sol. Par ailleurs, les éleveurs s'autorisant le droit de bénéficier des résidus de récolte aux champs, il n'y a aucune restitution organique de la biomasse végétale aérienne. Traditionnellement la fertilité était maintenue par la mise en jachère des terres cultivées après quelques années d'exploitation. Or, avec une pression démographique qui s'accroît rapidement et une sédentarisation progressive des agriculteurs et des éleveurs, on observe, dans certaines zones, une diminution voire une disparition du temps de jachère et, corrélativement, une baisse de la productivité des sols.

Face à cette situation, il apparaît nécessaire pour la recherche d'expérimenter de nouveaux systèmes de culture susceptibles de maintenir la productivité des sols, tout en les protégeant contre l'érosion.

Dans cette optique, cette étude présente quelques aspects d'une approche globale qui intègre les composantes climat-sol-techniques culturelles en vue d'améliorer le fonctionnement hydrique des sols et l'alimentation en eau des cultures.

Matériels et méthodes

Matériels

Réseau agrométéorologique

Pour la collecte des données climatologiques du nord et de l'extrême nord, on a disposé de :

- *Résumé agrométéorologique* de la Direction météorologique nationale (7 postes) : pluviométrie, ETP, évaporation Bac classe A.
- stations météo ASECNA de Garoua et Maroua : pluviométrie, ETP.
- postes pluviométriques Sodecoton (36 postes) : pluviométrie.
- IRA - Réseau de 7 stations automatiques CIMEL à 6 voies : pluviométrie, température, humidité, vent, rayonnement global, humectation.
- pluviométrie sur antennes du réseau IRA (12 postes).

Sols

Trois types de sols ferrugineux tropicaux sont étudiés :

- indurés sur gneiss à Maroua (10° latitude nord, 750 mm de pluie) ;
- peu lessivés sur sable dunaire (Maroua, Mokyo) ;
- différenciés sur grès quartzeux à Garoua (9° latitude nord, 950 mm).

Plante test

Céréale maïs CMS-8704 de 105 jours à Garoua.

Méthodes

Analyse climatologique

- contrôles des données par la méthode du double cumul ;
- analyse fréquentielle de la pluviométrie sur une longue période (1952-1989) ;
- analyse de l'agressivité de la pluviométrie.

Pour le traitement des données, ont été utilisés les logiciels : ANFPLUIE, SURFER, BHYZON, HAVARD GRAPHICS.

Dispositifs d'étude

- Amélioration de l'infiltration par paillage et amendements gypseux :

Il s'agit de mettre en évidence, sur des sols stérilisés (afin d'isoler le facteur végétation), l'efficacité de deux pratiques de conservation de l'eau : l'une chimique (amendement de gypse), l'autre physique (paillage).

Les deux sites (Mokyo et Mouda) ont été équipés chacun de 9 parcelles élémentaires (1,25 m²) avec un exutoire d'une capacité de 150 l, soit 3 parcelles par traitement (témoin, gypse et paillage) disposées de manière aléatoire. Avant les pluies et l'application des traitements, le sol est scarifié en surface (afin de briser la croûte de battance qui s'est constituée la saison précédente), puis stérilisé.

En première année, le gypse est appliqué en surface sous forme de phosphogypse poudreux à une dose de 5 t/ha, le mulch constitué de paille de graminées sèches est étalé à la surface du sol, les tiges orientées dans le sens de la pente. Cette paille est traitée pour éviter sa destruction par les termites, la quantité à appliquer est de 20 t/ha.

En deuxième année, le gypse (5 t/ha) est associé à un conditionneur de sol, le polyacrylamide (PAM), appliqué sous forme de pulvérisation liquide sur l'épandage de gypse qu'il fixe à la surface du sol. La quantité de paille est ramenée à 5 t/ha.

- Etude du comportement du sol dans différents systèmes de culture (Garoua, 1990-1993) :

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier la productivité d'un sol ferrugineux tropical en relation avec différents systèmes de culture et leur comportement hydrique.

Le dispositif d'étude est implanté sur 4 bandes de 25 mètres de large et de 200 mètres de longueur du périmètre anti-érosif de Sanguéré-Djalingo qui couvre une superficie de 55 ha, aménagés en courbes de niveaux lissées avec fossés pour la diversion des eaux de ruisselle-

ment [1]. Trois systèmes de culture sont mis en comparaison avec deux répétitions en parcelle de 1 250 m², sur une rotation maïs-cotonnier, les deux cultures étant conduites chaque année :

- système vulgarisé labour en culture attelée avec exportation des résidus de récolte du maïs et brûlis des tiges du cotonnier ;
- système amélioré : système vulgarisé + apport de 5 t/ha de fumier tous les deux ans ;
- système de culture en no-tillage avec semis direct : à partir de la deuxième année, pas de labour, les résidus de cultures sont laissés sur le sol, comme mulch, et l'on plante une plante de couverture en intercalaire au 30^e jour (*Calopogonium muconoides*) afin d'accroître le volume de paille pour couvrir le sol.

En 1991, sur la culture de maïs, on a implanté sur chacun des traitements deux tubes pour la mesure neutronique de l'humidité du sol et une parcelle d'érosion pour mesurer le ruissellement. Les mesures suivantes sont réalisées :

- bilan d'eau du sol : stock d'eau total et ruissellement comparé ;
- profils racinaires ;
- composantes du rendement ;
- production de biomasse.

Dans cette première étude, on compare seulement les traitements système vulgarisé (labour) et système en no-tillage.

Résultats et discussions

Influence du climat

Le climat, à travers la pluviométrie, joue le rôle principal pour la production agricole. Trois paramètres importants on déjà été étudiés.

La pluviométrie

L'analyse des données pluviométriques pour les périodes 1952-1989 et 1970-1989 montre que les totaux pluviométriques accusent des variations d'autant plus importantes que l'on va du nord vers le sud, l'isohyète 1 200 mm a même disparu dans la seconde série (figure 1), ce qui traduit une tendance à la sécheresse [2]. Sur le plan agronomique, on sait que la nature erratique des précipitations enlève toute signification réelle aux moyennes arithmétiques d'une pluviosité annuelle donnée, et il est donc préférable d'en connaître la fréquence d'enregistrement. On constate que pour Garoua, par exemple, la valeur moyenne de la période considérée, à savoir 951 mm, demeure supérieure à 883 mm, quantité que l'on peut espérer atteindre cinq années sur dix (tableau I). En ce qui concerne le coefficient K3, ou coefficient d'irrégularité interannuelle de la pluviométrie, rapport entre les hauteurs des précipitations annuelles de l'année décennale humide et de l'année décennale sèche, on constate que sa valeur croît régulièrement du sud vers le nord en sens inverse de la pluviométrie annuelle durant la période 1976-1985, mais ce rapport est inversé durant la période 1981-1989 (tableau II), ce qui montre que la pluviométrie pour cette période est plus irrégulière à Garoua qu'à Maroua.

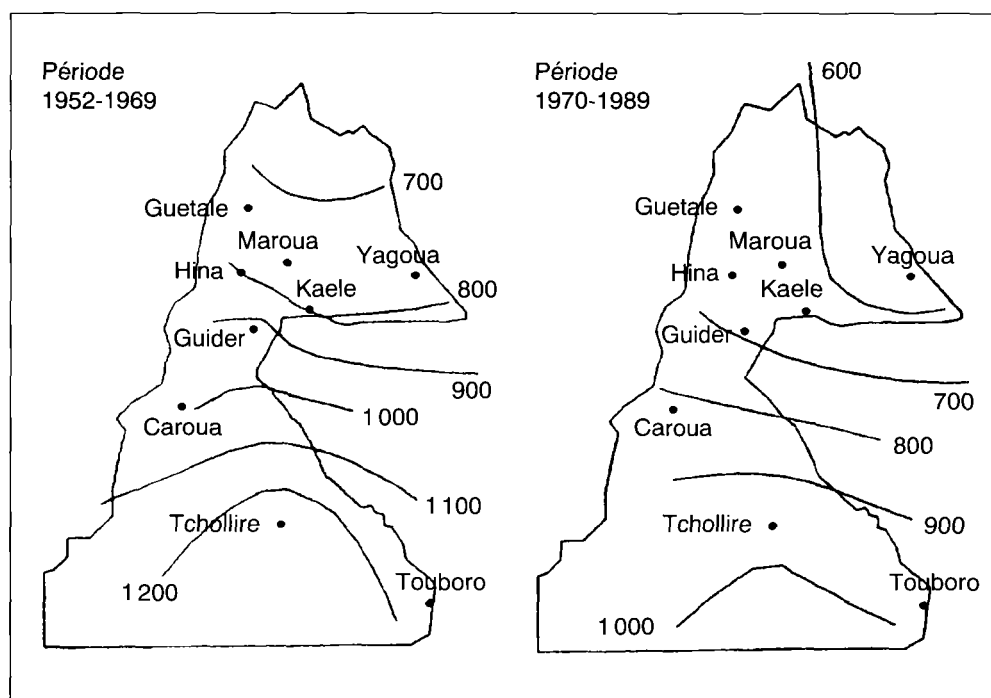


Figure 1. Totaux pluviométriques annuels (mm), fréquence 8-10 ans.

Tableau I. Variabilité fréquentielle de la pluviométrie annuelle au cours de la période 1970-1989 pour 4 stations du Nord-Cameroun (loi normale).

Probabilité Pluies > X	Seuil en mm			
	Maroua	Garoua	Toubo	Kaelé
0,8	631	820	987	622
0,5	675	883	1 054	655
0,2	780	1 014	1 247	781
Moyenne de la période	752	951	1 180	666

Tableau II. Coefficient K3 d'irrégularité interannuelle de la pluviométrie.

	Sanguéré		Maroua	
	1976-1985	1981-1989	1976-1985	1981-1989
K3	1,34	2,00	1,90	1,47

ETP

Le tracé des ETP (Garoua et Maroua, figures 2 et 3) montre que pour Maroua, l'ETP demeure supérieure à la pluviométrie jusque vers la fin de la première décade du mois de juin. Elle repasse au-dessus de la pluviométrie avant la fin du mois de septembre.

Pour Garoua, en avril la pluviométrie est légèrement supérieure à l'ETP avant d'être à nouveau inférieure en mai.

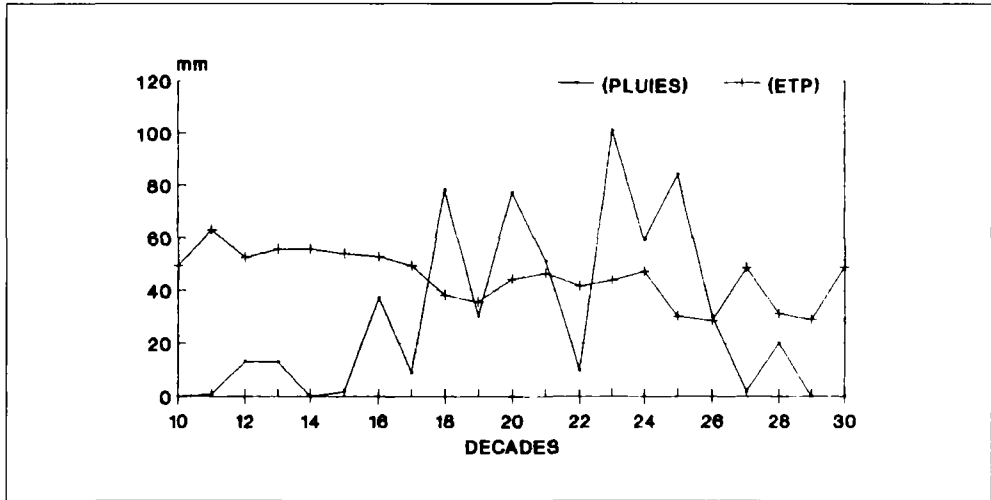


Figure 2. Pluviométrie et ETP décadaires à Maroua (année 1990).

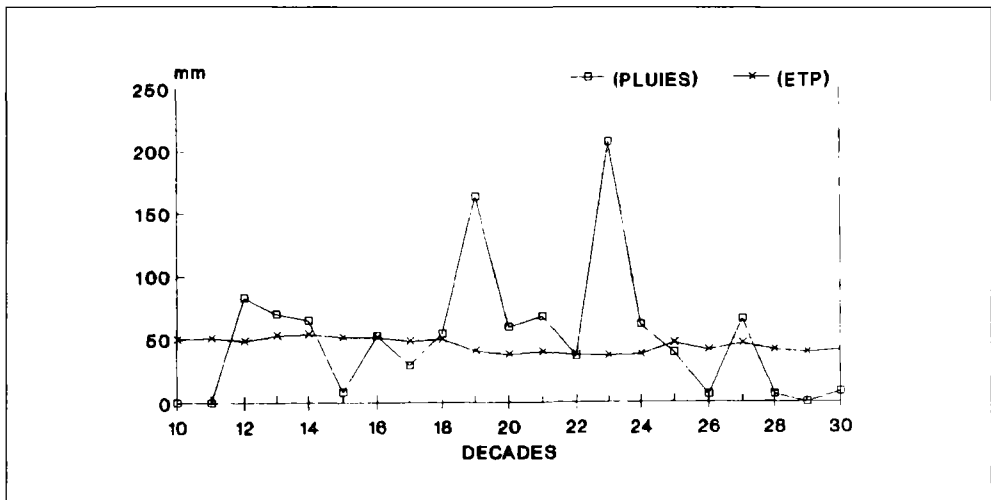


Figure 3. Pluviométrie et ETP décadaires à Garoua (année 1990).

Agressivité des pluies

Nous avons retenu les classes d'intensité suivantes proposées par Casenave et Valentin [3] :

- forte à très forte : 40 à 100 mm/h, avec paroxysme à 150-200 mm/h ou plus ;
- moyenne : 10 à 30 mm/h ;
- faible : <10 mm/h.

Les figures 4 et 5 donnent un exemple des différents traitements effectués sur les intensités des pluies sur deux sites : Sanguéré et Tchatibali près de Maroua.

Il ressort de ces graphiques les informations suivantes :

- les intensités des pluies varient d'un mois à l'autre : on observe de très fortes valeurs en mai, à l'époque où le sol est nu (figure 4) ;

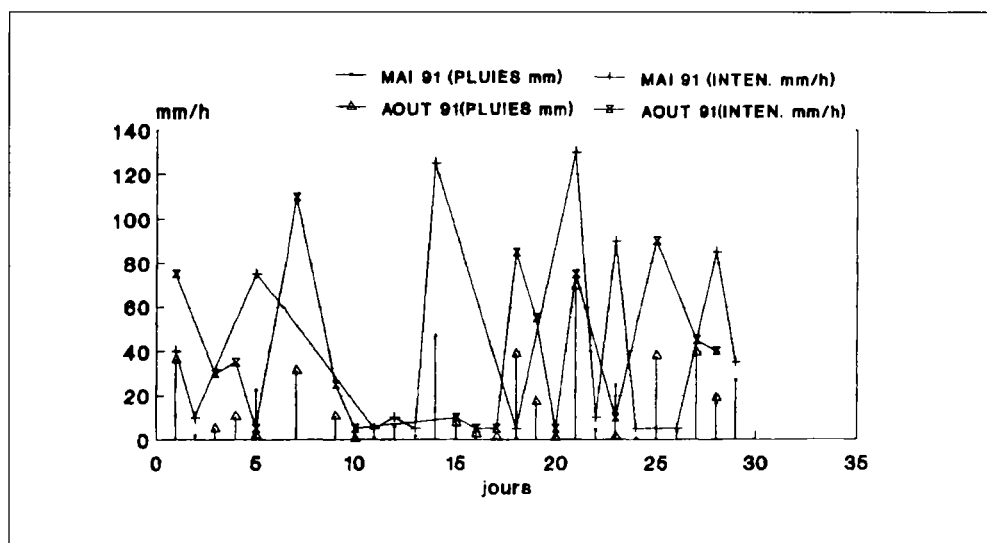


Figure 4. Agressivité des pluies : comparaison entre deux mois (mai et août 1991).

– l'intensité augmente avec le volume pluviométrique : on n'a pas de faibles pluies (quantité) avec des intensités élevées, et pas de grosses pluies (quantité) avec une faible intensité (figure 5) ;

– l'intensité varie avec le site ;

– 50 % des pluies de ces deux sites ont des intensités supérieures ou égales à 40 mm/h. Ce sont des pluies à forte intensité, donc agressives. On peut de ce fait imaginer leur incidence sur des sols ferrugineux tropicaux, réputés fragiles, en ce qui concerne le ruissellement et l'érosion.

La caractérisation de ces différents paramètres climatiques doit participer à la stratégie globale de la gestion de l'eau et du sol dans cette région.

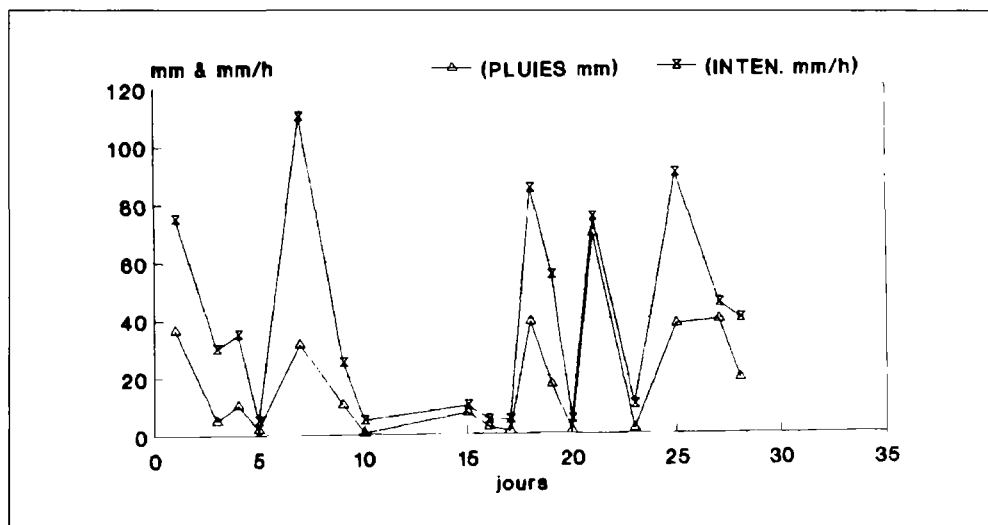


Figure 5. Relation agressivité et hauteur totale des pluies (août 1991).

Caractérisation des sols

Site de Maroua (Mouda et Mokyo)

Les sols de Mouda sont des sols ferrugineux indurés situés sur un plateau qui domine les versants ouest du bassin versant. Le matériau original est un gneiss à filons de quartz. Cependant, l'affleurement par endroit de blocs et dalles de cuirasse très épais laisse supposer qu'il s'agit là de sols très anciens, formés sous un climat plus humide qu'actuellement.

Morphologiquement, les sols ferrugineux de Mouda présentent une couleur d'ensemble rouge vif et une structure peu développée en surface. La texture est à dominance sableuse en surface, avec cependant une présence d'horizon sablo-argileux en profondeur. A la différence de Garoua, le pourcentage de sables fins est jusqu'à 20 cm supérieur à celui des sables grossiers (respectivement 53 % et 32 % pour l'horizon 0-10 cm).

La CEC varie de 6 à 9 méq/100 g, de terre, soit 25-30 méq./100 g de la fraction argileuse qui est à dominance de kaolinite, avec néanmoins 10 à 20 % d'argile smectitique. La matière organique (1,45 % en surface) décroît rapidement en profondeur. Le pH est quasi constant : 5,8 en surface, 5,3 en profondeur. Le cation dominant est le calcium.

Shainberg et Letey [4] expliquent que, pour de tels sols, la faible teneur en argile (particulièrement en surface), la nature de ces argiles (kaolinite) et la faible teneur en matières organiques, les exposent à la battance et à la compaction. Ces sols présentent une pellicule de battance qui est généralement recouverte d'algues sombres. Malgré une rugosité en surface due à la présence de gravillons ferruginisés, de touffes d'herbes et de litière, le ruissellement moyen y est d'environ 20 % ; l'érosion est moyenne. La réserve d'eau utile est faible (73 mm/80 cm et 40 mm/40cm).

Ces sols sont souvent exploités pour des cultures vivrières pluviales (sorgho, arachide, niébé, etc.) et pour des cultures de rente (coton). Lorsqu'ils sont en jachère, la physionomie de la végétation naturelle est celle d'une savane arborée à *Anogeissus leiocarpus*, *Sclerocarya birrea*, *Sterculia setigera* et *Combretum glutinosum* ; ou celle d'une savane arbustive à *Anona senegalensis*, *Piliostigma reticulatum* et *Combretum spp.*

La strate herbacée est dominée par *Loudetia togoensis*, *Sporobolus festivus*, *Spermacoce ruelliae* et *Setaria pumila*.

A Mokyo, la rubéfaction du profil et une texture particulièrement sableuse (80 à 90 % de sable fin) sont les caractéristiques particulièrement frappantes du sol ferrugineux sur sable dunaire. Ces sols profonds (2 m) ont une faible capacité d'échange (3-4 méq./100 g. de terre). Ils sont colonisés par *Guiera senegalensis* et *Cenchrus biflorus* (cram-cram).

Site de Garoua (Djalingo)

Les sols sur lesquels est réalisée l'étude sont des sols ferrugineux tropicaux différenciés dont le matériau originel est du grès quartzeux. Ils ont été étudiés en détail par Brabant et Gavaud [5] qui signalent que leur particularité est d'être profonds. Cependant, on distingue deux unités de paysages selon Bertrand [6] et Godefroy *et al.* [7] :

- le piedmont des buttes, composé de collines dont le sommet est armé par des couches de grès relativement durs et sur lesquels les sols sont peu profonds et en général sableux (sables grossiers dominants) ;

- les versants, entaillés et recouverts par des colluvions qui donnent des sols assez épais (80 cm à 1,50 m) bruns en surface (7,5 YR), plus ou moins rouge en profondeur (5 YR à 2,5 YR). La texture est très sableuse jusqu'à 40 cm avec 65 % de sables grossiers pour 6 % d'argile dans ces 20 premiers centimètres. Au-dessous de 40 cm, la proportion d'argile atteint 24 %, donnant une texture argilo-sableuse. Du point de vue chimique, ils se caractérisent par de très faibles teneurs en matière organique (< 0,4 %), N, P, et K et par des faibles teneurs en Ca, Mg. La CEC est très faible (1,35 méq/100 g. de terre) jusqu'à 40 cm. Le pH est légèrement acide (5,7 en surface).

Les sols sont cultivés depuis environ 25 ans pour les cultures pluviales : cotonnier, sorgho, arachide et plus récemment maïs. La végétation naturelle est une savane arborée à *Anogeissus leiocarpus* et à *Burkea africana*, avec une strate herbacée à dominance *Andropogon gayanus*.

Etude du ruissellement et de l'infiltration à Maroua

Les résultats présentés dans le tableau III donnent les moyennes annuelles des comportements des deux sols suivant les trois traitements. Les enregistrements ont été effectués durant la période du 1^{er} juin au 30 septembre. L'application du gypse la première année a amélioré l'infiltration de l'eau dans les deux sites. L'association du PAM en deuxième année a été également bénéfique, mais c'est surtout le paillage qui a donné les meilleurs résultats : pour les deux années de mesure, le coefficient d'infiltration initial (Ke) est passé de 44,7 % et 55,1 % à 87,3 % et 91,2 % respectivement à Mouda et Mokyo.

L'analyse, année par année, de l'amélioration relative de l'infiltration (tableau IV) montre que pour la première année l'amélioration de Ke par le gypse est négligeable sur

Tableau III. Effet du paillage et des amendements gypseux sur l'infiltrabilité de deux sols stérilisés du Nord-Cameroun durant la saison des pluies (1/6 au 30/9). Mesures sur parcelles de 1,25 m².

Type de sol	Site	Année	Précip. Hp (mm)	Témoin		Gypse (1)		Mulch (2)	
				LR (mm)	Ke (%)	Lr (mm)	Ke (%)	LR (mm)	Ke (%)
Sols ferrugineux	Mouda	1988	593,5	325,1	45,2	252,4	47,5	57,3	90,40
		1989	561,3	313,2	42,2	229,8	59,1	89,0	84,2
		Total	1154,8	638,3	44,7	482,2	58,2	146,3	87,3
	Mokyo	1988	665,0	295,6	55,6	285,7	57,1	62,3	90,6
		1989	520,3	237,0	54,5	184,5	64,6	42,3	91,9
		Total	1185,3	532,6	55,1	470,2	60,3	104,6	91,2

1. 5 T/ha de gypse en 1988 ; 5 T/ha de gypse + 5T/ha de conditionneur de sol en 1989.

2. 20 T/ha en 1988 ; 5 T/ha en 1989.

LR = Lane ruisselée.

Ke = Coefficient d'infiltration.

Tableau IV. Amélioration relative du coefficient d'efficacité de la pluie (Ke) par paillage et amendements gypseux sur deux types de sols stérilisés du Nord-Cameroun.

Type de sol	Site	Année	Précip. HP (mm)	Témoin KeT %	Gypse KeT-keG		Mulch (2) KeM-KeT	
					Ke G %	KeT %	KeM %	KeT %
Sols ferrugineux	Mouda	1988	593,5	45,2	47,5	5,1	90,5	100
		1989	561,3	42,2	59,1	40,0	84,2	99,5
		Total	1154,8	44,7	58,2	30,2	87,3	95,3
	Mokyo	1988	665,0	55,6	57,1	2,7	90,6	62,9
		1989	520,3	54,5	64,6	18,5	91,9	68,6
		Total	1185,3	55,1	60,3	9,4	91,2	65,5

ces deux sites (5 % à Mouda et 2,7 % à Mokyo). L'association avec le PAM est plus bénéfique sur les sols de Mouda plus argileux (Ke = 40 %) que sur ceux de Mokyo (Ke = 18,5 %). Avec le paillage cette amélioration a été presque de 100 % sur les sols de Mouda pendant les deux années et de 63 et 69 % à Mokyo.

Ces valeurs montrent en outre que, sur ce type de sol, une dose de 5 t/ha de paille en deuxième année suffit pour obtenir une efficacité maximale. On note que l'efficacité des différents traitements est moindre sur les sols ferrugineux de Mokyo que sur ceux de Mouda, qui présentent l'infiltration initiale la plus faible.

Ces mesures se sont déroulées dans des conditions abiotiques en milieu stérilisé reflétant des situations d'exploitations agricoles intensives avec utilisation d'herbicides et pesticides.

La stérilisation a en outre pour but d'inhiber l'influence de la végétation afin de mieux dégager l'efficacité des différentes pratiques ; cependant, du fait de l'inhibition également de la mésofaune ainsi obtenue, les résultats sont à utiliser avec précaution, mais ils expliquent bien les premières observations faites à Garoua.

Premiers résultats obtenus à Garoua

Les résultats présentés ne représentent que des résultats partiels d'une expérimentation pluriannuelle dont les dispositifs de mesure ont été installés au cours de la campagne 1991.

Le ruissellement

Le tableau V concerne les données recueillies durant la période de la saison des pluies allant du 4 août au 6 octobre, date de la fin des pluies. La comparaison du traitement vulgarisé avec le traitement no-tillage avec couverture du sol montre que, pour des événements

Tableau V. Effet du mulch sur le ruissellement (Garoua-Djalingo).

Date des pluies	Traitement	Pluviométrie (mm)	Intensité des pluies (mm/h)	Coefficient de ruissellement (%)
4/8	1	12	35	1,91
	3			2,74
7/8	1	27	110	9,11
	3			2,88
9/8	1	8	25	0,55
	3			1,95
16/8	1	6	5	0,85
	3			0,76
18/8	1	38	85	3,05
	3			1,57
20/8	1	14	5	1,77
	3			0,71
21/8	1	61	75	24,2
	3			9,02
25/8	1	30	90	2,40
	3			1,52
27/8	1	38	45	2,50
	3			2,89
3/9	1	29	45	0,51
	3			0,74
4/9	1	36	75	1,30
	3			0,52
11/9	1	11	65	2,31
	3			1,06
12/9	1	12	60	1,26
	3			0,41
16/9	1	25	100	0,60
	3			0,60
20/9	1	28	135	14,55
	3			1,16
3/10	1	13	65	2,59
	3			0,07
6/10	1	11	25	0
	3			0

de faible intensité, il n'y a pas de différence de ruissellement. En revanche, pour des précipitations importantes (> 50 mm) ou pour des précipitations moyennes (20 à 30 mm) survenant sur un sol déjà partiellement saturé, on observe des différences importantes de coefficient de ruissellement (K_r) pouvant aller de 3 à 14 fois plus sur le sol labouré. Ces résultats correspondent d'ailleurs à des pluies de très forte intensité. En 1992, on complétera ces observations par des mesures des éléments en suspension dans l'eau ruisselée.

Stock d'eau du sol

La comparaison des stocks d'eau en pleine saison des pluies (2-3 août, le maïs étant au 65^e jour) montre que, si le stock d'eau est identique sur le témoin et sur le mulch jusqu'à 40 cm de profondeur (= 50 mm), il augmente ensuite de manière significative avec le mulch puisque l'on a sur une moyenne de quatre mesures (figure 6) :

- à 80 cm pour le témoin 115 mm, pour le mulch 130 mm ;
- à 120 cm pour le témoin 181 mm, pour le mulch 226 mm.

Sur 120 cm de profil on aurait donc 50 mm de stock d'eau en plus sur le mulch.

Lorsqu'on sait que le mulch sur le maïs était constitué des tiges de cotonnier de la campagne précédente avec les pailles des adventices qui avaient poussé avant le semis et

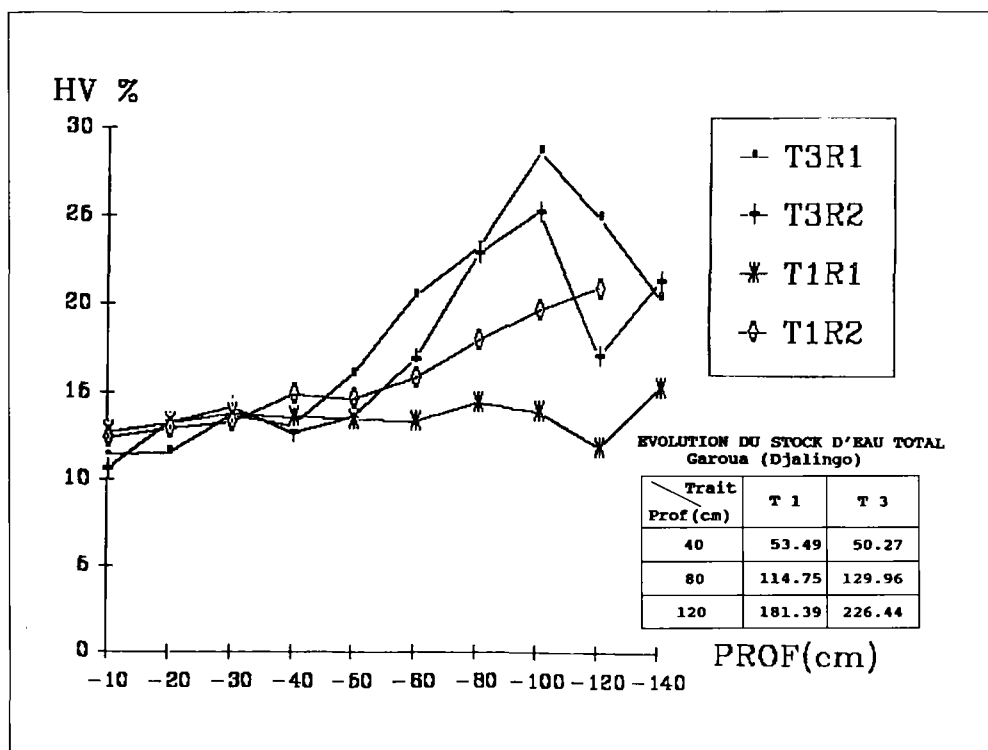


Figure 6. Profil hydrique d'un sol ferrugineux sur grès (Garoua).

détruites à l'herbicide (Paraquat), on voit donc le rôle important que le paillage peut jouer sur l'infiltration dans ce type de sol, et qui confirme les résultats obtenus à Maroua. Les profils de sol étant relativement identiques (les traitements sont sur une même bande et donc à un même niveau de toposéquence) les différences de stock d'eau observées sont imputables aux états de surface (ruissellement et infiltration).

On peut conclure sur cet aspect que, malgré un horizon superficiel très sableux, ces sols sont susceptibles d'avoir une RU satisfaisante, tout le problème revient donc à un accès par les plantes à cette réserve en eau.

Enracinement du maïs

Les observations sur l'enracinement ont été effectuées par la méthode des grilles verticales [8] avec deux observations par traitement et par répétition.

Les premiers résultats montrent qu'au 30^e jour, l'enracinement est plus profond sur le labour (60 cm) que sur le mulch (40 cm), avec une colonisation totale de l'interligne pour le labour (80 cm) mais légèrement inférieure sur le mulch (60 cm), pour une différence de hauteur de pied d'environ 50 cm en faveur du traitement labour. Sur les deux traitements, on constate une diminution des racines entre 15 et 20 cm de profondeur, ce qui correspond à un horizon A/B dit de comportement (argile démasquée, libérée) qui jouerait le rôle de semelle de labour [6].

Au 45^e jour, sur le témoin labour, l'enracinement atteint 90 cm, encore supérieur à la profondeur sur le mulch, 80 cm environ, qui aurait compensé une partie du retard observé au 30^e jour. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par Chopart *et al.* au Sénégal [9].

Productivité

Le dispositif ayant été implanté en 1990, tous les traitements avaient été labourés et l'on avait observé un rendement maïs assez semblable entre les deux traitements comparés ici (tableau VI), ce qui montrait assez bien que l'on était dans une zone relativement homogène, même si on peut observer une hétérogénéité intra-parcelle non négligeable.

En 1991, apparaît donc pour la première fois le traitement mulch avec semis direct (canne planteuse brésilienne) sans travail du sol. Les rendements en grains et matière sèche observés montrent que les résultats obtenus sur le mulch sont inférieurs à ceux obtenus sur le labour, ce qui est en accord avec les différences d'enracinement observées. En effet, le maïs s'est développé plus lentement sur le mulch que sur le labour. Il faut toutefois noter que les rendements observés sont élevés et que l'on atteint, en première année, 4 tonnes sur le mulch.

Tableau VI. Productivité du maïs.

Traitement	1990 (kg/ha)		1991 (kg/ha)	
	Rendement	Matière sèche	Rendement	Matière sèche
1	2 901	3 726	4 882	4 290
3	2 824	4 244	4 168	3 223

Discussion

Pour tenter d'apporter une solution aux problèmes de ruissellement et d'érosion, qui commencent à prendre des proportions jugées très graves sur les sols ferrugineux tropicaux mis en culture, il sera nécessaire de définir de nouvelles techniques culturales susceptibles de diminuer le ruissellement, et améliorant par conséquent l'infiltration des eaux de pluie.

Les mesures effectuées à Maroua de façon systématique sont confirmées par les premiers résultats obtenus en grandes parcelles à Garoua sur un dispositif anti-érosif. Le paillage accroît de façon importante l'infiltration des eaux de pluie par rapport à un sol labouré, ce qui peut être important lorsque l'on sait que cette zone comporte des risques climatiques fréquents, se traduisant le plus souvent par des stress hydriques. Cependant, dans le cas du paillage ou mulch en semis direct, on observe, du moins en début d'expérimentation, un tassement du sol dans les 20 premiers centimètres, qui ralentit la croissance des plants ; cela se vérifie au niveau des racines. Ainsi on a pu observer au moment de la sécheresse de juin (plus de 20 jours sans pluie) que le maïs souffrait plus de sécheresse au 30^e jour sur le mulch que sur le labour, ce qui est à rapprocher d'un enracinement moins profond de 20 cm observé à cette époque sur le mulch.

Inversement, on a une meilleure infiltration sur le mulch que sur le labour, ce qui tendrait à montrer que le maïs sur mulch n'a pas pu exploiter toute l'eau disponible dans le profil faute d'un enracinement suffisant. Ces premières observations, bien que partielles, peuvent d'ores et déjà indiquer de nouvelles pistes de recherches que l'on devrait expérimenter dès que possible pour répondre aux questions suivantes :

- l'enracinement sur le mulch (paillage) sans travail du sol pourra-t-il s'améliorer progressivement grâce à une modification de la structure de l'horizon superficiel, que l'on espère par l'apport de matière organique et par l'augmentation importante de l'activité des vers de terre que l'on peut en attendre ?
- l'enracinement sur le mulch pourrait-il être amélioré lors de la phase d'installation (environ 4 à 5 ans) par un passage de sous-soleuse, et à quelle fréquence ?
- quel sera l'effet de la plante de couverture que l'on veut implanter en dérobé pour augmenter la masse de paille en couverture morte sur l'enracinement de la culture ?
- existe-t-il des variétés de maïs adaptées aux conditions de Garoua susceptibles de développer un enracinement plus important que d'autres ? D'une manière générale, l'enracinement ne devrait-il pas être un facteur de sélection très important, et donc objet d'une amélioration génétique pour les zones à risque climatique comme cela a été fait pour le riz pluvial ?

Conclusion

Alors qu'à certaines époques les cultures souffrent de stress hydriques, dus à l'irrégularité des pluies, à d'autres, une grande partie de l'eau de pluie est perdue par le ruissellement qui, sur des sols ferrugineux dégradés par des systèmes de culture extensifs, se traduit par une érosion très préoccupante.

Des techniques culturales, comme le semis direct avec couverture morte ou mulch, sont susceptibles d'apporter des solutions tout en permettant un rendement satisfaisant, même si celui-ci est inférieur au labour, notamment durant la phase d'installation, à cause d'un enracinement moins performant, surtout sur céréales (maïs). Ce problème pourrait être résolu, soit par la voie génétique, si le critère vigueur de l'enracinement était retenu, soit par un travail minimum du sol qui serait associé à la couverture morte, soit encore par une association avec une plante à enracinement puissant comme le *Cajanus cajan*, la crotalaire, ou des arbres comme *Cassia ciamea* au sein de systèmes de culture en couloirs (*alley cropping*), ces deux dernières techniques pouvant rapidement être mises en expérimentation.

Cependant, il semble, si cette technique confirme ses résultats, que le problème le plus important que l'on aura à résoudre pour faire passer cette technique en milieu paysan soit d'ordre socioculturel. En effet, les pratiques actuelles du pâturage non contrôlé et des feux de brousse font qu'il est utopique d'espérer une couverture du sol suffisante. Or, les premiers résultats obtenus ici vont dans le même sens que ceux obtenus dans d'autres pays — Réunion, Côte-d'Ivoire, Brésil, Nigeria — qui montrent l'efficacité des techniques du semis direct dans une couverture morte (dont la masse est augmentée par une plante de couverture cultivée soit en dérobé, soit en avant-culture) dans la lutte contre l'érosion et la dégradation du sol.

La vraie question est de savoir comment on pourra faire évoluer les systèmes traditionnels assez rapidement pour qu'ils puissent intégrer les notions de maintien du capital sol, restauration et entretien de la fertilité, pâturage contrôlé, contrôle des feux de brousse, notions dont on voit mal comment on pourrait se passer si on veut atteindre l'objectif d'une agriculture stable, mais qui implique sans aucun doute un profond changement des mentalités, notamment de ceux qui gèrent le droit à la terre.

Références

1. Harmand J.M., Vallée G. (1990). Aménagements anti-érosifs et gestion des terroirs pilotes en zone soudano-guinéenne au Nord-Cameroun. MESIRES/IRA, Yaoundé : 12 p.
2. M'Biandoun M. (1990). Zonage agroclimatique du risque de sécheresse régional. Le cas du Nord-Cameroun. CNEARC-ESAT, Mémoire d'ingénieur en agronomie tropicale : 36 p. et annexes.
3. Casenave A., Valentin C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. ORSTOM Paris, collection Didactiques : 229 p.
4. Shainberg I., Letey J. (1984). Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* : 52 : 57 p.
5. Brabant P., Gavaud M. (1985). Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. ORSTOM Paris, MESRES et IRA Cameroun. Collection Notice explicative, n° 103 : 285 p. et cartes.
6. Bertrand R. (1990). Rapport de mission au Nord-Cameroun. Doc. CIRAD/IRAT : 7 p.
7. Godefroy J., Maysonave V. (1990). Etude agro-pédologique du verger d'agrumes de Djalingo-Sanguéré près de Garoua (Nord-Cameroun). CIRAD/IRFA Montpellier : 6 p.

8. Chopart J.L. (1989). Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en œuvre dans le projet de recherches R3S PF2 (Amélioration de l'alimentation hydrique par les techniques culturales) Note technique - Recommandations. CILSS R3S CORAF/IDESSA : 16 p.
9. Chopart J.L., Nicou R., Vachaud G. Le travail du sol et le mulch pailleux ; influence comparées sur l'économie de l'eau dans le système arachide-mil au Sénégal. Tiré à part, Bulletin IAEA-SM-235/22 : 200-11.

SESSION VI

Risques économiques et climatiques aux échelles régionales et du système de production

Animateur : J.M. Boussard (INRA, France)

Rapporteur : A. Kéré

29

Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision précoce des rendements en mil en zone sahélienne

B. CORTIER

AGRHYMET/ENM, BP 11011, Niamey, Niger

Introduction

Les connaissances acquises sur l'interdépendance entre la croissance du peuplement végétal et les conditions de milieu et du climat ont abouti à l'élaboration de modèles déterministes formulant de façon mathématique les relations entre ces paramètres. Les modèles numériques de bilan hydrique sur sol cultivé ont connu durant la dernière décennie un développement considérable, autorisant maintenant leur utilisation pour suivre le comportement du végétal lié à sa consommation en eau.

Le modèle DHC (diagnostic hydrique des cultures) [1], développé en étroite collaboration entre l'IRAT (Institut de recherche en agronomie tropicale et des cultures vivrières, à Montpellier) et le centre AGRHYMET (Centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle, à Niamey, Niger) [2] sur la base d'une

approche déterministe et fonctionnelle, fournit une bonne estimation du comportement moyen de la culture à l'échelle de la parcelle.

Sur cette base, un dispositif de suivi et d'observation des cultures en milieu paysan a été mis en place (programme ESPACE) [3-6] dans les différents pays du CILSS, en collaboration avec les partenaires des recherches africaines concernées, pour proposer des relations liant le régime hydrique au rendement final.

Dans les pays de la zone sahélienne et soudano-sahélienne, où la consommation en eau de la culture est souvent limitante (pluies déficientes, faible fertilité des sols, dégradation du milieu), les rendements sont très liés au régime hydrique. Il est alors possible, connaissant la pluviosité de l'année jusqu'à la date de prévision et les probabilités de pluies à venir jusqu'à la récolte, de prévoir avant la fin de la campagne agricole les niveaux de rendements céréaliers espérés. L'intérêt d'avoir accès à cette information est de taille, notamment pour les décideurs et responsables en matière de sécurité alimentaire et d'aide d'urgence, qui doivent prévoir très rapidement la quantité d'aide et l'endroit où l'acheminer.

Le produit principal repose sur la cartographie des rendements moyens prévus en mil et des zones déficitaires ou excédentaires correspondantes à partir de la fin du mois d'août.

Méthode

La méthode repose sur le calcul des termes du bilan hydrique sur 200 sites pluviométriques répartis sur l'ensemble de la zone CILSS continentale (Sénégal, Mauritanie, Gambie, Guinée-Bissau, Mali, Burkina, Niger et Tchad), dont les données nécessaires pour le calcul sont disponibles en cours de campagne.

La modélisation du bilan hydrique ne sera pas détaillée (voir documentation interne IRAT et manuel de présentation et d'utilisation du DHC) ; seule la méthode de prévision des rendements développée en considérant les hypothèses énoncées ci-après sera abordée.

Hypothèse de base

La première hypothèse considère que la variabilité intra-site n'est pas trop forte, et que les valeurs des paramètres utilisés sont représentatives du comportement moyen de la parcelle. Les résultats de la simulation fournissent alors une bonne estimation du comportement moyen de la culture [7].

La seconde hypothèse considère que les paramètres moyens représentatifs de chaque site évoluent de façon continue dans l'espace et que le variogramme des variables régionalisées est linéaire. Cette hypothèse permet d'utiliser la méthode de krigage pour spatialiser les résultats obtenus [8].

Paramètres d'entrée du modèle [9]

Les principaux paramètres d'entrée du modèle sont :

- la pluviométrie pendataire (PI),

- la réserve utile maximale (RU),
- la date de semis (Datsem),
- la longueur de cycle de la culture (Longcycl),
- les coefficients culturaux (Kc),
- la demande évaporatrice pendataire (ETP).

La pluviosité pendataire mesurée sur les sites pluviométriques constitue 200 spectres pluviométriques rentrant dans le modèle [10]. L'impossibilité d'avoir accès à un réseau de sites plus dense en temps réel ne permettra pas de pouvoir décrire finement les champs de rendements résultants. L'utilisation après validation de champs pluviométriques issus de l'analyse des données du satellite Météosat permettrait d'affiner sensiblement la précision spatiale des indicateurs calculés.

La réserve utile maximale est un paramètre sensible vis-à-vis de la consommation en eau de la culture calculée (l'ETR cumulée est une fonction monotone croissante de la RU). Il est donc important de bien l'estimer pour le site considéré.

Actuellement, les réserves utiles rentrées dans le modèle sont les valeurs couramment admises et utilisées pour les sites pluviométriques considérés.

La date de semis est calculée sur des critères agrométéorologiques intégrant les pratiques culturales des paysans. Pour le calcul des rendements espérés [11], deux dates de semis sont retenues :

- la première date de semis réussi en humide. Elle correspond à la date à partir de laquelle le stock d'eau dans le sol est suffisamment important (20 mm) pour autoriser une bonne germination des graines semées. La bonne levée est garantie en ne retenant que la date permettant d'avoir durant les 5 premières pentades après la germination un indice de satisfaction des besoins en eau cumulés supérieur à 50 % ;

- la date de semis optimale. Elle correspond à la date de semis donnant le meilleur rendement calculé entre la première date de semis réussi en humide et la date de semis au plus tard.

Les longueurs de cycle retenues sont :

- 90 jours pour les variétés hatives ;
- 120 jours pour les variétés tardives.

Les coefficients culturaux pendataires sont calculés par une méthode de régionalisation intégrant la latitude du site pluviométrique. Cette approche a l'avantage de stratifier les besoins en eau [12] de la culture en intégrant la dégradation des conditions pédoclimatiques de la zone soudanienne vers la zone sahélienne [13].

Faute de pouvoir avoir accès en temps réel à l'ETP de l'année, les champs décadaires d'ETP climatiques calculés sur la période 1951-1980 ont été utilisés [14].

Indicateur retenu

Sur la base de ces paramètres, le modèle calcule le rendement moyen attendu d'une utilisation normale de la ressource pluviométrique par le paysan pour chaque point du réseau. Le rendement est lui-même calculé à partir de l'indice de rendement espéré, égal au produit du taux de satisfaction des besoins en eau cumulés sur le cycle par le taux de satisfaction des besoins en eau durant la phase de reproduction [6].

L'indice IRESP est calculé comme suit :

$$\text{IRESP (\%)} = \text{ISCU} \times \text{ISPC} \times 100$$

avec ISCU : indice de satisfaction des besoins en eau cumulés

ISPC : indice de satisfaction des besoins en eau durant la phase à Kcmax (de l'épiaison à la floraison).

IRESP : indice de rendement espéré.

La relation utilisée pour estimer les rendements (figure 1) à l'échelle régionale est la suivante :

$$\text{rdt (kg/ha)} = 11,3 \times \text{IRESP} - 128$$

avec $r^2 = 0,66$

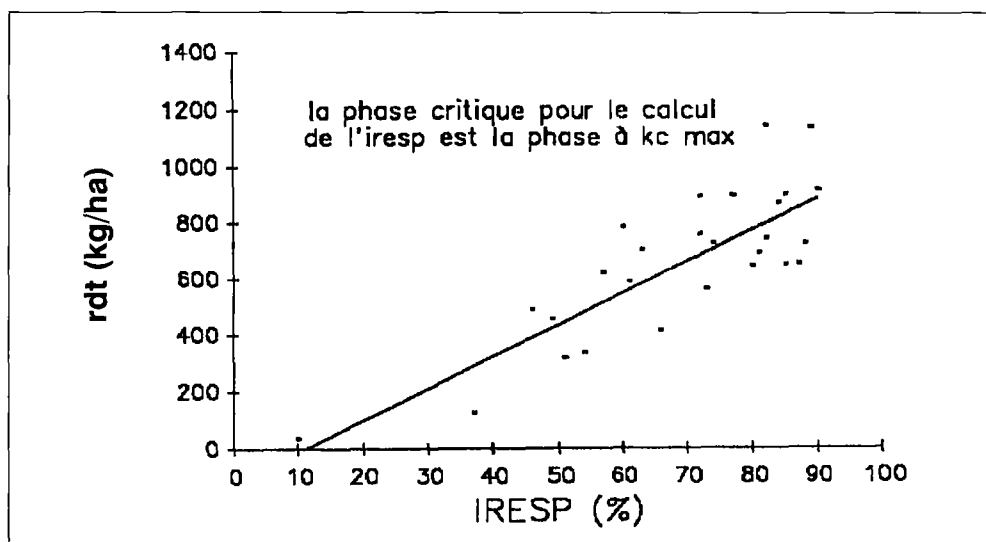


Figure 1. Relation IRESP-rendement du mil.

Prévision en cours de campagne

La méthode consiste à calculer l'indice de rendement espéré en bouclant la simulation jusqu'à la fin du cycle en considérant un spectre pluviométrique probable à différents seuils de dépassement après la date de prévision [15-16]. Ceci est rendu possible en couplant les données pluviométriques actualisées pour l'ensemble des points du réseau jusqu'à la date de prévision à la série pluviométrique interannuelle correspondante sur une période de référence retenue (nous retiendrons la période 1968-1985). Une analyse fréquentielle à partir des valeurs de la série d'indices calculés permet d'obtenir les rendements prévus à différents niveaux de probabilités.

La prévision s'affine au fur et à mesure du déroulement de la campagne pour tendre vers le rendement final, les pluies prises en compte après la date de prévision ayant de moins en moins de poids vis-à-vis de l'élaboration du rendement.

La première étape de la validation consiste à savoir si les prévisions faites à la fin de chaque mois ont des moyennes significativement égales à la moyenne des rendements finaux. Le calcul année par année des rendements prévus fin mai, fin juin, fin juillet, fin août et fin septembre par la méthode exposée ci-dessus permet de disposer d'une série pour chaque année de 22 rendements, calculée sur la période 1968-1990, dont on peut calculer la médiane. Nous pouvons ensuite tester les séries de médianes estimées à la fin de chaque mois avec la série des rendements finaux calculés pour chaque année. Le test des moyennes de student (ou un autre test similaire) doit montrer que les deux séries (celle des rendements prévus à la fin du mois m et celles des rendements finaux) ont des moyennes égales au seuil de probabilité retenu (en général 0,05). Le tableau I ci-dessous montre que les médianes sont significativement égales au seuil de probabilité choisi.

Tableau I. Caractéristiques statistiques des séries de rendements prévus.

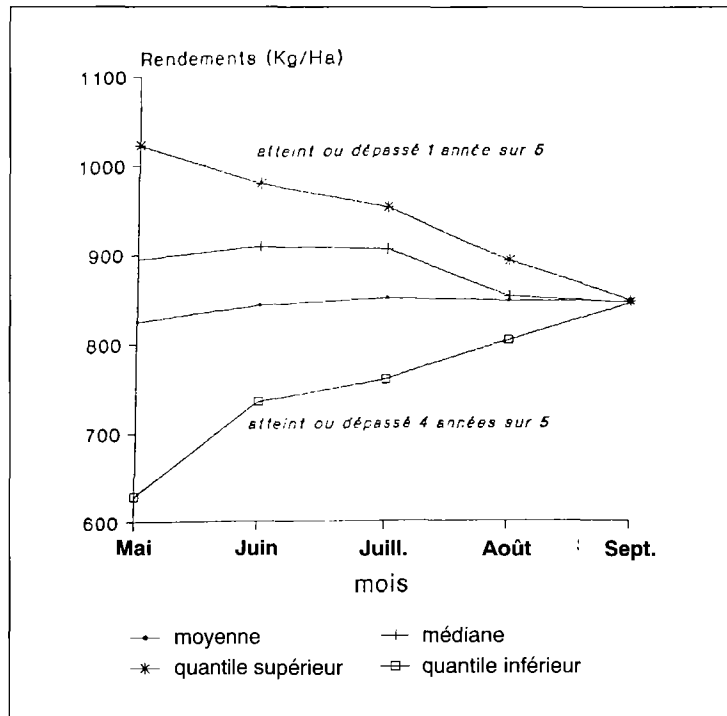
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Taille série	22	22	22	22	22
Moyenne arith.	896	908	903	849	842
Médiane	887	887	868	892	891
Ecart type	14	105	126	181	190
T statistic	1,33	1,43	1,26	1,23	
Niveau de signif.	0,19	0,16	0,21	0,90	

T statistic et niveau de signif. sont les résultats du test des moyennes de student. Ils montrent que les moyennes entre les séries de mai, juin, juillet et août sont significativement identiques au seuil de probabilité retenu (0,05) à la moyenne de fin septembre.

La seconde étape consiste à calculer la date d'actualisation à partir de laquelle on peut estimer les rendements avec le degré de précision souhaité ou, en d'autres termes, de calculer l'erreur correspondante à chaque date de prévision. Ce degré de précision peut correspondre à une limite supérieure de l'écart type (exemple : le rendement prévu doit avoir un écart type inférieur à 100 kg/ha), ou une limite de la fourchette des valeurs comprises entre les seuils de dépassements à 20 % (20 % des valeurs sont inférieures ou égales à ce seuil) et à 80 % (80 % des valeurs sont inférieures ou égales à ce seuil) (tableau II). Si on se fixe un écart maximum entre le quantile inférieur et supérieur égal à 100 kg/ha (60 % des valeurs seront comprises dans une fourchette n'excédant pas 100 kg/ha), la prévision ne donne des résultats avec le degré de précision retenu que fin août (figure 2). Avant cette date, on peut considérer (compte tenu du degré de précision choisi) que la prévision est trop aléatoire pour pouvoir être utilisée. L'année 1984 illustre bien le risque encouru à tenter des prévisions trop précoces : fin juillet la prévision de rendement était de 615 kg/ha (valeur moyenne), elle était descendue à 352 kg/ha le mois suivant (fin août), pour donner un rendement final de 370 kg/ha.

Les figures n° 9 et 10 donnent pour quelques sites l'évolution de la prévision des rendements pour la saison 1991, avec la dispersion correspondante, quantile supérieur (prob = 0,2) et inférieur (prob = 0,8).

Figure 2. Imprécision des rendements prévus : station de Niamey-Aéroport. Simulations faites sur la série 1968-1988.



Application

Prévision des rendements en mil pour la campagne agricole 1991 (figures 3 à 10)

Comme le montrent les figures 4, 5 et 7, le potentiel céréaliier sera globalement supérieur à celui de la saison agricole 1990-1991. Des rendements supérieurs à ceux de l'an passé sont à prévoir dans les départements de Tillabéry, Dosso et Tahoua au Niger, dans la moitié nord du Burkina et dans le centre du Tchad. Ceci s'explique par des démarrages précoces de la campagne dans ces zones (figure 3) et par une bonne pluviosité durant le mois d'août, période durant laquelle les cultures rentraient dans leur phase de fructification. Les prévisions faites fin août correspondent aux estimations de fin octobre (figures 6 et 8).

Des zones présentant de faibles productions se confirment en Mauritanie et au Sénégal.

En Mauritanie, dans de nombreuses zones, les cultures de diéri ne peuvent être récoltées, soit à cause du retard dans le semis (resemis effectués début août), soit à cause des stress hydriques ayant fait avorter les cultures arrivées au stade d'épiaison. Il n'y a guère que dans la willaya du Guidimaka, le sud des Hodh El Chargui et El Gharbi, et localement dans l'Assaba, que les récoltes peuvent se faire. Les rendements en cultures de Diéri seront inférieurs à 300 kg/ha, excepté dans le Guidimaka où ils pourront atteindre 700 à 800 kg/ha.

Tableau II. Evolution de l'écart (kg/ha) entre les quantiles 20 % et 80 % donné par la prévision.

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
1968	395	206	102	0	0
1969	411	264	68	0	0
1970	411	335	236	254	17
1971	411	243	311	111	0
1972	411	239	330	128	0
1973	411	256	218	177	0
1974	411	219	60	0	0
1975	401	245	112	10	0
1976	355	206	92	21	0
1977	394	227	239	101	0
1978	397	268	130	0	0
1979	395	250	92	10	0
1980	377	251	286	40	0
1981	372	158	112	133	0
1982	411	267	332	254	0
1983	306	161	72	0	0
1984	395	280	233	81	0
1985	411	219	394	215	0
1986	355	249	356	26	0
1987	394	335	236	256	9
1988	411	288	139	0	0
1989	411	250	237	232	0
1990	411	189	29	0	0
Moyenne	394	244	192	89	1

Au Sénégal, l'arrêt des pluies observé en 2^e décade d'octobre sur toute la moitié nord du pays a provoqué un avortement partiel des chandelles de mil. Les variétés tardives en floraison-grenaison dans le Siné-Saloum et sur la petite côte (région de Fatick et de Thiès) ne pourront se suffire des faibles réserves en eau dans le sol pour boucler leur cycle. Au sud du pays (Casamance, Sénégal oriental), les conditions d'alimentation en eau ont été nettement meilleures grâce aux pluies importantes tombées jusqu'en 2^e décade du mois. On peut donc prévoir, dans le bassin arachidier (région de Thiès, Louga, Diourbel), des rendements moyens faibles (< 500 kg/ha).

Pour ces deux pays, les premières prévisions de fin août permettaient déjà de se rendre compte de l'impact des semis tardifs sur les niveaux de productions.

Dans les zones soudaniennes des autres pays (Mali, Burkina, Tchad), les conditions d'alimentation en eau des cultures ont été correctes sur l'ensemble du cycle. Par contre, dans la région de Ségou et de Mopti, les cultures de mil à caractère photopériodique plus ou moins bien marqué (variétés Boboni, NKK et autres) donneront des rendements médiocres, plutôt plus faibles que ceux de l'an dernier, à cause de la pause pluviométrique observée du 10 octobre. Dans la zone sahélienne du Tchad, l'arrêt des pluies en septembre a fait très nettement chuter les rendements prévus fin août (figure 6).

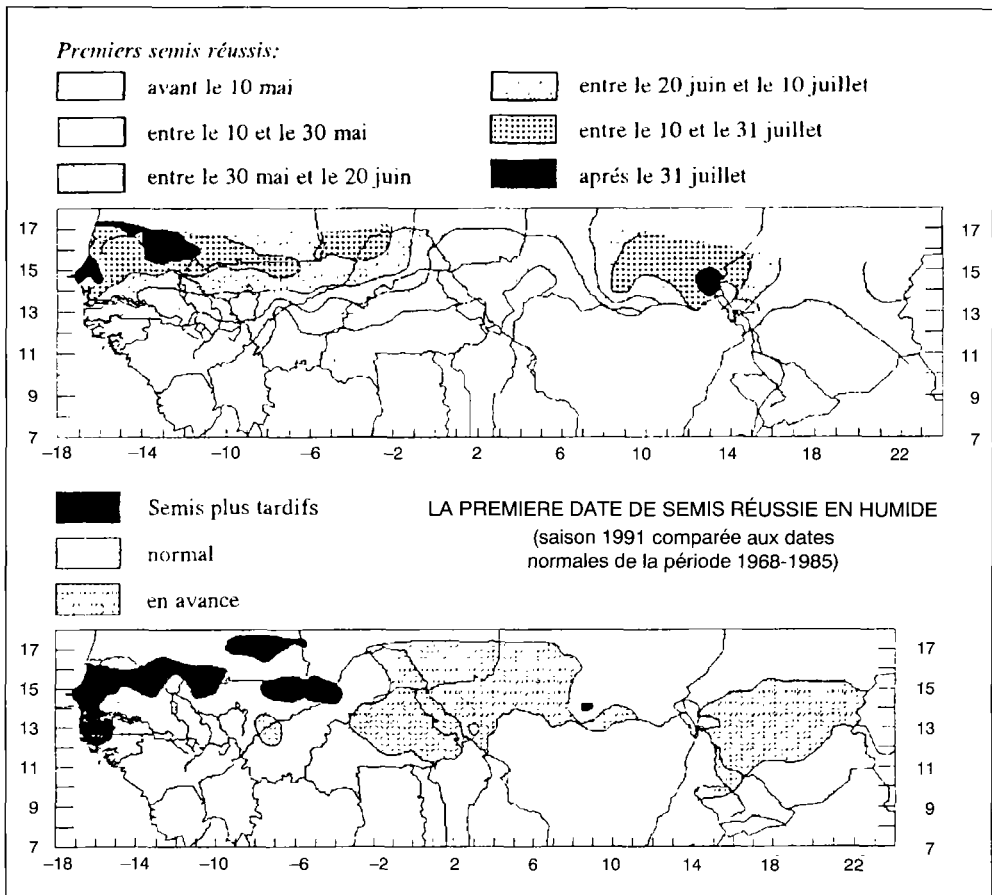


Figure 3. Situation des cultures pluviales en fin octobre 1991.

Conclusion

L'outil " diagnostic hydrique des cultures " reste imparfait, dans la mesure où il met en œuvre des variables régionalisées dont la variabilité spatiale est encore mal maîtrisée. Notamment la faible densité des sites pluviométriques utilisés pour le suivi régional (200 sites pour l'ensemble des zones agricoles des pays du CILSS) empêche toute caractérisation précise des champs de rendements espérés. Toutefois les méthodes de prévisions mises en œuvre à partir des relations liant le régime hydrique de la culture au rendement moyen paysannal (résultats du programme ESPACE), et de la base de données pluviométriques et climatiques disponibles (base de données de l'ATLAS/AGHRYMET) présentent l'avantage de caractériser grossièrement les zones en terme de déficit ou d'excédent par rapport aux valeurs moyennes ou d'une année donnée suffisamment tôt pour que le produit puisse être exploité par les services et autorités concernés.

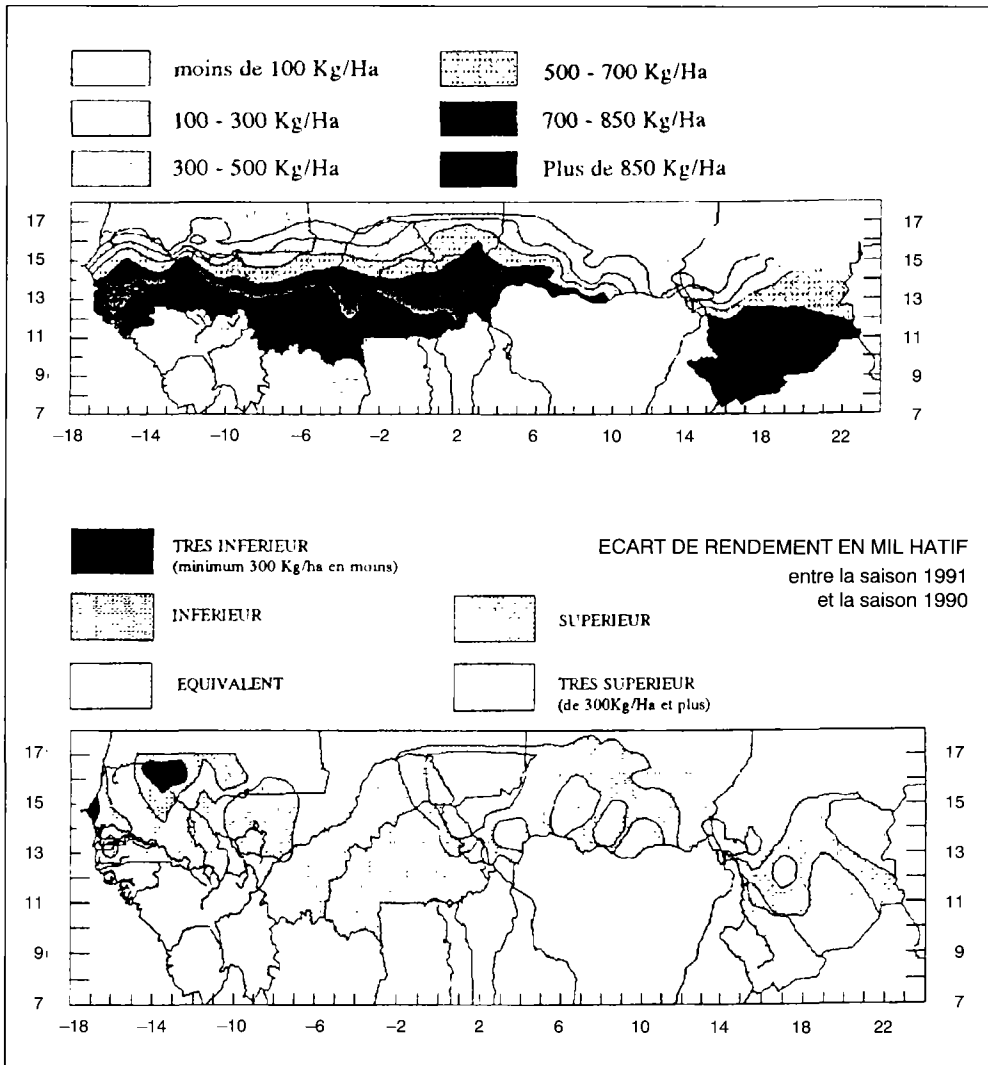


Figure 4. Perspectives de rendement en mil hâtif (prévisions au 30 octobre 1991).

Il semblerait que, dès la fin du mois d'août, des premières estimations puissent être faites avec un degré de précision acceptable.

La prise en compte dans un système d'information géographique (SIG) de la variabilité régionale des paramètres sensibles du modèle (pluviométrie, réserves utiles, caractéristiques variétales des espèces cultivées) et la mise en place d'un indicateur prévisionnel sensible aux différents facteurs locaux (agronomiques, pédologiques, techniques, etc.) amélioreront les performances de l'outil.

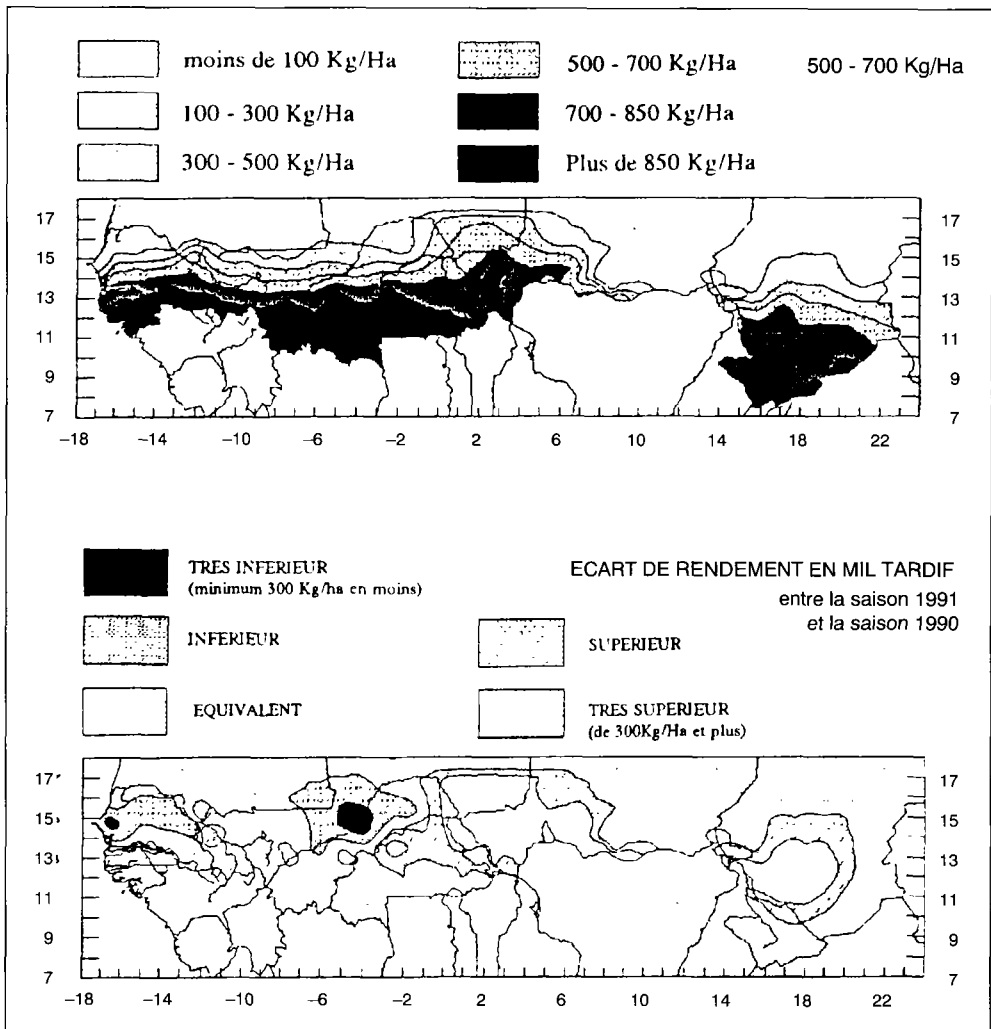


Figure 5. Perspectives de rendement en mil tardif (prévision au 30 octobre 1991).

Références

1. Forest F., Cortier B. (1990). Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. IRAT/CIRAD/AGRHYMET. IAHS, publication n° 199: 547-57.
2. AGRHYMET (1991). Bulletins décennaires et mensuels de suivi de la campagne agricole pluviale.
3. ESPACE. Rapports de campagne 1987, 1988, 1989, 1990. Synthèse des opérations sur le terrain, évaluation de la campagne, présentation des résultats.

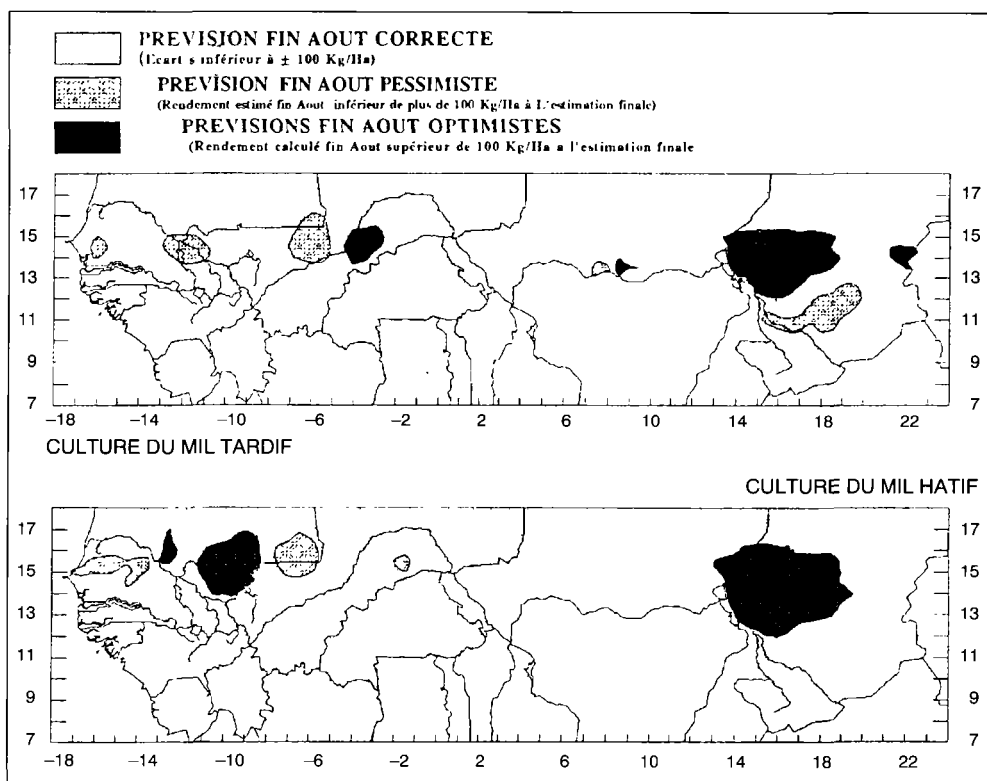


Figure 6. Ecart entre les prévisions de rendement calculés entre fin août et fin octobre.

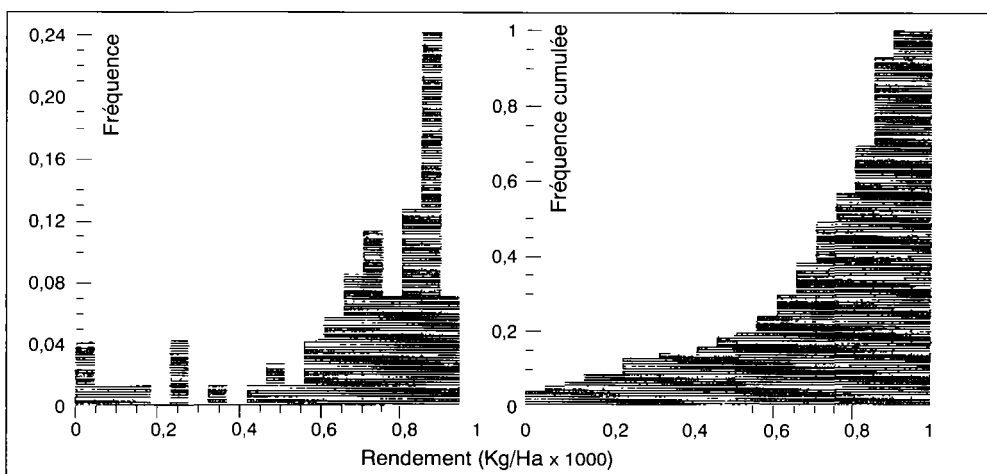


Figure 7a. Distribution des rendements prévus fin octobre 1991.

Figure 7b. Fréquences cumulées des rendements prévus fin octobre 1991.

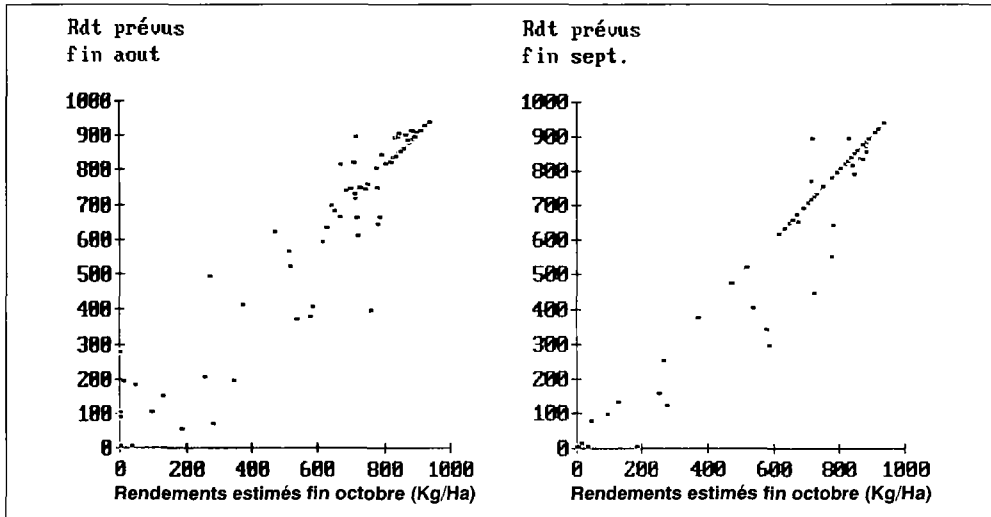


Figure 8.

4. ESPACE (1989). Atelier d'agroclimatologie opérationnelle pour les pays du CILSS. Synthèse du réseau ESPACE/AGRHYMET. Niamey, Niger, CIRAD/Montpellier.
5. ESPACE (1990). Synthèse programme ESPACE. Atelier Bambey, ISRA/CIRAD, février 1990 (ISRA-IER-INRAN-INERA-DMN, Sénégal, Mali, Niger, Burkina Faso, AGRHYMET-IRAT).
6. ESPACE R35/PF1 (1991). Synthèse de trois ans de recherches en milieu paysan. Atelier de Mindelo (Cap-Vert), mars 1991.
7. Marchand D. (1988). Comparaison de modèles de bilan hydrique. Modélisation stochastique ou déterministe. Thèse IMG/IRAT, Grenoble.
8. Imbernon J., C. Baron (1987). Le krigeage : une méthode d'analyse géostatistique. Exemple d'applications en agroclimatologie. Document interne IRAT-CIRAD, 14 p.
9. Baron C. (1989). La base de données production climat. Méthodologie et logiciel d'utilisation ESPACE. IRAT/CIRAD, Montpellier.
10. Eagleman J.R. (1971). An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agric. Meteorol. 8 : 385-94.
11. Lefert C., Cortier B., Cunin L. (1990). Estimation des rendements en mil sur l'Afrique de l'Ouest pour la saison agricole 1990. Veille climatique satellitaire, nov. 1990.
12. Dancette C. (1974 b). Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal. In : Isotope and radiation techniques in soil physics and irradiation studies 1973. Proceedings of a symposium, Vienna, 1-5 October 1973, jointly organized by IAEA and FAO. Vienna, IAEA : 351-71.
13. Freteaud J.P., Lidon B., Marlet S. (1984). La détermination des coefficients culturaux en zone soudano-sahélienne. Document interne IRAT/Montpellier.
14. Morel R. (à paraître). Atlas agroclimatique.
15. Miranda E. (de), Forest F. (1979). Une analyse de la variabilité de la production du mil en milieu réel (Maradi-Niger) par la simulation des bilans hydriques. Division recherche développement, IRAT/Montpellier, 25 p.
16. Forest F. (1984). Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Rapport IRAT.

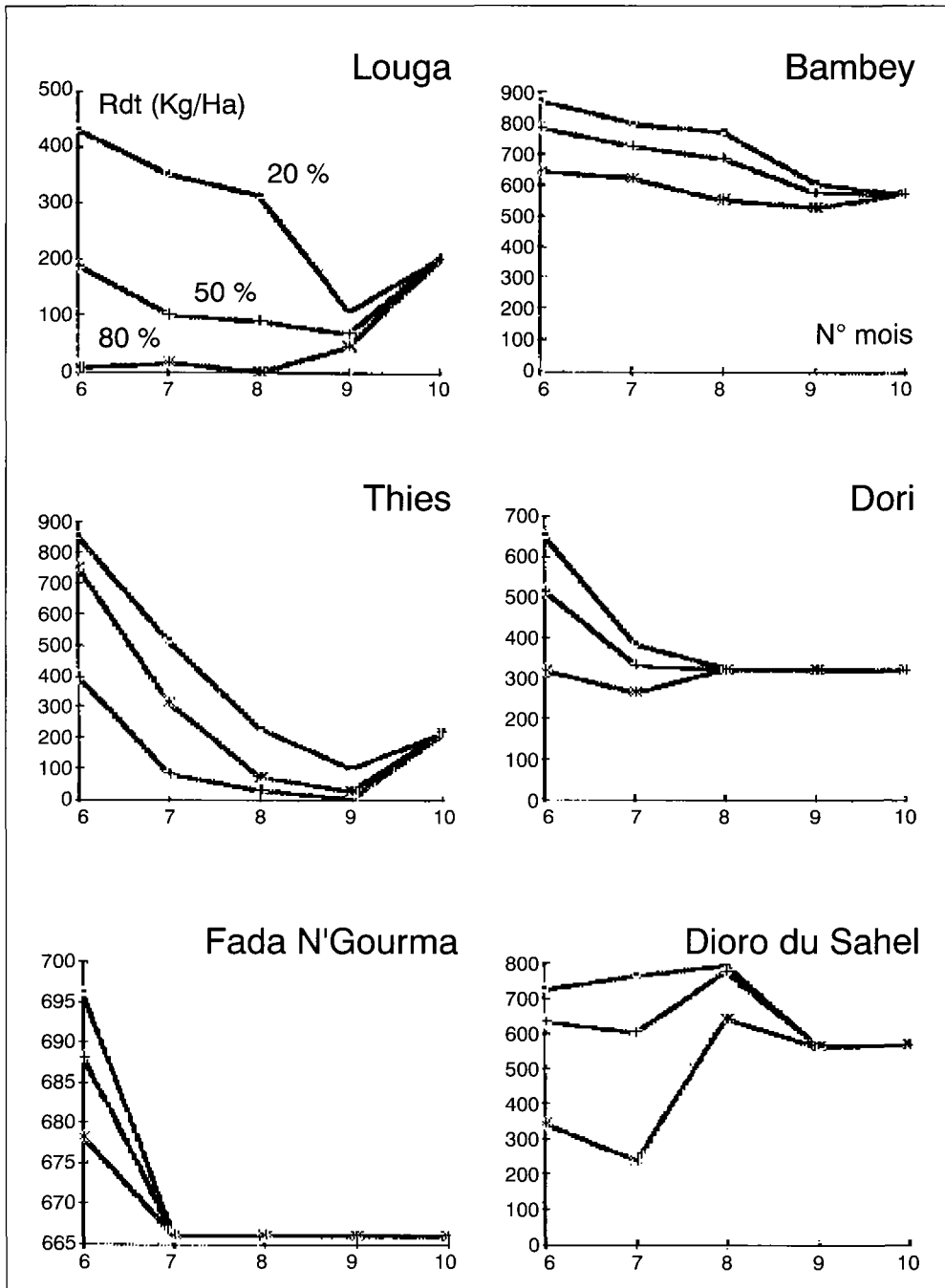


Figure 9. Prévisions sur mil hâtif et première date de semis réussis.

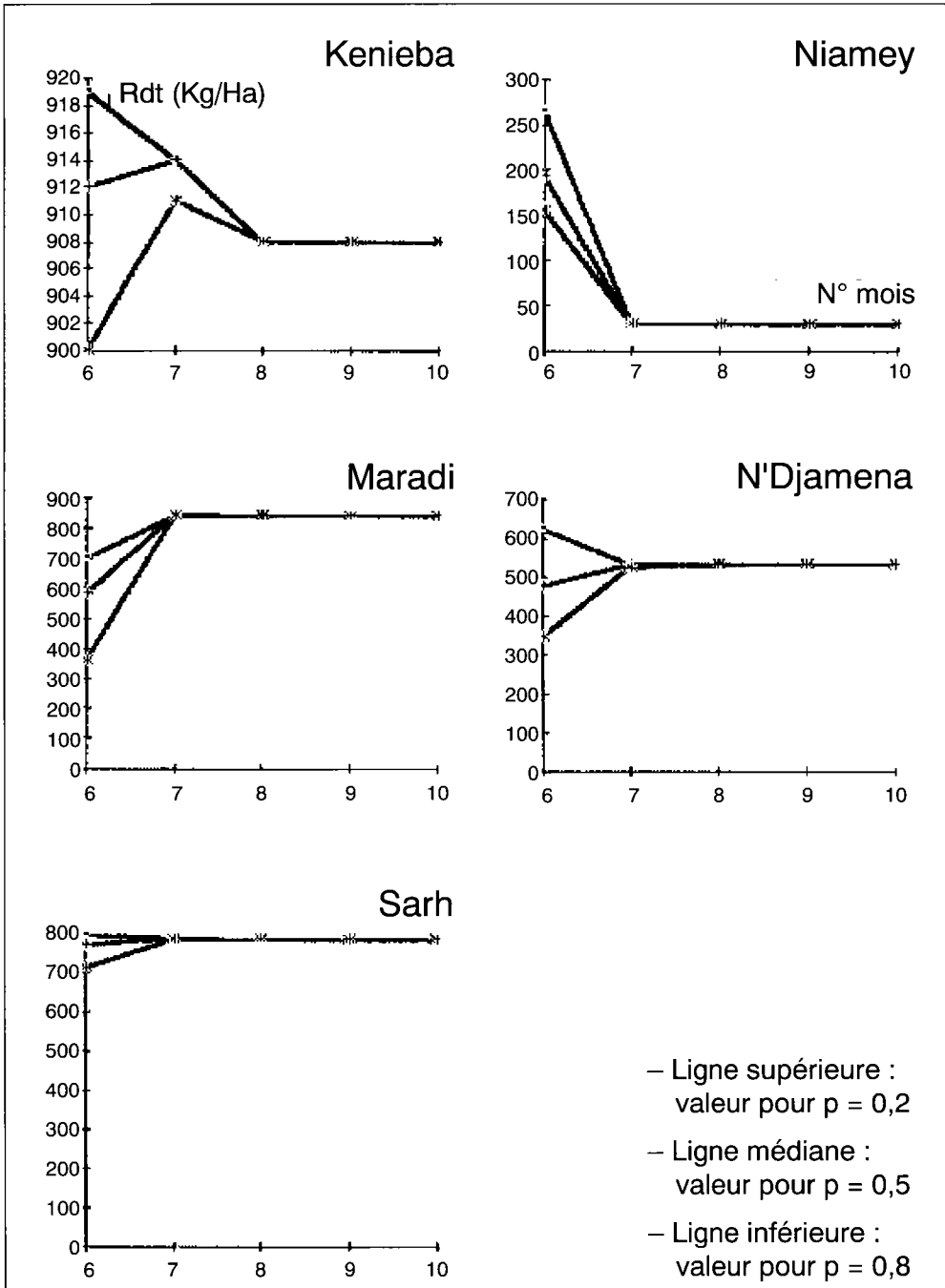


Figure 10. Prévisions pour le mil hâtif sur première date de semis réussis.

30

The use of remote sensing in grain crop production forecasting in Kenya

R.K. SINANGE

Department of Resource Surveys and Remote Sensing, Ministry of Planning and National Development, Kenya

The most important grain crops in Kenya are maize, wheat and to a lesser extent rice. Others include sorghum and millet. However, the latter are nationally insignificant and are found in the marginal areas of production. Maize and wheat are produced in the agriculturally high potential areas under rainfed farming systems while rice is mostly produced under irrigation systems. The high potential area comprise about 20 % of the country's land area. Through distribution networks maize, wheat and rice reach all consumers in every part of the country from surplus production areas.

Maize and wheat are the staple food crops in Kenya and guarantee of their production and availability to the consumers is a major responsibility of the government. However, their final level or net production is subject to various production factors including :

- area put under production,
- weather and climate,
- farming system,
- input availability (labour, land preparation implements, fertilizers, certified seeds, pesticides, herbicides, etc.),
- amelioration of pre-harvest and post-harvest losses.

These factors introduce elements of uncertainty during the early stages of production process and have a bearing on the final production levels of the crops. This is especially true for weather, area put under crop, and expected yields. None wants to be caught unaware if things go wrong. This is especially so because we live in a region with very unpredictable climates where droughts are not uncommon, and rainfall amounts and their spatial and temporal distributions are always uncertain. And yet for optimal yields crops and their varieties have very specific requirements. Governments therefore have to be vigilant and keep monitoring the production systems at every stage to be sure of what is expected in the next harvest. A hungry nation can socially and economically be volatile.

Thus the Department of Resource Surveys and Remote Sensing (DRSRS) in the Ministry of Planning and National Development has established an annual maize and wheat production forecasting system for the country. The objectives of this early warning system is to indicate the levels of production of these two commodities long before harvest so that the Government can make appropriate contingency plans for storage if a bumper harvest is expected or for imports if a severe deficit is expected.

Widespread crop failure after droughts in 1984 prompted the necessity of establishing the crop production early warning system for the country a year later by DRSRS. This has served to give an indication of the crops' production and consumption trends in view of the government's long term policy of self-sufficiency in feeding its population and maintenance of strategic reserves. The 1991 forecast was the seventh year in a row that these forecasts were carried out by the Department. These series of data can now be considered to be consistent with the principles of a monitoring programme. The essence therefore, in the long run, is for the Government to develop a data bank to be used as a basis of modeling, projecting and formulating forward plans and policy adjustments, with an aim of creating conducive environments for efficient production and marketing of these commodities and equally relate this food production to other interacting aspects in the economy of the country [1, 2].

This paper outlines the procedures of acquiring statistics on area under the crops through photography, yield through aerial radiometer (light wave reflectance) measurement and the monitoring of crop healthness and weather through NOAA and METEOSAT data during the growth periods.

Methods

The department uses mostly remote sensing techniques to gather the necessary maize and wheat data. The most important steps are :

- the stratification of maize and wheat growing areas ;
- establishment of a cropping calendar for the strata ;
- monitoring of the weather ;
- the measurement of total area under the crops for all strata ;
- the measurement of expected yield in all strata long before harvest.

The product of area and yield is the forecasted crop production estimates.

Maize and wheat strata

The maize and wheat growing areas were established initially through a land use mapping programme carried out by the Department in the early 1980's [3]. This used satellite imagery, aerial photographs, aerial reconnaissance surveys using a light aircraft, local working knowledge literature and official records. The map indicated the distribution of crops in the country as well as regional crop mix. However, the strata have continuously been updated due to the dynamic changes (expansion) of cultivated areas, especially into forest and marginal areas which were previously uncultivated. This is done annually during the aerial area measurements. Figure 1 is a presentation of the general high potential areas currently considered for surveys.

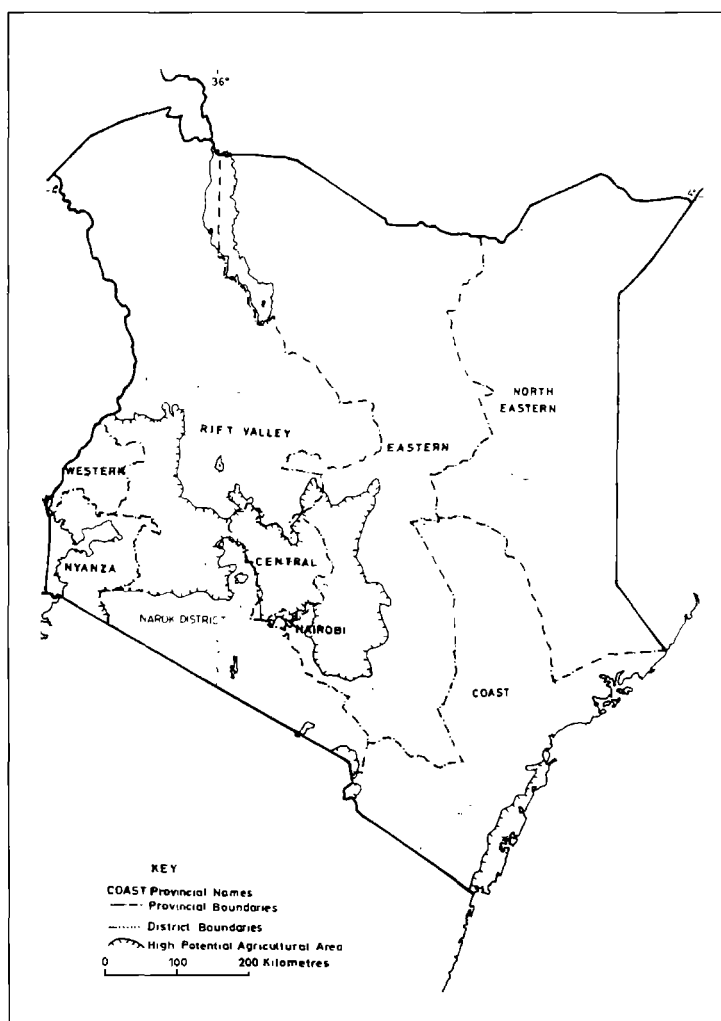


Figure 1. Map of Kenya showing the high potential areas for rainfed agricultural production.

Crop calender

Most of Kenya depict a bimodal pattern of rainfall. The main rains, commonly referred to as long rains, occur between March and June. They however may extend into September for a few areas in the Rift Valley. The short rains normally start in mid October to December. Although all areas produce a crop in the long rains, the short rains produce a significant crop for the whole of Eastern Province districts, some small parts of central, coast, Nyanza and Western provinces.

Land preparation activities for the long rains planting vary from region to region depending on the agro-climatic zone. It however generally commences as early as late November and ends in April. It may extend into June for the case of wheat in a few areas.

Planting of the crops is therefore also done at different dates depending on the zone one is considering and is really triggered by the on-set of the long rains. The earliest planting is done from December/January in Western Narok, Southern Kericho, Kisii and Southern Nandi. Planting in Coast, most of Central, Nyanza, Western and Eastern provinces is normally done between mid-February and March. In the Rift Valley province including Nyandarua and Laikipia, maize planting commences in late March and may end in late April and some few places up to mid-May. However, wheat planting in North-West Narok is during late February, while the rest of the areas it commences in early April and may generally end in late May. These activities are normally observed by field officers of the Ministry of Agriculture and can also be approximated from the METEOSAT and NOAA data. In case of distressful reports, aerial reconnaissance surveys may be carried out by DRSRS.

Based on the above general crop calendar, DRSRS has a drawn-up programme for collecting the necessary data for forecasting production estimates for the whole country. This normally starts with Western Kenya in late May/early June and ends with Rift Valley in mid-August. In each stratum aerial photographs for area measurements and then radiometric measurements are made sequentially.

The weather

The weather review bulletins from Kenya Meteorological Department (KMD) for the whole country which describe the climatic situation for each decade in each month is normally used as collateral information for the interpretation of DRSRS's data especially on the radiometric readings. In the last three years (1989, 1990 and 1991) METEOSAT's and NOAA's satellite data relayed from FAO, Rome, through the Regional Centre in Nairobi, was increasingly being used more to follow closely the weather situation of every stratum. This is because the data was being received from the Regional Centre for Services in Surveying, Mapping and Remote Sensing (RCSSMRS) more regularly and in real time. However methods of computerizing and analysing this data is at its infancy despite its promising future use.

Areas measurements

The area put under the crops is determined from vertical and systematic aerial sample photographs taken during the middle stages of their growth period in each stratum. The

photos are taken at an interval of 2.5 km along transects while interval between transects is normally either 5 km or 2.5 km apart. A 35 mm Nikon F3 camera with a 20 mm lens and a 35 mm ektachrome 200 slide films are used. Flying height is normally about 490 m above ground level. The resultant positive slide photos normally occupy a ground area of about 50 ha. During interpretation the slides are projected onto a screen with a systematic grid of dots of usually between 100 and 200 dots. The average percent number of dots overlapping with any of the crop's fields is therefore equivalent to the proportion of land under the crop in the stratum. Since the total area of the stratum is known, the area under the crop is then computed. The method is fully described by Sinange-Kimanga & Agatsiva [4]. This procedure is repeated annually.

Yield measurements

The yield of maize is determined from the air using sample radiometric measurements which are made over fields when the crop has tussled and is in the process of cob formation. These readings of the near infra-red (NIR) and red (R) reflectances are made over fields using two tektronic 56504 probes under the wings of an aircraft and the recording is done on two Tektronix J16 digital radiometers, which are hand held by the crew. The radiometric readings are then converted into yields using an established relationship between the NIR/R ratio and yield from strata across the country (figure 2). These relationships were established in 1984-1985 by DRSRS and an attempt is made to verify them annually.

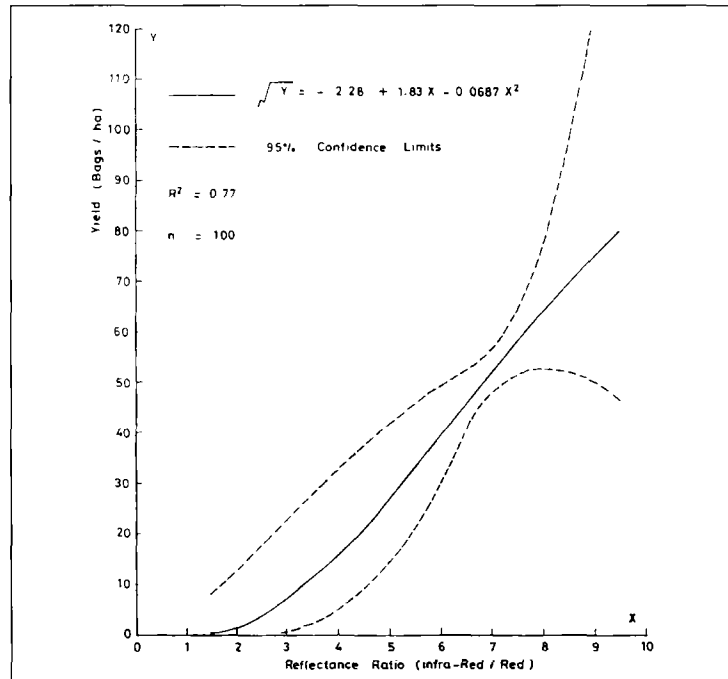


Figure 2. Relation between pre-harvest yield of maize and reflectance ratio of infra-red to red measured airborne digital radiometers (source [5]).

Wheat yields have however been established from long term records of area planted and production for various districts and reported previously by the defunct Kenya Wheat Board (KWB) and now by the National Cereals and Produce Board (NCPB). Details of these methods are elaborated in previous DRSRS reports (e.g. Peden *et al.* [5], Ottichilo and Sinange, [6]).

In any one strata, yield depends on many factors including land preparation; seed variety; agronomic practices; fertilizer applications; on-set, amount and consistency of the rains; soil fertility; agro-ecological zone; and farming system. These differ to different degrees from one region to another. Thus efforts are always made to have radiometric measurements as representative as possible for all agro-ecological zones.

Results

The crop strata and calendar have been established from long term records and collateral information in the country and change little or gradually from year to year. However weather, area and yields are production factors which can change drastically especially with the influence of weather and therefore these must be closely monitored annually.

Weather

Widespread severe drought was experienced in Kenya in 1984 last. Since then moisture stresses were experienced in various limited areas of the country in 1987, 1990 and 1991 to various levels of severity. In 1990 very heavy rains came too early in the long rains season and consistency was not maintained. These conditions affected the overall national production of maize.

The potential use of METEOSAT data has been demonstrated by information received in the last three years in Kenya. The data is relayed to Nairobi from Rome under the code name ARTEMIS (Africa Real Time Environmental Monitoring Information System). The most useful items here are: the 1) cold cloud duration (CCD) data that indicate how long a potentially rain bearing cloud hovered over a given area during any one decade (10 day) period of a month ; and 2) the number of rain days (NRD) which is an estimate of the number of days during a decade that rain fell over any one area. Figure 3 is the pattern of rainfall spread (NRD/decade) during the period January to August, 1991 in one district. Figure 4 compares CCD patterns for the last three years (1989-1991) over one district in the country. The one for 1989 is taught to represent the normal pattern. However in 1990 the rain came down very heavily too early in the season and caught many farmers still preparing fields. It actually caused floods in a few areas in the country. In 1991 the rains delayed slightly and in the middle of the season (April-May) a dry spell occurred during the germination or first two weeks of the maize crop in a few areas. This could have led to poor germination or thinning of the yields due to moisture stress leading to wilting and death of some plants.

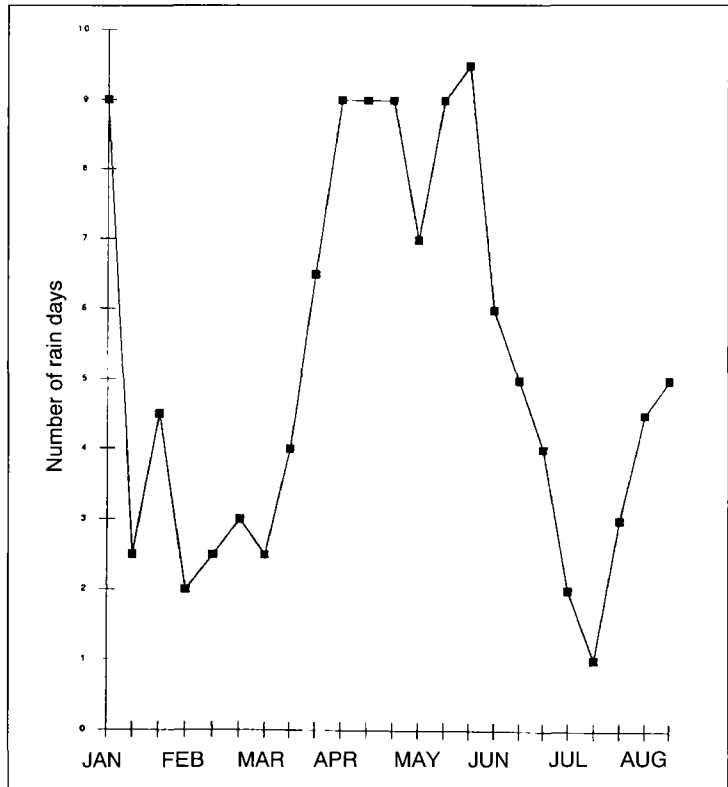


Figure 3. Number of rain days per ten-day period for Kisumu, 1991.

A seasonal general summary for the crop performance for the whole country partly derived from ARTEMIS/NOAA information may read as follows.

“The late on-set of rains resulted in delayed planting for most parts except for some parts of Western Province, Kisii, South Kericho, South Nandi and Transmara region. Despite late planting and continued lowered rainfall intensity there was sufficient moisture supply for the crops to continue flourishing. The coastal 5 km strip however seem to have had initial heavy rains resulting in widespread delays in planting, and, for the early planted fields, mineral leaching may have resulted in a poor crop.

Mid-season significant moisture stress was experienced in a few pockets in the country which will results in low yields because this happened when tussling and cob formation in maize was in progress. This include areas around Rumuruti in Laikipia, Naivasha Division of Nakuru, Northern parts of Kitui district. Waterlogging in many fields of Central and Southern Nyandarua may also result in subdued yields of maize. There was a specially significant precipitation failure in most parts of Uasin Gishu and Elgeyo Marakwet in May. This resulted in poor germination (lowered maize populations) and stunted early growth of maize. It also caused a delay in sowing wheat. The rains however later fell in sufficient quantities in these two districts to revive the crop to healthy growth form as supported by radiometric readings. This is because the rains failed in a none critical stage of the maize growth.”

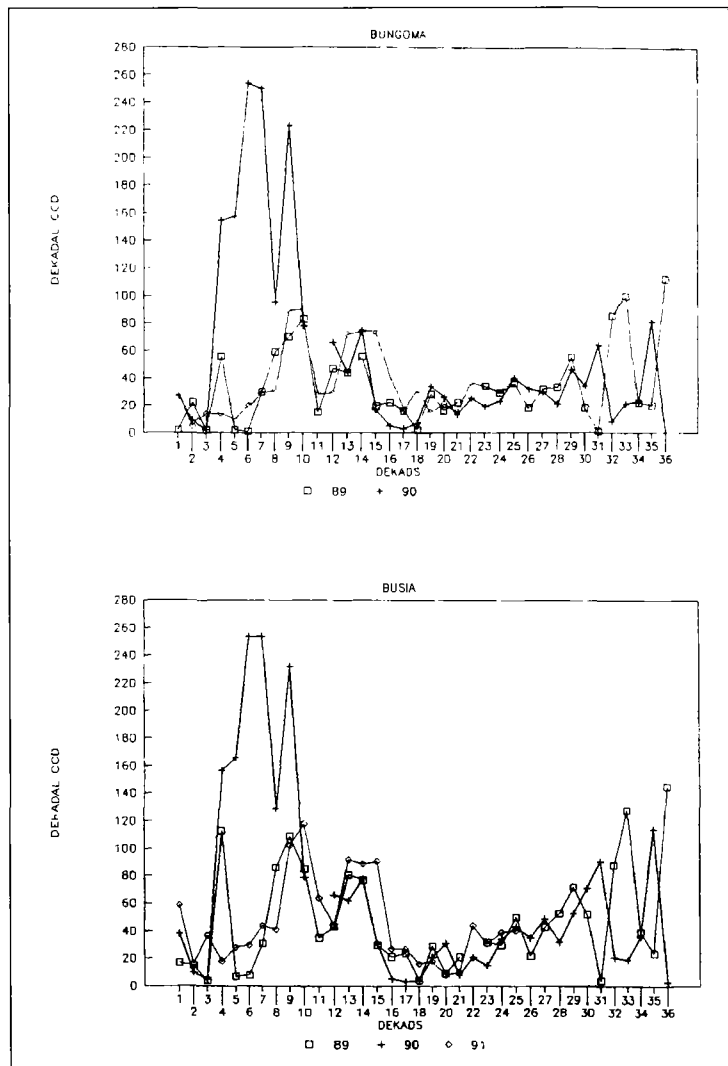


Figure 4. Pattern of cold cloud duration per ten-day period for Bungoma and Busia Districts 1989-1991.

Area measurements

Area measurements have been conducted consistently over the seven years. However as it is known that there is a gradual and heavy pressure for expansion of cultivation into marginal areas the department has also been expanding the surveyed strata to capture these newly opened areas. It is however evident that the increase in this cultivation area is small overall, countrywide. This is shown by the statistics on maize for the long rains on (Table I). On average, the area put under this staple crop in the one season annually is about 1.06 million hectares.

Table I. Estimated area planted under maize in Kenya during long rains (March-August) 1985-1991.

Year	Area (million ha)	Average yield (90 kg bags/ha)
1985	0.97	41
1986	1.02	34
1987	1.11	25
1988	1.03	33
1989	1.12	27
1990	1.06	25
1991	1.08	30
Average	1.06	31

Yield measurements

Yield (90 kg bags of grain/ha) realised by farmers vary greatly within the country and depends on the agroecological zone the farmer happens to reside. It also varies from year to year depending on the weather. The variation effected by rainfall (amounts and distribution) is evident on table I for national yield average. The years 1985, 1986 and 1988 had ample and consistent rains and resulted in good yields. However on the overall there is an obvious downward trend in yield.

It should be noted here that the yields are not the final (net) amounts farmers realise or that end up at the eating table. There are various pre- and post-harvest losses which may reduce this by up to 20 % in some case in the country. These losses are normally caused by poor harvesting methods; poor storage facilities leading to loss due to pesticides and mould or both; and substantial losses may also be incurred during transportation to consumer destination.

Discussion

When focus is put in regional (district) details within the country, the seven year crop monitoring and early warning programme has started to reveal a few trends and patterns in various districts some which are encouraging and some need further attention and research in the future. These are concerned with measurements of yield and area, productivity (yield) against expected potential from the area, rainfall patterns and strengthening the programme itself.

The low level sample aerial photography method for determining area under crops has proved to be fairly accurate, consistent, cost-effective and rapid. Information on area is received long before harvest and this qualifies it very well as a method for early warning.

In some areas of the country, intercropping is often practiced especially between maize and sorghum or maize and pigeon peas. In such case some noise is introduced in the radiometer readings. In such areas extra calibration may be needed or a different approach will be necessary.

Production fluctuates from year to year in all districts in varying magnitudes and this is often reflected in the national totals. This has depended on the area put under the crops and the yield factor. Area fluctuations are not very erratic in Kenya. Yield, however, depends on various factors including weather, availability of inputs and in general the level of production costs. Weather, drought in particular (and however short it may occur during critical growth stages), has the greatest influence on final production in the country in any one year. This is revealed in table I. The bad years had short spells of droughts. The year 1990 however also included too much rain at the beginning of the season leading to poor land preparation, poor germination, mineral leaching, delayed sowing and all this led to poor yields.

The use of METEOSAT and NOAA satellite data have very good prospects especially in allowing agrometeorologists determine the climatic trends and weather patterns in any country and especially when focusing on a limited area, be it an administrative district or agroecological regions. The RCSSMRS in Nairobi is already planning to research into the relationship between CCD and NRD from ARTEMIS and the actual rainfall on the ground. This will go along way in the early warning system. There will be a possibility therefore of estimating amounts, spatial and temporal spread of rains without actually being on the ground. This will circumvent the present problem of communications from field meteorological stations to their headquarters before it reaches final users.

Calibrations of NDVI with production for any one area is also extremely desirous to avoid the more expensive procedures presently being followed in terms of what DRSRS is conducting and the traditional use of field enumerators and agricultural field officers who in many areas still use very subjective methods to arrive at area and yields. Their methods have been fairly useful in the long run in providing agricultural statistics but this is far from ideal for an early warning system where information is needed long before harvest.

References

1. Kenya Government of (1981). National Food Policy. Sessional Paper n° 4.
2. Kenya Government of (1986). Economic Management for Renewed Growth. Sessional Paper n° 1.
3. Agatsiva J.L., Mwendwa H.A. (1982). Land use mapping of Kenya Using Remote Sensing Techniques. DRSRS, Ministry of Planning and National Development, Nairobi. Technical Report n° 72.
4. Sinange-Kimanga R., Agatsiva J.L. (1986). National land use and land cover mapping : The use of low level sample photography. In Damen, M.C.J., G. Sicco Smit and H.TH. Verstappen (eds). Proc. of the 7th International symposium on Remote Sensing for Resources Development and

Environmental Management. ISPRS commission VII held in ITC Enchede, Netherlands 25-29 August.

5. Peden D.G., Mwendwa H.A., Ottichilo W.K. (1985). Estimating Pre-harvest production of maize in Kenya using large-scale aerial photography and radiometry. *Intern. J. Remote Sensing*, 7 : 1669-77.
6. Ottichilo W.K., Sinange R.K. (1990). Long Rains maize and wheat production trends in Kenya for 1985-1989. DRSRS Technical Report n° 137. DRSRS, Ministry of Planning National Development, Nairobi.

31

Exploitation d'un réseau d'irrigation pendant l'hivernage et efficience des pluies : cas d'un périmètre de polyculture dans la région de Tillabéry (Niger)

S. MARLET¹, B. LIDON²

1. IRAT-CIRAD, INRAN, Niamey, Niger

2. IRAT-CIRAD, Montpellier, France

Introduction

La conception des périmètres irrigués et l'exploitation des réseaux sont définies par la nécessité de fournir à tous les utilisateurs les besoins en eau de pointe des cultures. Cette période correspond en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne au mois de mars où l'ETP Penman peut atteindre des valeurs de l'ordre de 8 mm/j.

Sur la base d'un déficit hydrique admissible par les cultures, fonction des caractéristiques du sol et de l'enracinement, on définit une fréquence d'irrigation et une dose d'irrigation nécessaires à la satisfaction de ce maximum. Ces paramètres permettent alors de définir les caractéristiques du réseau et les conditions de son exploitation (organisation du tour d'eau).

Et lorsque les besoins en eau sont moindres, on peut envisager de réduire, soit la dose d'irrigation, soit la fréquence des apports.

Pendant la saison pluvieuse, cette organisation est sensiblement perturbée. En effet, les contraintes de tour d'eau nécessaire au fonctionnement correct du réseau ne permettent pas de privilégier à la fois la satisfaction des besoins en eau et une efficacité optimale des pluies et des irrigations.

Présentation de la zone d'étude

Le périmètre de Sona est situé sur une terrasse non inondable du fleuve Niger. Les alluvions successivement déposées par les divagations du fleuve composent un milieu très hétérogène, disposé en une série de bourrelets sableux comblés par des alluvions de texture plus fine [1]. Ces sols ont subi un processus d'alcalinisation d'intensité variable et sont généralement caractérisés par des pH élevés et une forte instabilité structurale induisant deux caractéristiques majeures : une forte compacité et une faible infiltrabilité [2].

Suite à l'apparition d'une période de sécheresse, la mise en culture des terrasses sous irrigation a été envisagée sous la forme d'exploitations de 1 hectare associant cultures vivrières, pour la sécurité alimentaire de l'exploitation familiale, et cultures de rente.

Le choix s'est tourné vers une irrigation en raies non bouchées de l'ordre de 85 mètres de longueur et 0,80 mètre d'écartement. Le tour d'eau a été défini à partir de 4 groupes de parcelles (fréquence maximale d'une irrigation tous les 4 jours). L'irrigation est réalisée à l'aide de siphons à partir d'un canal d'amenée, lui-même alimenté par une vanne délivrant un débit de 12 l/s. L'utilisation simultanée d'une trentaine de siphons conduit à distribuer un débit de l'ordre de 0,4 l/s dans chaque raie.

Pendant la saison des pluies, le sorgho occupe environ 50 % de la SAU. Les autres cultures sont : le maïs, le gombo, l'arachide, le niébé et le sésame. La date des semis est bien souvent reportée vers la fin du mois de juillet en raison des problèmes de disponibilité en eau liés à l'étiage du fleuve Niger.

Matériel et méthode

Mesure du ruissellement

Pendant la saison des pluies 1989, le ruissellement a été estimé sur 3 parcelles du périmètre de Lossa. Le volume ruisselé dans 2 raies d'une longueur de 10 mètres a été recueilli dans une cuve enterrée de 1 m³. Ces données ont été complétées par les mesures réalisées par Quideau [3].

Simulation du bilan hydrique

Les simulations du bilan hydrique seront réalisées avec le modèle IRSIS [4] à partir des données relatives au sol, à la plante, au climat et aux irrigations présentées par la suite.

Paramètres climatiques

Nous avons utilisé par la suite les données climatiques des 20 années disponibles les plus récentes (1969-1988) communiquées par R. Morel de l'Agrhymet [5] : ETP Penman décadaire de la station de Niamey Aéro et pluviométrie journalière de la station de Gotheve (plus proche poste pluviométrique de la zone d'étude pour la période considérée).

Paramètres liés à la plante

Nous ne traiterons que l'exemple d'une culture de sorgho, très largement majoritaire pendant la saison des pluies.

Nous avons choisi la méthode de calcul des coefficients culturaux proposés par la FAO [6] qui concordent bien avec les différentes données disponibles au Niger [7].

L'influence de l'alimentation hydrique sur l'élaboration du rendement a été estimée par l'utilisation de la méthode proposée par la FAO [8] :

$$1 - \frac{\text{rendement}}{\text{rendement potentiel}} = \sum K_{y_i} * \left(1 - \frac{ETR_i}{ETM}\right)$$

où i représente les différentes phases du cycle : phase végétative (1), floraison (2), formation du grain (3) et maturation (4).

Paramètres liés au sol et stock initial

Les différentes études menées sur les terrasses [9, 10] montrent une grande variabilité des propriétés des sols et de l'enracinement. Si la réserve utile prend une valeur médiane de l'ordre de 80 mm, cette valeur décroît rapidement dès que la dégradation des propriétés du sol liée à l'alcalinisation s'accroît (figure 1).

Nos conclusions ne pourront pas être acceptées par les exploitants si elles pénalisent une part trop importante des sols du périmètre. Par la suite, nous considérerons donc :

- une réserve utile de 60 mm (dépassée dans 80 % des cas) ;
- une valeur du p-facteur de 0,45 (culture de sorgho), et
- un déficit hydrique maximum de 30 mm, au-delà duquel on note un effet dépressif sur le rendement.

Nos observations montrent que le stock hydrique issu de la pré-irrigation avant labour et de la première irrigation après le semis (forte infiltrabilité sur un sol fraîchement travaillé) conduit au remplissage de la réserve utile.

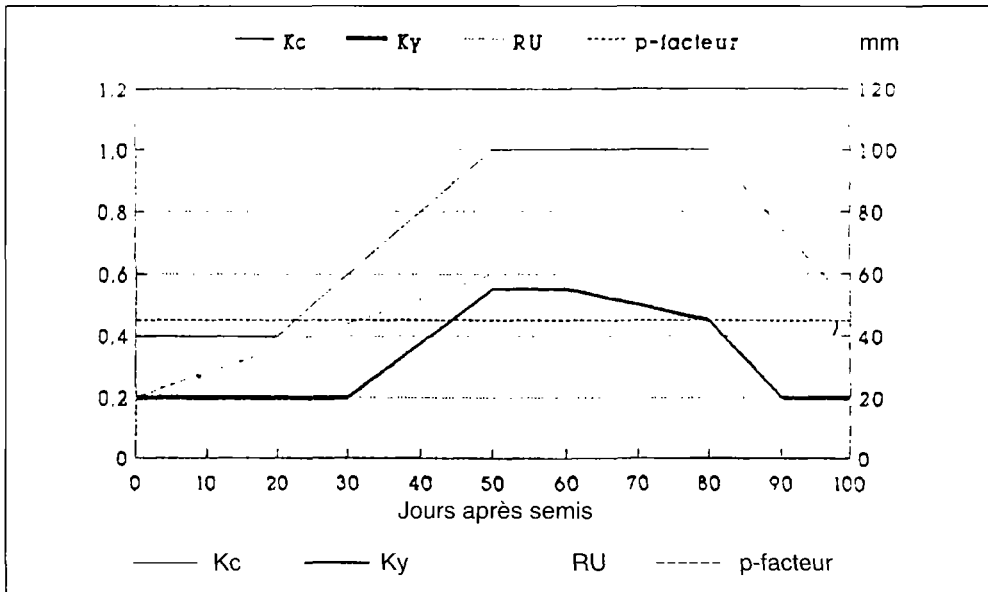


Figure 1. Paramètres utilisés pour la culture du sorgho.

Evaluation des irrigations

Nous avons utilisé une méthode d'évaluation des irrigations gravitaires à la raie, mise au point par le CIRAD [11] et reprise pour l'essentiel de la méthodologie développée par le CEMAGREF.

Les résultats [12] montrent une grande variabilité de la lame d'eau infiltrée en fonction du type de sol, de son état d'humectation et de la distance par rapport au canal d'irrigation.

Nous traiterons les exemples de 2 types de sol représentatifs du périmètre de Sona :

1. les sols argileux vertiques, qui restent bien structurés malgré une proportion parfois importante de sodium échangeable. Au cours de l'assèchement du sol, des fentes de retrait apparaissent et permettent de maintenir l'infiltrabilité du sol à un niveau élevé ;

2. les sols à texture intermédiaire, de sablo-argileuse à argilo-sableuse, qui ont une structure défavorable fortement aggravée par l'alcalinisation. Leur infiltrabilité est faible.

La dose nette (dose moyenne infiltrée sur le dernier quart aval de la raie ou probabilité de dépassement de 7/8^e) est indiquée dans la figure 2. L'efficacité de l'irrigation (dose nette/dose brute) prend une valeur de 65 %.

Nous avons aussi testé les performances d'une irrigation gravitaire en raies bouchées d'une longueur de l'ordre de 10 mètres. La dose nette apparaît indépendante du type de sol et prend une valeur de 30 mm. L'efficacité de l'irrigation est de 85 % sur ce type de raie courte.

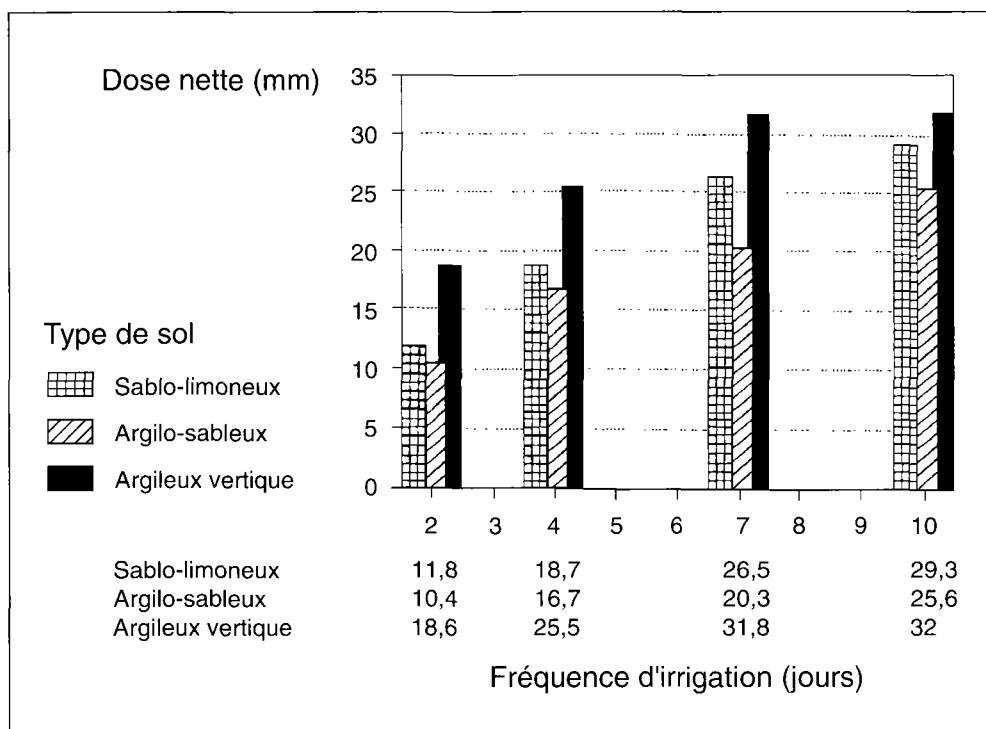


Figure 2. Performances des irrigations.

Résultats

Ruissellement dans les raies d'irrigation

Quel que soit le type de sol, on n'observe aucun ruissellement significatif pour les pluies inférieures à 10 mm (figure 3).

Pour les sols argileux ou sablo-argileux, la lame d'eau infiltrée reste faible et apparaît indépendante de la pluviométrie, à l'exclusion des parcelles fraîchement travaillées (labour, sarclage) où le ruissellement reste faible ou nul. A partir de nos données, nous obtenons la loi suivante :

$$P. \text{ eff.} = P \quad \text{si } P < 9 \text{ mm}$$

$$P. \text{ eff.} = 9 \text{ mm} \quad \text{si } P > 9 \text{ mm}$$

Sur les recouvrements sableux d'origine éolienne, le ruissellement prend aussi des valeurs assez considérables :

$$P. \text{ eff.} = P \quad \text{si } P < 12 \text{ mm}$$

$$P. \text{ eff.} = 0.25 \times P + 9 \quad \text{si } P > 12 \text{ mm}$$

Nos observations ont montré un ruissellement bien supérieur aux valeurs communément obtenues en conditions pluviales. Il peut s'expliquer dans certains cas par une forte instabilité structurale qui conduit à l'apparition d'une porosité vésiculaire élevée due aux premières humectations [10]. Mais à la simple influence de l'état structural du sol en surface, commune aux deux systèmes, nous devons ajouter :

- une fréquence d'humectation plus importante ;
- la pluie tombée sur le billon ruisselle rapidement vers la raie d'irrigation sous l'influence de la pente. Ce phénomène est accentué par la formation, sur les sols les moins stables, d'une croûte de surface de quelques millimètres dès la première pluie ;
- le passage de lames d'eau liées aux pluies ou aux irrigations conduit par dépôts successifs à la formation d'une structure lithée dans le fond de la raie qui limite l'infiltrabilité [13] ;
- enfin, la raie d'une pente régulière de l'ordre de 0,3 % canalise l'eau, qui s'écoule alors rapidement vers la collature.

Hypothèses d'exploitation du réseau

Nous traiterons les exemples de 2 systèmes d'irrigation :

- le système actuel (A) d'irrigation gravitaire en raie non bouchée. Très bien accepté par les paysans, il leur permet de maîtriser facilement une main d'eau élevée de 12 l/s, avec une charge de travail très réduite. Il conduit à une forte variabilité de la dose d'irrigation en fonction du type de sol et à un ruissellement élevé lors des épisodes pluviométriques ;
- un système (B) d'irrigation gravitaire en raies bouchées qui permettrait de supprimer le ruissellement et d'homogénéiser les doses d'irrigation quel que soit le type de sol. Par contre, un tel système conduirait à un accroissement important de la charge de travail.

A l'aide du modèle IRSIS, nous avons simulé les besoins en eau d'irrigation pour les deux systèmes abordés. L'analyse fréquentielle des résultats : évapotranspiration de la culture (tableau I), besoins en eau d'irrigation pour le système A (tableau II) et pour le système B (tableau III), a été réalisée.

Les besoins en eau sont très variables en fonction de la période et du stade végétatif de la culture. Le semis s'étale en effet sur une période de près de un mois en juillet. Dans l'élaboration du tour d'eau, différents paramètres doivent être pris en compte :

- fréquence d'irrigation nécessaire pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation, en fonction de la dose d'irrigation (variable en fonction du type de sol) ;
- fréquence d'irrigation permettant d'éviter l'apparition d'un stress hydrique après épuisement des réserves en eau facilement utilisables. Nous considérerons une limite de 30 mm au-delà de laquelle le déficit hydrique a une influence significativement défavorable sur le rendement ;
- en début de cycle, malgré de très faibles besoins, une fréquence d'irrigation minimale est nécessaire pour permettre la réalisation des travaux de préparation du sol et la mise en place des cultures ;
- le tour d'eau devra être aussi simple que possible malgré les importantes différences constatées dans les besoins, qui ne peuvent être prises en compte par une modulation de la dose d'irrigation. Nous nous limiterons à un maximum de 2 fréquences d'irrigation pendant le cycle de culture.

Tableau I. Analyse fréquentielle des besoins en eau (mm/j) et délai d'apparition d'un stress hydrique.

Juillet			Août			Septembre			Octobre		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Probabilité de dépassement de 20 %</i>											
3,09	2,38	2,65	3,74	4,32	4,75	5,06	5,53	4,75	3,76		
		2,82	2,78	2,79	3,98	5,01	5,62	5,85	6,35	5,45	4,18
10 j	13 j	11 j	8 j	7 j	6 j	6 j	5 j	5 j	5 j	5 j	7 j
<i>Besoins en eau médians (probabilité de 50 %)</i>											
2,63	1,99	2,20	3,50	4,07	4,43	4,65	5,16	4,47	3,60		
		2,38	2,37	2,46	3,67	4,66	5,28	5,50	6,08	5,20	3,93
11 j	15 j	13 j	9 j	7 j	7 j	6 j	6 j	5 j	5 j	6 j	8 j

Tableau II. Système A d'irrigation : besoin en eau d'irrigation (mm/j) et fréquence d'apport (sol 1 et 2).

Juillet			Août			Septembre			Octobre		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Probabilité de dépassement de 20 %</i>											
0	0	0,03	1,92	2,49	3,95	4,11	4,84	4,14	3,39		
		0,03	0,09	0	1,76	3,66	4,87	5,69	6,43	5,18	3,65
Sol 1 :				10 j	5 j	4 j	(4 j)	(4 j)	(4 j)	(4 j)	5 j
Sol 2 :					7 j	7 j	6 j	5 j	4 j	6 j	7 j
<i>Besoins médians (probabilité de 50 %)</i>											
0	0	0	0,25	1,79	3,31	3,10	3,61	3,46	3,09		
		0	0	0	0,99	2,95	3,83	4,95	5,91	4,75	3,38
Sol 1 :					6 j	6 j	5 j	(4 j)	(4 j)	(4 j)	6 j
Sol 2 :		4			10 j	10 j	8 j	6 j	5 j	6 j	10 j

Tableau III. Système B d'irrigation : besoin en eau d'irrigation (mm/j) et fréquence d'apport.

Juillet			Août			Septembre			Octobre		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Probabilité de dépassement de 20 %</i>											
0	0	0	0,58	0,36	2,53	3,20	3,56	4,14	3,25		
		0	0,03	0	0,17	2,53	3,73	5,69	6,43	5,18	3,65
						9 j	8 j	5 j	5 j	6 j	8 j
<i>Besoins médians (probabilité de 50 %)</i>											
0	0	0	0	0	0,18	2,14	1,92	2,51	2,80		
		0	0	0	0	1,30	2,17	3,95	5,91	4,75	3,38
								8 j	5 j	6 j	9 j

A partir de ces données, nous avons élaboré 3 hypothèses d'exploitation du réseau adaptées aux systèmes d'irrigation ou types de sol décrits précédemment.

Hypothèse 1 : Système A d'irrigation et sol argilo-sableux

Nous adopterons une fréquence d'irrigation hebdomadaire, puis tous les 4 jours au-delà du 20 août. En cas de pluie, les irrigations seront décalées du nombre de jours où les besoins en eau sont satisfaits :

- 1 jour pour une pluie comprise entre 5 et 10 mm ;
- 2 jours pour une pluie supérieure à 10 mm.

Le tour d'eau sera systématiquement repris le septième ou le quatrième jour sans pluie (en fonction de la fréquence des irrigations).

Hypothèse 2 : Système A d'irrigation et sol argileux vertique

Fréquence d'irrigation hebdomadaire, puis tous les 5 jours au-delà du 10 septembre. En cas de pluie, les irrigations seront décalées dans les conditions décrites pour l'hypothèse 1.

Le tour d'eau sera systématiquement repris le septième ou le cinquième jour sans pluie (en fonction de la fréquence prévue des irrigations).

Hypothèse 3 : Système B d'irrigation

Fréquence d'irrigation hebdomadaire, puis tous les 5 jours à partir du 20 septembre. En cas de pluie, la date prévue d'irrigation sera décalée de :

- 1 jour pour des pluies comprises entre 5 et 10 mm ;
- 2 jours pour des pluies comprises entre 10 et 15 mm ;
- 3 jours pour des pluies comprises entre 15 et 20 mm ;
- 4 jours pour des pluies comprises entre 20 et 25 mm ;
- 5 jours pour des pluies supérieures à 25 mm.

Le tour d'eau sera systématiquement repris le septième ou le cinquième jour sans pluie (en fonction de la fréquence prévue des irrigations).

Discussion des résultats

Les simulations ont été limitées aux dix dernières années (1979-1988) et à une date de semis du 20 juillet.

Les analyses fréquentielles du rendement (exprimé en pourcentage du rendement potentiel), de l'efficacité des pluies et des irrigations et le drainage moyen sont indiqués dans les tableaux IV, V et VI pour chaque système d'irrigation ou type de sol traité.

L'alimentation hydrique des cultures et le rendement attendu sont corrects, à l'exception des sols argilo-sableux où la dose d'irrigation ne permet plus de satisfaire les besoins en eau à partir de la mi-septembre, même avec une fréquence élevée d'une irrigation tous les 4 jours.

Tableau IV. Système A d'irrigation et sol argilo-sableux : performances des différentes hypothèses d'exploitation du réseau.

Hypothèse	Condition satisfaite	Rendement	Efficienne des pluies	Irrigation Dose nette	Efficienne irrigation	Drainage
1	p = 1/2	89 %	38 %	264 mm (15)	64 %	26 mm
	p = 8/10	85 %	31 %	278 mm (16)	62 %	
2	p = 1/2	78 %	38 %	226 mm (12)	64 %	22 mm
	p = 8/10	76 %	32 %	226 mm (12)	63 %	
3	p = 1/2	73 %	43 %	206 mm (11)	65 %	12 mm
	p = 8/10	71 %	35 %	206 mm (11)	64 %	

Tableau V. Système A d'irrigation et sol argileux : performances des différentes hypothèses d'exploitation du réseau.

Hypothèse	Condition satisfaite	Rendement	Efficienne des pluies	Irrigation Dose nette	Efficienne irrigation	Drainage
1	p = 1/2	100 %	25 %	412 mm (15)	56 %	105 mm
	p = 8/10	100 %	23 %	434 mm (16)	54 %	
2	p = 1/2	99 %	28 %	356 mm (12)	59 %	66 mm
	p = 8/10	98 %	25 %	356 mm (12)	57 %	
3	p = 1/2	96 %	36 %	324 mm (11)	60 %	43 mm
	p = 8/10	92 %	29 %	324 mm (11)	59 %	

Tableau VI. Système B d'irrigation : performances des différentes hypothèses d'exploitation du réseau.

Hypothèse	Condition satisfaite	Rendement	Efficienne des pluies	Irrigation Dose nette	Efficienne irrigation	Drainage
1	p = 1/2	100 %	41 %	450 mm (15)	60 %	283 mm
	p = 8/10	100 %	37 %	480 mm (16)	55 %	
2	p = 1/2	100 %	48 %	360 mm (12)	70 %	192 mm
	p = 8/10	100 %	41 %	360 mm (12)	65 %	
3	p = 1/2	100 %	49 %	330 mm (11)	77 %	160 mm
	p = 8/10	99 %	40 %	330 mm (11)	75 %	

L'efficienne totale des pluies est très faible, du fait d'une perte importante par ruissellement et drainage :

- le ruissellement lié aux raies d'irrigation non bouchées représente de 53 % (année médiane) à 61 % des pluies (dépassé 2 années sur 10). En moyenne, sur la période considérée (à partir du 20 juillet), ce sont 135 mm qui sont perdus par ruissellement ;

- le drainage est faible avec le système de raies non bouchées. Avec le système de raies bouchées, l'infiltration forcée de la totalité de la pluviométrie conduit à un excès d'eau

important percolant à travers le profil. Il est à craindre que, sur les sols les plus argileux, un tel excès d'eau puisse induire une asphyxie racinaire préjudiciable au rendement :

– ces médiocres performances trouvent aussi leur origine dans la faible valeur de la réserve utile. Le sol est incapable d'assurer son rôle de tampon, alors que l'acceptation des systèmes proposés nous contraint de viser la satisfaction des besoins en eau. Cela conduit à une réduction significative de l'efficacité des pluies, mais aussi des irrigations.

A titre d'exemple, nous avons étudié les performances de l'irrigation pour l'année 1988, considérant une réserve utile de 80 mm ; les hypothèses d'exploitation ont été adaptées : fréquence hebdomadaire repoussée jusqu'au 1^{er} septembre (hypothèse 1), 20 septembre (hypothèse 2) ou 1^{er} octobre (hypothèse 3). Cela permet d'économiser une irrigation et de réduire le drainage de 20 à 50 mm en fonction des hypothèses. L'efficacité des irrigations et le rendement progressent très faiblement, tandis que l'efficacité des pluies s'améliore d'environ 5 points.

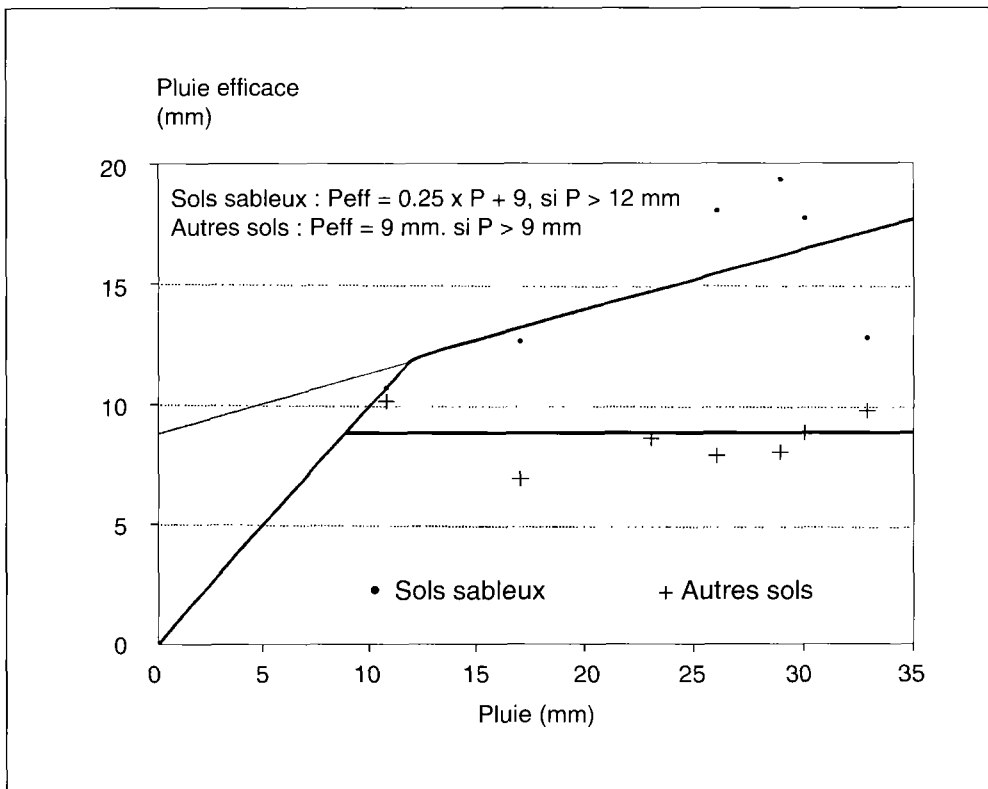


Figure 3. Efficacité des pluies.

Conclusions

Malgré un ruissellement très important lors des épisodes pluviométriques, l'irrigation gravitaire en raies non bouchées peut être conservée pour les sols argileux auxquels le caractère vertique confère de bonnes propriétés vis-à-vis de l'irrigation. Mais sur les autres sols, seule l'adoption d'un système d'irrigation en raies courtes et bouchées permet de garantir de bons rendements, avec une efficacité acceptable de la pluviométrie sur le périmètre. Dans ces conditions, l'hypothèse 3 apparaît la plus adaptée pour l'exploitation du réseau.

Si l'on souhaite conserver en l'état le système d'irrigation en raies non bouchées sur tous les sols, cela implique l'adoption d'une fréquence d'irrigation plus élevée (hypothèse 1) avec comme première conséquence une efficacité beaucoup plus faible des pluies et des irrigations. Cette option, actuellement pratiquée sur le périmètre de Sona, conduit bien vite à de grosses difficultés dans le respect du tour d'eau, tant est variable la conduite optimale de l'irrigation pour chacun des types de sol.

L'amélioration des caractéristiques physiques du sol — infiltrabilité, enracinement et réserve utile — est un objectif primordial permettant d'améliorer, entre autres, les performances de l'exploitation du réseau d'irrigation.

Commentant la démarche que nous avons dû entreprendre, nous sommes tentés de récuser l'emploi du terme "irrigation de complément", qui signifie trop souvent pour ceux qui l'utilisent que l'irrigation peut permettre une augmentation sensible des performances des cultures vivrières par l'apport judicieusement réparti de quelques dizaines de millimètres. Dans un aménagement hydro-agricole, une autre logique l'emporte. Elle a pour objectif l'intensification maximale des cultures (donc la satisfaction des besoins en eau) avec un coût minimal permettant de rentabiliser l'investissement. Cela conduit à répartir les besoins totaux en eau d'irrigation sur la période la plus longue par l'organisation stricte d'un tour d'eau. Pendant la saison des pluies, cette organisation doit être maintenue et les pluies n'interviennent que pour moduler secondairement le rythme des irrigations.

Références

1. Féau C. (1976). Etude pédologique des périmètres de Lossa et Sona. 28 p. + annexes + cartes.
2. Valles V., Marlet S., Barbiero L., Pouessel F. (à paraître). Alcalinisation des sols et irrigation en zone soudano-sahélienne. I : Etude des mécanismes géochimiques responsables de la dégradation.
3. Quideau (1982). ACC Lossa : Rapport analytique de la campagne 1980-1981.
4. Fao (1987). IRSIS : Irrigation scheduling information system. Rome, 119 p.
5. Morel R. (à paraître). Atlas agroclimatique.
6. Doorenbos J., Pruitt W.O. (1975). Les besoins en eau des cultures. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 24. Rome, 114 p.
7. Marlet S. (1991). Note sur les besoins en eau des cultures au Niger. 15 p. + annexes.

8. Doorenbos J., Kassam A.H. (1979). Yield response to water. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 33. Rome, 193 p.
9. Boyer G. (1990). Améliorations foncières et suivi du comportement hydrodynamique des sols par méthode neutronique. 22 p. + annexes.
10. Valet S. (1990). Mission d'évaluation du projet "Expérimentation-Développement des terrasses du Niger". 55 p.
11. Girousse J.C. (1986). Etude du rendement hydraulique de l'irrigation à la raie en vue de la conception de petits périmètres irrigués en zone soudano-sahélienne. Mémoire ENITRS.
12. Marlet S. (à paraître). Evaluation des performances des irrigations sur les terrasses du fleuve Niger. Périmètre de Lossa et Sona. 27 p.
13. Bozza J.L. (1989). Mise en valeur hydro-agricole des terrasses du fleuve Niger. Rapport final. Volet recherche. 29 p. + annexes.

32

Stratégies antirisques en agriculture Exemple du modèle Target-Motad

E. NGOUNIO-GABIA

*Département des recherches de la Société centrafricaine de développement agricole
(SOCADA), RCA*

L'importance du risque en agriculture provient, entre autres, des variations de production et de l'instabilité des prix consécutives aux phénomènes naturels, aux effets structurels et à l'environnement économique instable.

Les chercheurs ont tenté de classer ces multiples risques. Selon Labonne [1], l'agriculteur court au moins deux risques : le risque naturel caractérisé par une baisse de production liée aux perturbations climatiques, aux épidémies, aux feux de brousse, etc., et le risque économique qui se manifeste par une baisse du revenu liée à une diminution des prix provoquée par l'excédent de l'offre. Les pertes sont parfois atténuées par un système de compensation des prix.

Barry [2] distingue le risque d'entreprise du risque financier. Le risque d'entreprise comprend production et rendement, marché et prix, pertes et désastres, changement de droit fiscal, programme gouvernemental, accords commerciaux, performance de travail et changement technologique. Ce type de risque cause des variations de revenu net. Le risque financier, en revanche, est lié aux variations des taux d'intérêt, à la disponibilité de crédit, aux changements de conditions de prêts (*loan*) et de crédit-bail. Ce type de risque est important si le ratio d'endettement est élevé. Le risque d'entreprise et le risque financier

accentuent la variabilité, l'amplitude et la probabilité des pertes financières au niveau de l'exploitation agricole.

A ce niveau, des stratégies ont été développées pour réduire la fluctuation à la fois de la production et des prix (intrants et vente). Elles comprennent la diversification des cultures, le contrôle des prix, le changement de système de production, la flexibilité et l'assurance informelle, telle que l'irrigation, l'utilisation de variétés à cycle court et à cycle long, de variétés de semence résistantes, des pesticides et des insecticides.

Cette étude présente à titre d'illustration un exemple de modélisation devant permettre une intégration de stratégies antirisques. Mais avant d'aborder l'objet même de cette communication, il convient de préciser les notions de risque et de décision en avenir incertain.

Risque et décision en avenir incertain

Notion de risque et d'incertitude

Le mot risque serait d'origine italienne (*risco*) qui signifie "incertain" [3]. Il est "l'action de « oser » ou de « s'exposer » à des chances d'accident ou de perte" (Dictionnaire Oxford), ce qui implique un choix et une orientation à travers l'action qui peut augmenter ou diminuer l'importance de perte pour le décideur.

Les économistes ont tenté de quantifier risque et incertitude pour une analyse de décision. L'analyse traditionnelle de prise de décision en avenir incertain fait la différence entre risque et incertitude sur la base de l'information dont dispose le décideur [4]. Le risque suppose une connaissance à la fois des événements et de leurs probabilités de distribution, ce qui n'est pas le cas de l'incertitude. Probabilité de distribution sous-entend la probabilité objective opposée à la probabilité subjective¹. La théorie moderne de décision, décision agricole incluse, trouve que la distinction entre probabilités objectives et probabilités subjectives n'est pas utile en travail empirique [5], particulièrement en programmation agricole où les données servant à l'estimation de la distribution des rendements sont souvent limitées à des séries chronologiques courtes, ou dues à des anticipations subjectives de l'agriculteur [6]. Risque ou incertitude supposent que l'action sélectionnée a des conséquences dont la portée n'est pas entièrement connue par le décideur, mais l'approche présume que les données disponibles sont utilisées pour leur analyse [7].

1. La probabilité objective s'appuie sur la répartition des événements. Son exemple est le lancement de pièce de monnaie. La probabilité subjective "s'interprète comme une mesure du degré de confiance qu'un individu a dans la vérité d'une proposition particulière". Une de ces difficultés est l'obtention des valeurs numériques, exemple la loterie.

La définition de Robison et Fleisher est retenue car elle décrit mieux le concept moderne de risque et d'incertitude : "Le risque est une classe d'événements incertains qui affectent le bien-être des agents économiques."

Décision en avenir incertain

L'approche la plus communément admise en matière de décision en avenir incertain s'appuie sur la théorie de l'espérance d'utilité. Une activité X_1 n'est préférée par rapport à X_2 que si $E(U(Y_1)) > E(U(Y_2))$ où E désigne la valeur espérée [8]. L'attitude individuelle face aux risques est décrite par différentes formes fonctionnelles que prend la fonction d'utilité : une fonction d'utilité linéaire implique une attitude neutre pour le risque ; une fonction d'utilité concave implique une aversion pour le risque ; une fonction d'utilité convexe sous-entend une préférence pour le risque. Toutefois, un individu peut avoir une fonction en certains points concave et en d'autres points convexe.

L'attitude face au risque dépend de plusieurs facteurs : les objectifs personnels, les ressources financières, les probabilités perçues et l'importance des gains et des pertes, ainsi que le temps. Ces facteurs sont importants car ils aident à développer des modèles qui évaluent le mieux les décisions en avenir incertain.

Modèles de programmation antirisque

Risque et incertitude ont été intensément étudiés, aussi nous nous limitons à la structure théorique de quelques modèles de programmation mathématique compatibles avec la théorie d'utilité, notamment Mean Variance (espérance-variance), MOTAD (Minimization of total absolute deviation) et quelques modèles *Safety-First*.

Espérance variance (E-V)

L'analyse E-V a pris ses origines en théorie de portefeuille pour expliquer la diversification comme un choix rationnel des décideurs [9]. Ce choix est déterminé par l'espérance de revenu $E(Y)$ et la variance $V(Y)$ associé. L'analyse vise à minimiser la variance et l'ensemble d'efficacité E-V peut être dérivé à l'aide de l'algorithme de programmation quadratique qui est cependant coûteux pour des grands modèles.

Le modèle MOTAD

Pour éviter les coûts élevés liés au calcul de E-V, Hazell (1977) a développé MOTAD, une approximation de l'analyse E-V pouvant être formulée avec l'algorithme linéaire. MOTAD ne pénalise pas de larges déviations comme le fait E-V et produit des résultats semblables à ceux de la programmation quadratique.

King et Robison, toutefois, indiquent que si les distributions ne sont pas normales, l'ordre établi par MOTAD n'est pas efficient.

Modèles *Safety First*

Différents des précédents, les modèles *Safety First*, en français “sécurité d’abord”, visent à offrir un minimum de revenu pour faire face à toutes les dépenses d’entreprise, remboursement des dettes et charges familiales [6].

Les premiers modèles développés par Roy [10], Telser [11], et Kataoka [12] présentent un handicap du fait qu’il sont difficilement incorporés au modèle de programmation mathématique. Celui de Low [13] qui présente cet avantage exige, pour être solvable, un revenu objectif (Target T) suffisamment petit par rapport au niveau de toutes les contraintes définies dans l’équation, d’où son inadaptation pour un environnement à haut risque.

En conclusion, il existe de nombreux modèles dont aucun n’est complètement satisfaisant au niveau de l’exploitation agricole, du fait des anticipations subjectives des agriculteurs. Le modèle adapté dépend du problème spécifique, des objectifs de la recherche, des considérations liées à la disponibilité des données, aux coûts et au calcul [14]. Cette étude retient un des modèles *Safety First* (Target MOTAD) développé par Tauer en 1983 [15] qui permet une certaine déviation à partir du revenu cible et prend en compte à la fois le risque et le revenu. Ces deux attributions sont détaillées dans le chapitre suivant.

Exemple de stratégies antirisques au Target-MOTAD : cas du Nord-Dakota

Le Target MOTAD a été utilisé pour développer un plan optimal de production dans le comté de Williams, région à haut risque du nord-ouest du Nord-Dakota, aux Etats-Unis [16]. La stratégie avait comme objectif d’empêcher le revenu de baisser au-dessous d’un minimum fixé par l’agriculteur. Un ensemble d’options politiques ont été testées en vue de minimiser les fluctuations de prix et de rendements et d’étudier leurs conséquences sur la stabilité des revenus.

Le Target MOTAD

La structure théorique de Target MOTAD est développée sur la base du modèle *Safety First*, signifiant que l’agriculteur préfère d’abord la sécurité (minimisation du risque), et cherche ensuite à améliorer son revenu (maximisation du profit). Cette double attribution, qui consiste à intégrer à la fois le risque et le profit, caractérise le modèle proposé.

Formulation mathématique

Le Target MOTAD est une extension de l’algorithme de programmation linéaire qui intègre le risque au modèle de programmation linéaire standard. Sa forme mathématique se présente comme suit :

$$\text{Max } E(Z) = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (4,1)$$

sujet à :

$$\sum_j A_{ij} X_j \leq B_i \quad (4,2)$$

$i = 1, \dots, m$

$$T - \sum_j C_{rj} X_j - Y_r \leq 0 \quad (4,3)$$

$r = 1, \dots, s$

$$\sum_{r=1}^s P_r Y_r = G \quad (4,4)$$

$$\Gamma = M \longrightarrow 0$$

$$X_j, Y_r > 0$$

$E(Z)$	: revenu espéré de l'exploitation agricole ;
C_j	: revenu espéré de l'activité ou culture j ;
X_j	: niveau de l'activité, aussi appelé variable de décision ;
A_{ij}	: coefficients techniques, besoins techniques de l'activité j pour la ressource ou la contrainte i ;
B_i	: niveau de ressource i disponible, appelé aussi le côté droit de l'équation (RHS) ;
T	: niveau de revenu préfixé ou cible (Target) ;
C_{rj}	: revenu de l'activité j pour l'observation r ;
Y	: déviation en dessous du revenu cible pour l'observation r ;
P_r	: probabilité que l'observation r se produise ;
Γ	: paramètre variant de M à 0 ;
m	: nombre des équations représentant des ressources ;
s	: nombre des observations ;
M	: grand nombre ou moyenne de déviation au-dessous du revenu cible.

La fonction objective maximise le revenu espéré, correspondant au revenu agricole anticipé, résultant du plan de production optimal des niveaux d'activité qui utilisent les ressources disponibles de l'équation. Ces ressources comprennent souvent la terre, le capital et les autres caractéristiques et/ou facteurs de production propres à l'exploitation agricole.

L'écart entre revenu réel et minimum est calculé par l'équation 4.3. Si le revenu minimum est inférieure à T (Target), la différence est transférée à l'équation 4.4 par l'intermédiaire de la variable Y_r . L'équation 4.4 représente la somme des déviations négatives après les avoir pondérées par leur probabilité d'occurrence, P_r .

Le modèle contient un paramètre Γ que l'on peut faire varier pour délimiter une "frontière efficace" du risque. Il représente la déviation de revenus en dessous du revenu cible. On montre qu'une augmentation du niveau de risque augmente le revenu espéré du projet (fonction objective) dans un intervalle donné. Si la déviation du revenu sort de cet intervalle, le projet devient alors impossible. La frontière efficiente tracée par Γ représente toutes les solutions optimales du projet. On notera aussi que les paramètres C_j , A_{ij} et B_i doivent être estimés et/ou déterminés. La modèle étant linéaire, il s'ensuit que toutes les hypothèses de linéarité sont implicitement maintenues sous Target MOTAD.

Présentation matricielle du modèle

La matrice de Target MOTAD (tableau I) (TM) peut être schématisée comme suit.

Tableau I. Structure de Target MOTAD.

Maximiser :	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Sujet à :								
a_{11}	a_{12}	a_{13}						$\leq b_1$
a_{21}	a_{22}	a_{23}						$\leq b_2$
a_{31}	a_{32}	a_{33}						$\leq b_3$
Observations :								
1	c_{11}	c_{12}	c_{13}	y_1				$\geq T$
2	c_{21}	c_{22}	c_{23}		y_2			$\geq T$
3	c_{31}	c_{32}	c_{33}			y_3		$\geq T$
4	c_{41}	c_{42}	c_{43}				y_4	$\geq T$
5	c_{51}	c_{52}	c_{53}					y_5
	$.2y_1$	$.2y_2$	$.2y_3$	$.2y_4$	$.2y_5$			$\geq \Gamma$

Les stratégies utilisées

Les stratégies testées cherchent à minimiser les fluctuations des prix et des rendements agricoles. Elles concernent le programme agricole du gouvernement fédéral et l'assurance agricole à risques multiples ainsi que les stratégies de production.

Stratégies de production

Les stratégies retenues sont la diversification des cultures, les pratiques culturales sur jachères et en culture continue, soit avec labour classique (*Recrop*), soit sans labour (*Notill*).

Les cultures considérées pour la diversification sont le blé, blé dur de printemps et blé d'hiver, orge, seigle, lin, tournesol et carthame. La diversification offre un revenu potentiel relativement stable grâce à une diversité de produits. Si la probabilité qu'une culture

donnée engendre une bonne production est compromise, le revenu total de l'exploitant est moins affecté que si la superficie totale était allouée à cette seule culture. Pour que la diversification soit efficace, les activités ou cultures considérées doivent avoir une faible corrélation de prix et de rendements entre elles. En d'autres termes, elles ne doivent pas être soumises au même risque.

La jachère et la culture continue sont aussi des stratégies de production. La jachère est une pratique culturale qui offre des rendements élevés et stables grâce à une accumulation accrue de l'humidité du sol, une accumulation d'azote et un contrôle des adventices [17]. Les autres bénéfices de la jachère sont la stabilité de rendement et la répartition saisonnière du travail, mais ces avantages n'ont d'impact réel sur le revenu que si la jachère est intégrée à un système de production cohérent.

La culture continue, de son côté, implique des coûts unitaires élevés en intrants par rapport aux cultures sur jachère. Le système de rotation ou succession de cultures est limité seulement à deux cultures. Premièrement, le carthame en culture continue est planté après le blé, l'orge, l'avoine, le lin et le seigle sur jachère. La logique est que ces cultures ne peuvent pas succéder au carthame, dans le plan de rotation, parce que cette culture épuise le sol. Ensuite, le blé d'hiver en culture continue sans labour n'est planté qu'après les autres céréales (blé de printemps, durum, orge, avoine et seigle), non sur les sols auparavant occupés par du carthame ou du tournesol.

Le programme agricole du gouvernement fédéral

La variation de prix de produits agricoles affecte le revenu agricole en l'absence d'un système de garantie de prix. Le programme fédéral aux Etats-Unis en matière agricole est un ensemble de mesures destiné à assurer la stabilité du revenu en fixant des prix objectifs (*Target prices*) pour les cultures concernées. Grâce à ce programme de prix objectifs, les variations de prix sont atténuées par des montants compensatoires ou des subventions. Ces montants sont versés aux agriculteurs lorsque le prix du marché est inférieur au prix objectif. De ce fait, le prix objectif représente un prix connu et constant pour l'agriculteur. Le système offre donc un soutien financier aux agriculteurs associés à ce programme.

Malheureusement, toutes les cultures ne sont pas couvertes. Les cultures concernées pour l'Etat du Nord-Dakota (*the 1985 Act*) sont le blé, l'orge et l'avoine. Par conséquent, le risque lié aux variations de prix existe toujours dans le cas des autres cultures. Pour les cultures couvertes par le programme, le coût de la minimisation de l'incertitude s'observe à travers la valeur et la quantité de la superficie qu'il faut "geler" (*set aside*) pour avoir le droit de participation au programme. Cette superficie non cultivée est exigée dans un but de conservation de l'environnement.

Assurance agricole à risques multiples

Les variations de rendements sont une importante source de risque d'entreprise et proviennent de plusieurs facteurs : conditions atmosphériques, maladies des plantes et erreurs d'exploitation. L'assurance, en agriculture, réduit la variabilité du revenu due aux bas rendements. Elle offre une protection (garantie) contre des pertes de cultures, particulièrement les pertes occasionnées par des catastrophes (phénomènes naturels). Elle offre la possibilité de substituer un coût connu, prime d'assurance, à un prix imprévisible dû aux pertes de

rendement et/ou de qualité [18]. De cette manière, elle offre une liquidité financière nécessaire pour maintenir l'exploitation agricole en vie en cas d'importantes pertes de rendement, et reste en effet une technique de gestion de risque d'entreprise fiable pour stabiliser le *cash-flow* de l'entreprise agricole.

Deux niveaux de couverture sur les trois disponibles (75 %, 65 %, 50 %) sont considérés : 75 et 65 %. Le paiement des indemnités représente la différence entre le rendement garanti et la moyenne des rendements des dix dernières années déclarées par l'agriculteur multipliée par le prix d'indemnisation et le niveau de protection choisi. L'assurance à risque multiple (MPI) est disponible pour toutes les cultures susmentionnées (tableau II).

Tableau II. Prix d'indemnisation (MPI) dans le Nord du Dakota en 1988.

Culture	Unité	Inférieur	Moyen	Supérieur
Blé	bush	2,00	2,25	2,60
Orge	bush	1,00	1,25	1,50
Lin	bush	3,00	4,00	4,50
Avoine	bush	0,60	0,80	1,05
Seigle	bush	0,80	1,20	1,65
Carthame	livre	0,50	0,60	0,70
Tournesol	livre	0,50	0,60	0,70

Source : [18]

NB : 1 livre = 0,4536 kg. Le poids du bush varie selon la nature du produit.

La logique de cette combinaison de mesures antirisques est que l'agriculteur obtient une garantie de prix en utilisant le programme fédéral de prix objectif et une garantie de rendements par le paiement d'assurance. Ces différentes stratégies sont définies conformément à la structure matricielle du modèle de programmation linéaire. Pour chaque stratégie, les activités (X_j) sont définies, les coefficients techniques (A_{ij}) estimés et les contraintes déterminées.

Les résultats

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans le tableau III. Le risque est défini comme la déviation négative par rapport au revenu objectif. Pour l'agriculteur, le revenu cible doit couvrir ses charges d'exploitation, le remboursement de dettes et les charges familiales. Ils sont fixés dans cette étude à \$ 15.000, \$ 20.000 et \$ 25.000.

Le revenu net maximum de \$ 36.752 est le même pour les trois niveaux de revenus cible, mais varie avec le degré de risque. Les changements de risque ou de déviation négative par rapport au revenu cible affectent le niveau du revenu espéré ainsi que celui des activités considérées (tableau IV).

D'une manière générale, les résultats empiriques révèlent que les stratégies de production associées au programme fédéral et à l'assurance agricole (MPI) ont un impact significatif sur la réduction de variabilité de revenu et l'augmentation du revenu total espéré (tableau IV).

Tableau III. Frontière efficiente de l'exploitation calculée par le modèle Target MOTAD.

Revenu antic. \$	Niveau risque \$	Assolement en acre des cultures rentables du modèle					
		Jachère	Sol N.Exp	BléP DP/AS75	Carth.R AS65H	Orge/R DP/AS65	BléH/NT DP/AS65
Revenu cible = \$ 15.000,00							
36752	400	89,00	76,00	165,00	165,00	0,00	135,49
35973	0	157,89	52,27	191,63	210,16	79,50	0,00
Revenu cible = \$ 20.000,00							
36752	1 000	89,00	76,00	165,00	165,00	0,00	135,49
35164	600	163,64	53,34	59,05	59,05	79,50	0,00
Revenu cible = \$ 25.000,00							
36752	2 500	89,00	76,00	165,00	165,00	0,00	135,49
34826	2 000	135,21	76,00	110,49	18,00	79,50	190,00

H : prix d'indemnisation supérieur ;

N. Exp : sol non exploité ;

AS : assurance ;

R : culture continue avec labour ;

DP : programme agricole (fédéral) ;

NT : culture continue sans labour.

Tableau IV. Effets des aides compensatoires (AC), de l'assurance (AS) et des systèmes de culture sur le revenu (\$/acre) moyen et sa variabilité : cas du blé.

Stratégie	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart Type	C.V
Blé de printemps cultivé sur jachère					
Marché	32,28	-11,56	117,03	34,37	1,07
INS 75%H	35,35	10,06	115,17	29,95	0,85
DP	44,47	12,47	125,95	31,64	0,71
DP/INS 65%H	46,96	12,62	125,06	28,31	0,60
*DP/INS 75%H	47,54	15,72	124,10	27,23	0,57
Blé en culture continue avec labour					
Marché	17,90	-52,68	156,58	58,08	3,24
INS 75%H	24,85	-16,23	152,00	48,29	1,94
DP	36,85	-52,68	171,40	55,01	1,49
DP/INS 65%H	42,97	-15,61	168,80	46,20	1,08
*DP/INS 75%H	43,80	-10,57	166,82	44,40	1,01
Blé en culture continue sans labour					
Marché	18,90	-44,36	83,46	41,13	2,18
INS 75%H	20,60	-16,64	78,78	33,52	1,63
DP	37,94	-37,78	93,39	36,63	0,97
DP/INS 65%H	40,17	-19,69	90,54	29,96	0,75
DP/INS 75%H	39,65	-16,64	88,71	28,36	0,72

* Stratégie dominante ;

H : prix d'indemnisation supérieur ;

DP : programme agricole (fédéral) ;

INS : Assurance.

La contribution de l'assurance à la réduction de la variabilité du revenu est plus efficace à 75 % de couverture que celle à 65 %. Le programme fédéral, en matière agricole, est plus efficace que la stratégie d'assurance. Malheureusement, le programme fédéral n'est pas offert à toutes les cultures. Malgré cet avantage certain sur le MPI, la participation au programme fédéral seule n'est pas la stratégie optimale. La meilleure solution est obtenue lorsque toutes les options stratégiques sont appliquées. Le projet intégré optimal comprend :

- a) le blé de printemps sur jachère (BP), sous le programme fédéral avec paiement d'assurances aux prix et rendements supérieurs ;
- b) le carthame en culture continue avec labour ou sur jachère à un niveau de risque réduit, avec paiement d'assurances aux prix et aux pourcentages supérieurs ;
- c) l'orge en culture continue avec labour, sous le programme fédéral et avec un paiement d'assurances ;
- d) le blé (dur d'hiver) en culture continue sans labour, sous le programme fédéral, avec un niveau d'élection de prix élevé et à 65 % ou 75 % de couverture.

L'assolement optimal sans contrainte de risque correspond évidemment au revenu le plus élevé. Le coût du risque représente donc la différence de revenus entre les deux revenus extrêmes, soit environ \$ 2.000. Toutefois, les deux niveaux de revenu ont été comparés sur la base de critère d'efficience (dominance stochastique). Mais le résultat révèle qu'aucun niveau de revenu n'est plus efficient que l'autre. La décision finale revient donc à l'agriculteur qui optera pour un revenu correspondant à l'assolement qui lui semblera le mieux indiqué, compte tenu du niveau de risque qu'il est disposé à accepter.

Par ailleurs, les résultats montrent que les stratégies de production associées au programme fédéral d'aide compensatoire et à l'assurance agricole ont plus d'impact sur la réduction de la variabilité du revenu espéré et son augmentation que sur les mesures prises séparément. La contribution de l'assurance à la réduction de la variabilité du revenu est plus efficace à 75 % de couverture que celle à 65 %. Le programme fédéral en matière agricole est plus efficace que la stratégie d'assurance, mais n'est pas offert pour toutes les cultures. La meilleure solution est la combinaison des trois options.

Conclusion

Le modèle Target-MOTAD aboutit à proposer une stratégie optimale. Elle est la résultante fournie par de multiples combinaisons des diverses mesures antirisques. Ce modèle répond aux anticipations de l'agriculteur en l'aidant à une prise de décision en avenir incertain. De plus, poser des paramètres de déviations négatives en dessous du revenu cible permet d'obtenir une frontière efficiente entre risque et revenu. En outre, les simulations fournissent des informations appréciables sur l'anticipation de revenus agricoles et le niveau de risque auquel est confronté l'agriculteur. Le Target MOTAD est alors compatible avec la théorie d'espérance d'utilité.

Les données analysées de l'une des stations expérimentales de l'université du Nord-Dakota offrent une bonne fiabilité sur les variables météorologiques et les systèmes de cul-

ture ; elles sont des représentations réelles du risque agricole. En terme d'inférence, toutefois, une seule station expérimentale est insuffisante pour généraliser les conclusions à l'ensemble de l'Etat concerné et à l'agriculture des pays en développement, dont les conditions sont bien différentes. En revanche, l'outil conceptuel élaboré est bien valable pour rendre compte du comportement aussi bien de l'agriculteur européen ou américain que du paysan africain, car "la différence entre le paysan africain et l'agriculteur européen est une différence de degré et non de nature" [19]¹.

Références

1. Labonne M. (1989). Du risque naturel au risque économique dans les pays à faible revenu. In : *Le risque en agriculture*. Editions de l'ORSTOM, Paris.
2. Barry P.J., Hopkins J.A., Beker C.B. (1983). *Financial management in agriculture*. 3rd Ed. Interstate Printed and Publishers, Inc., Danville, IL.
3. MacGrimmon K.R., Wehrung D.A., Stanbury W.T. (1986). *Taking risk : the management of uncertainty*. Free Press, New York, NY.
4. Knight F.H. (1921). *Risk uncertainty and profit*. Houghton Mifflin Boston, MA.
5. Robison L.J., Fleisher B. (1983). Risk : can we model what we can't define or mesure ? In : *Risk management strategies for agricultural product firms : perspectives and research issues*, AE - 8350, Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University.
6. Hazell P.B.R., Norton R.D. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Mac Millan Publishing Company, New York NY.
7. Boehlje M.D., Vernon R. Eidman. (1986). *Farm management*. John Wiley and Sons, New York, NY.
8. Von Neumann J., Morgenstern O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
9. Markowitz H.M. (1959). *Portfolio selection*. John Wiley and Sons, New York, NY.
10. Roy A.D. (1952). Safety first and the hedging of assets. *Econometrica*, 20 : 431-39.
11. Telser L.A. (1955). Safety first and hedging. *Review of Economic Studies* : 1-66.
12. Kataoka S. (1963). A stochastic programming model. *Econometrica*.
13. Low A.R.C. (1976). Decision taking under uncertainty : A linear programming model of peasant farmer behavior. *Journal of Agricultural Economics*, 25 : 311-20.

1. Le point de vue de Boussard est édifiant et il convient de le restituer ici dans son intégralité. "Les paysans africains réagissent de façon analogue à celle de leurs collègues européens, à condition de tenir compte de leur situation particulière, en particulier leur pauvreté, qui leur interdit l'accès aux techniques intensives en capital. Mais on est toujours le pauvre de quelqu'un, et les paysans européens, eux aussi, voudraient bien utiliser les techniques plus intensives en capital : de ce point de vue, la différence entre le paysan africain et l'agriculteur européen est une différence de degré, non de nature".

14. Mapp H.P. Jr, Helmers G.A. (1984). Methods of risk analysis for farm firms. In : Risk management in agriculture : Barry J.P. (ed.). Iowa State University Press, Ames, IA.
15. Tauer L.W. (1983). Target MOTAD. *American Journal of Agricultural Economics* : 606-10.
16. Ngounio-Gabia E. (1990). Integrated strategies to reduce farm risk in Northwestern North Dakota. Unpublished M.S. Thesis, Department of Agricultural Economics, North Dakota State University, Fargo, ND.
17. Johnson R.G., Ali M.B. (1982). Economics of wheat fallow cropping systems in Western North Dakota. *Western Journal of Agricultural Economics* : 67-77.
18. Hughes H., The economic impact of crop insurance on North Dakota countries. North Dakota State University extension service, Fargo, ND. Publication adapted from a publication prepared by H. Doug Jose, University of Nebraska, and Fred Benson, University of Kentucky, and from information provided by the American Association of crop insurance, Washington, DC.
19. Boussard J.M. (1990). Les stratégies antirisques des producteurs limitent-elles leur productivité ? Montpellier.
20. Meyer J. (1977). Choice among distributions. *Journal of Economic Theory*, 14 : 326-36.
21. Freers T.F. (1970). Geology and ground water resources, Williams County, North Dakota : Part 1, Geology. North Dakota Geological Survey Bulletin, 48 : 55 p.
22. Jensen R.E. Climate of North Dakota. National weather service, North Dakota State University, Fargo, ND.

L'auteur remercie MM Boussard J.M. et Reyniers F.N. pour leurs observations.

33

Rainfall and agricultural risk : results from India' semi-arid tropics

E.J. BAKKER

Projet PSS, Station du Sahel, BP 22, Niono, République du Mali.

Introduction : agricultural risk and insurance

Farming involves many risks. Natural hazards, such as drought, floods and hurricanes, and economic hazards, such as fluctuations in input and output prices, can have disastrous impacts on farmers' income. Especially small-scale farmers in developing countries, who have virtually no savings and limited access to credit may suffer from income fluctuations. As a consequence, farmers use production strategies through which they try to keep the risks within manageable limits [1, 2]. Although it is difficult to judge whether farmers' measures to cope with risk are effective or not, it is clear that a considerable part of the risks remains. This observation lies at the root of the interest in public policies aimed at reduction of income risk of rural households.

One such policy is crop insurance, which is a means to dampen the consequences of variability of crop yield. Farmers participating in a crop insurance scheme pay a premium each year and in years in which yields per hectare are below a certain level, indemnities are paid to the farmer. Yields are estimated by taking crop cuttings, either in the fields of the

insured individual (individual approach) or in selected fields representative for an area covering the fields of a number of farmers (area approach). The latter procedure requires that the area is sufficiently homogeneous and that farmers' yields are sufficiently correlated with the yields measured.

In Hazell *et al.* [3] the experiences with crop insurance in many countries (among others USA, Japan, Mexico and Brazil) are reported and the pros and cons of this risk reducing public policy are discussed. The editors conclude in the epilogue that, although appealing in theory, crop insurance has proved disappointing in practice. One of the main reasons is that the administrative costs are too high compared to the benefits in risk reduction that farmers receive. Moreover, poor data on crop yields complicate or hinder the writing of actuarially sound contracts. In case the individual approach is followed, the moral hazard problem (the risk of paying indemnities due to intentional acts or omissions of the insured farmer) is also said to be an important factor of the high costs of crop insurance. As a possible alternative to crop insurance that might provide a satisfactory degree of protection from rainfall induced income risk for rural households the editors mention rainfall insurance.

The main purpose of a rainfall insurance scheme would be to insure its participants against the consequences of unfavorable rainfall, such as drought or excess rainfall. As usual in insurance, the participants would have to pay a premium each year (or some other period) and in years in which an insured event occurs, they would receive an indemnity. An important feature of rainfall insurance is that the payment of indemnities would depend, not on the actual losses experienced by insured farmers, but only on the rainfall as officially recorded by a, presumably nearby, rain gauge. The idea behind rainfall insurance is that in rainfed agriculture climatic circumstances, and especially rainfall, are the most important factors contributing to income risk of rural households. If the rainfall is favorable, farmers will generally have good yields, and if not, harvests will be low. A rainfall insurance scheme would have to be organized in such a way, that, in the latter case, it would help farmers to overcome the consequences through payment of indemnities.

As a policy measure aimed at reduction of agricultural risk, rainfall insurance has much in common with crop insurance. Besides the much lower cost at which it could be implemented, there are two reasons why rainfall insurance might better mitigate the consequences of climatic risks than crop insurance. The first is given by Dillon [4], who states that, under arid and semi-arid conditions, no single factor is more highly correlated to both crop and forage yields than rainfall. Since forage yields are important as well, rainfall may relate better to total farm production and income than crop yield alone. The second reason, referred to as the area variability argument, is that crop production not only depends on yield, but also on the acreage planted with that crop. Walker and Ryan [5] found that average variability in cultivated area appeared to be higher than the yield variability for each important crop in a number of villages in India's semi-arid tropics. This implies, of course, that an insurance, only aimed at reduction in yield variability, cannot be very successful in reducing variability of production, let alone that of income, and that variation in rainfall, through the combined effect of rainfall on both area and yield, may explain more of the variation in crop revenue than variation in crop yield alone does. As a consequence, rainfall insurance would be expected to be a better instrument to tackle the problem of income risk of rural households than crop insurance.

That rainfall insurance might indeed have its merits is illustrated in a study by the World Bank [6], which contains a graphical comparison of the foodgrain production in India and a rainfall index for the years 1963 to 1988. In general, a shortfall in the rainfall index went accompanied by low foodgrain production, which confirms the expected dependence of grain production on rainfall.

Methods, data and outline of the paper

The arguments in favor of rainfall insurance as a means to dampen (crop) income fluctuations of rural households can be reformulated and elaborated as follows. First, in dryland agriculture, rainfall is expected to have a large impact on the crop yields (per unit of area), including the byproducts, like straw. Second (the area variability argument), rainfall is thought to influence the decisions of farmers with respect to cultivated area and the cropping pattern. The latter refers to the fractions of the total cultivated area allotted to the various crops. A farm household's crop income (that part of income that is earned by cultivation of crops) is, by definition, equal to the product of the total cultivated area and the average monetary returns per unit of cultivated area. These average returns are thought to depend, in turn, on the cropping pattern and on the physical crop yields of the various crops. These arguments together lead to the hypothesis that rainfall variability is an important cause for crop income volatility. Since for a large number of households, crop income is the most important component of total income, the latter would also strongly depend on rainfall. The arguments are depicted in figure 1 below.

In Bakker [7] the hypotheses are put to the test by means of an analysis of the relationships between rainfall and various economically relevant variables. In this paper an extended summary is given. In the analysis use was made of the data resulting from the village level studies (VLS) carried out at the International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), in Hyderabad, India. Data collection procedures for the VLS are thoroughly described in Singh *et al.* [8], and summarized in Walker and Ryan [5]

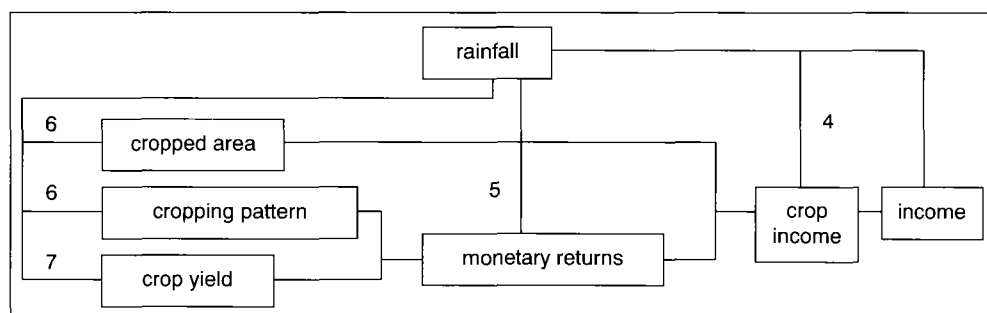


Figure 1. Schematic representation of the impact of rainfall on (crop) income. The numbers refer to the sections in which the relationships are discussed.

and Bakker [7]. The data we use cover 10 years (1975-1984) and 40 households in each of three villages that were selected as representatives of three agroclimatically different regions in India's semi-arid tropics. For each sample household the data base contains socioeconomic information, given by year, on variables like assets, income, consumption, investments, and employment. For each of the plots cultivated by any of the households in any of the 10 years, data are given on the cultivated crops (bullock and human), labor activities, the amounts of other inputs, and those of the outputs. Daily rainfall data were also collected in these villages during the whole period. Some general information with respect to the agricultural situation are given in section "The villages : rainfall and agriculture".

The most fundamental requirement for successful operation of a rainfall insurance scheme is that rainfall should have a large and identifiable impact on total income of households. Therefore, the first step in the analysis was to carry out an analysis of income in relation to rainfall. When it appeared that it was not possible to find a relationship between household income and rainfall, a second step was taken: analysis of crop income and rainfall. The results, which are similar to those of the analysis of household income, are presented in section "Rainfall and crop income". It was therefore attempted to answer the question which of the arguments in favor of rainfall insurance is/are invalid, in other words, which of the arrows in figure 1 should be removed.

The results are presented in sections 5 and 6, as shown in figure 1. In section "Rainfall and plot-wise monetary returns" attention is given to the extent to which various factors have "caused" the variation of the monetary returns from crop cultivation. The area variability argument is discussed in section "Impact of rainfall on farmer's planting strategy", where we examine the extent to which cropped area and the cropping pattern vary as a consequence of variation in the rainfall at the beginning of the growing season. In section "Rainfall and crop yield: the example of sorghum in Shirapur" it is investigated to what extent variation in crop yields can be attributed to differences in rainfall patterns. Special attention is given to the case of sorghum production in Shirapur.

The villages : rainfall and agriculture

The three villages under consideration are Aurepalle in Mahbubnagar district (State: Andhra Pradesh), Shirapur in Sholapur district, and Kanzara in Akola district. The two latter villages are part of Maharashtra State. In Aurepalle caste plays a much more dominant role in the socioeconomic position of households in this village than in the Maharashtra villages. Greater wealth (more land) and more formal education are strongly associated with higher caste in Aurepalle. In Shirapur, the active tenancy market and the labor opportunities from the Maharashtra Employment Guarantee Scheme (MEGS) are important characteristics of the village economy. The distribution of land and income is much less unequal than in the other two villages. The region to which Kanzara belongs, is much more prosperous than the dryer regions of Sholapur of Mahbubnagar. Big differences in wealth exist between households, but this has little to do with caste. The cultivation of

cotton, which is labor intensive, guarantees employment for many. As in Shirapur the MEGS offers off-farm labor opportunities.

Rainfall in the villages is received for the greater part during the south-west monsoon, which is active from mid June to mid October, see table I. In Shirapur and Aurepalle every year farmers run a great risk of insufficient or untimely rainfall, whereas Kanzara can be called 'rainfall assured'. In spite of the similar rainfall characteristics the agricultural situation in Aurepalle and Shirapur differs quite a bit, which is caused by the differences in soil and in irrigation potential. In Mahbubnagar wells generally yield more water, and in that region well irrigation is supplemented by irrigation from tanks, in which runoff surface water is collected. In Aurepalle agriculture has intensified around the dug wells, and relatively little attention is paid to dryland farming. Fallowing marginal land is still a common practice, although the duration of the fallowing intervals is shortening. The main crops in the village are rice, castor (an oilseed crop) and sorghum. In Aurepalle the generally red soils (alfisols) differ considerably from field to field. This soil heterogeneity is characteristic for the whole of India's semiarid tropics. One of the important risk factors in Aurepalle is the time of the onset of the monsoon.

Table I. Monthly rainfall figures (mm) for Aurepalle, Shirapur and Kanzara. Period: May-November for the years 1975-1984; Tot: annual total.

	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	
May	—	24	13	65	117	13	17	60	19	3	Aurepalle
Jun	—	109	69	79	76	176	58	40	57	38	
Jul	—	163	14	166	52	89	190	87	0	178	
Aug	102	147	258	227	90	71	185	19	152	56	
Sep	162	107	17	302	150	54	301	153	139	102	
Oct	168	0	98	41	1	4	95	48	79	146	
Nov	2	114	0	61	51	13	0	45	0	18	av. st.d.
Tot	434	697	522	1010	575	428	964	489	449	572	660 220
May	19	2	4	165	19	3	32	36	0	0	Shirapur
Jun	15	75	73	91	59	140	111	43	66	35	
Jul	336	59	17	207	58	35	54	100	59	125	
Aug	163	155	52	132	67	149	98	37	90	40	
Sep	284	31	108	134	313	60	370	150	447	44	
Oct	170	7	69	89	37	0	21	74	105	158	
Nov	0	11	71	95	118	24	11	145	0	4	av. st.d
Tot	978	343	411	962	672	419	740	598	790	425	633 233
May	—	0	0	18	20	0	0	0	0	0	Kanzara
Jun	152	118	294	192	153	216	146	120	75	204	
Jul	75	234	294	385	175	179	241	247	190	127	
Aug	73	199	181	230	279	287	346	111	294	160	
Sep	215	235	41	35	218	19	290	153	122	45	
Oct	34	0	106	14	6	0	0	23	31	151	
Nov	0	144	100	45	21	0	0	10	0	0	av. st.d.
Tot	449	956	1050	1075	1048	765	1093	798	738	758	873 207

In Shirapur, the predominance of deep black soils with their high water retention capacity, and the low and unstable rainfall are the main reasons why the larger part (some 70 %) of cropped area is cultivated in the postrainy season. Almost 90 % of it is allocated to local sorghum. Besides sorghum, mainly other food crops are grown, especially pulse crops (chickpea, pigeonpea) and safflower (an oilseed crop), for which the lighter soils are used during the rainy season. An important risk factor is whether enough rainfall water is stored in the soils on which the postrainy season sorghum is grown. One of the ways farmers have come to deal with risk is by means of tenancy contracts through which risk is shared between the land owner and the tenant.

In Kanzara the soils are rather homogeneous and are described as deep (10 %), medium (70 %) and shallow vertisols. Of total cropped area, 50 % is used for production of cotton, 25 % for sorghum (local and hybrid varieties) ; other frequently grown crops are mungbean and groundnut. Because of the dependable rainfall, crop failure is a relatively rare phenomenon. If a short duration variety is planted in the rainy season and if there is enough soil moisture in the upper soil layers after the harvest, it is sometimes possible to establish the second crop. This is, however, deemed too risky by farmers. In stead, they opt for a longer duration crop in the rainy season. This choice situation is one of the few where weather related risk seems to play a role in the decision making process of the Kanzara farmers.

Rainfall and crop income

As indicated in section "Methods" it did not appear to be possible to find a relationship between household income and rainfall. The analyses used were the same as those discussed in this section with crop income as the variable of analysis. The first explanation for these unexpected results is that the differences in rainfall between the years were not large enough to generate sizable income differences. For "rainfall assured" Kanzara this might be enough explanation; from table I it appears that in that village, rainfall was either sufficient or abundant, with 1975 as the only exception. For the other villages, where differences in rainfall patterns were much more pronounced, a similar argument may nevertheless be given, which runs as follows. Since harsh climatic conditions frequently occur, farmers use those crops and such technology, that subsistence is more or less guaranteed, even in bad circumstances. They do not invest in riskier activities, which under favorable conditions would yield higher returns. Only in extreme situations (like the 1972 drought in Maharashtra) will farmers fail to reach their subsistence goal. On the other hand their strategy will hardly yield extra benefits if rainfall is favorable. Significant income effects will thus be restricted to extremely bad conditions, and one can argue that such conditions did not prevail in 1975-1984. Nevertheless, if we look at the rainfall data of table 1 for Aurepalle and Shirapur, we would be surprised if the differences in annual rainfall patterns, other things being equal, would not translate into income differences.

In Shirapur, there is the Maharashtra Employment Guarantee Scheme that could be pointed at as a reason why rainfall seems to have so little impact on income. Walker and Ryan [5] note that the question of how much the MEGS has helped in smoothing income variability of participants has received little empirical attention, but that data from Shirapur suggests that off-farm employment has reduced total income variability.

Finally, it is important to note that the effects of given rainfall patterns are not fixed quantities. Households can and do try to influence, or more precisely reduce, these effects. As is discussed in section "Impact of rainfall on farmers' planting strategy" responses of farm households may e.g. take place with respect to the timing of sowing and the choice of crops. This, and other household strategies including gifts, remittances from/to friends or relatives, and off-farm labor opportunities, obscure the income effect of rainfall. In order to clarify the effects of rainfall on the economic situation of households, an analysis of crop income which should more clearly exhibit a dependence on rainfall, is presented in the rest of this section.

The data base used for the analyses presented consists of a little less than 400 cases (40 households, 10 years) for each of the three villages. The first technique employed to analyze crop income is the analysis of variance (ANOVA). Table II presents the percentages "explained" by the model for the various (combinations of) categorical variables. The three land owner groups are landless/small farm, medium-sized farm, and large farm households. In Aurepalle and Kanzara the differences in crop income between land owner groups are pronounced, while this is less the case for Shirapur.

Table II. Percentage of crop income variance "explained" by differences in household categories and/or years; df = degrees of freedom. For single categories, a * denotes significance at the 1% level. For double categories, a + denotes significance at the 1% level of the year effects within the household groups.

	Aurepalle	Shirapur	Kanzara	df
Variance (10^{**6} Rs ²)	20.3	21.1	49.0	
	(%)	(%)	(%)	
Land Owner Group	50.0*	11.6*	56.3*	2
Caste	53.1*	7.6*	17.6*	3
Year	6.5*	1.1	1.4	9
Household	70.0*	55.8*	87.4*	40a
L.O.Group and Year	64.8+	14.3+	62.7+	29
Within-household variance (10^{**6} Rs ²)	6.8	10.4	6.9	

a The number of observed households slightly differs per village.

As for the, presumably rainfall induced, year effects, the first thing to note about table II is that year differences "explain" much less of the total crop income variation than the differences between (groups of) households. In Shirapur, no significant year effects were found, neither for the year categories separately nor for the interaction effects with land

owner groups. In Kanzara the year effects per se were also not significant, but in the combined analysis with land owner groups they were. Besides, the year-land owner group interactions were also significant at 1%. In Aurepalle the year effects on crop income measured for all households together are significant at the 1% level. The year-land owner group interactions are also significant. The significant interaction effects for Kanzara and Aurepalle indicate that year effects on crop income are different for different land owner groups. For a rainfall insurance scheme aimed at reduction of crop income variation this indicates that insurance contracts would have to be tailored to different farm size groups.

As a second step linear regression models were estimated for each land owner group separately, with (the logarithm of) crop income as the dependent variable. The explanatory variables are family size, age, schooling (both of the head of the household), and total value of the assets of a household in a given year. Two types of models were estimated, one with a trend variable, and one with dummy variables representing the various years. If differences between years would be important, one would expect the adjusted R^2 for the models with the year dummies to be considerably higher than those for the trend models. Except for the case of the large farmers in Aurepalle, however, this difference was not significant.

Should we really conclude from these results that rainfall insurance would be without effect, i.e. would not reduce total income or crop income risk of households in the semi-arid regions of India? If the allocation of the available productive household assets (land, labor, capital) would not be changed in case of participation in a rainfall insurance scheme, then the results of our analysis strongly suggest that the answer is: yes. But what if economic behavior would drastically change as a result of the opportunity of insurance against unfavorable rainfall? This might for instance happen in a case where farmers previously did not use the technology with the highest expected returns, because its returns strongly depend on adequate rainfall. Since they can now insure themselves against rainfall patterns that lead to low returns of that technology, they might start using it. The question then is, whether such a situation really exists in semi-arid India. Walker and Ryan [5] note that there are fewer examples of a conflict between expected profitability and risk than one would think. Nevertheless they mention three actual situations in which risk is important in determining adoption of a certain "technology":

- the traditional cereal/pulse intercrop vs. castor in Aurepalle;
- investment in dug well irrigation in all villages;
- local cotton intercrop vs. hybrid sorghum in Kanzara.

Decision on the second issue depends on the risk of digging a dry hole, and has little to do with rainfall related risks. The other two issues are influenced indeed by risks induced by variability in rainfall. In these cases rainfall insurance might induce an increase in the cultivation of the more remunerative crops, castor in Aurepalle, and hybrid sorghum in Kanzara, provided that rainfall insurance would really reduce the risks associated with them. This illustrates how an instrument aimed at reduction of household risk might have the effect of an increase in average household income. It is difficult to make any quantitative statements about the consequences the changes resulting from rainfall insurance would have on expected income and on income risk. Nevertheless it seems clear

from the foregoing that the benefits of rainfall insurance for Shirapur households would be negligible; for the other two villages these benefits would mainly have to come from a shift in cultivation practices. In Aurepalle 25 % of cropped area is sown under cereal/pulse intercrop, so that at most 25 % of their land would yield higher returns, while in Kanzara this is 30 % (the percentage of cropped area under local cotton). The benefits accruing from rainfall insurance would thus depend on the difference in expected return per hectare between the two technologies, and on the extent to which rainfall insurance can avert the risks associated with the more remunerative technology. Based on the evidence presented and discussed in this section, we expect that for the regions represented by the three villages under study these benefits would be small.

Rainfall and plot-wise monetary returns

This section is devoted to the analysis of the profitability of crop cultivation, measured per unit of cropped area: monetary returns (expressed in Rs/acre). If land is scarce, as is the case in India, such a measure is important and one would expect differences in annual rainfall patterns to translate into differences in crop yields and consequently in monetary returns.

For the analysis use is made of plot level data. Of each plot, cultivated by any of the sample households, amount and value of all inputs and outputs were, for as much as possible, observed. Subtracting the costs of the inputs from the value of the outputs, both expressed in Rupees per acre, yield the monetary returns per acre. Only plots cultivated with frequently grown crops are considered here. As can be expected, there are large differences in average returns between unirrigated and irrigated plots. Therefore our analyses refer to four situations: irrigated and non-irrigated agriculture in Aurepalle, and non-irrigated agriculture in Shirapur and Kanzara.

A number of ANOVA's were carried out, of which the main aim was to find out to what extent the variation in the monetary returns can be attributed to differences between years. As in the previous section, the differences between years are in first instance supposed to reflect the impact of the annual rainfall patterns.

Analysis of variance with more than one categorical variable (year, and soil type/plot value/season of cultivation/ownership status-owned, rented, or share-cropped), and the estimation of comprehensive mixed models allowed us to account for the interaction effects of the year with other factors as well. The only results formally presented here are those with the year of cultivation as categorical variable. In table III, the number of observations, the estimated variance and the percentage of this variance that can be attributed to differences between years, is given for the 4 situations considered.

The plots are also classified according to the cultivated crop(s). In the classification we only consider one crop per plot. If more than one crop is grown on a plot it is classified according to the crop that is given as the first crop in the data base. This crop is supposed to have been the most important crop on that plot.

Table III. Percentage of the variance of returns per acre “explained” by differences between years; degrees of freedom = 9; s^2 = estimated variance; n=no. of observations.

	Aurepalle		Shirapur	Kanzara
	irrigated	unirr.	unirr.	unirr.
s^2 (106 Rs ² /acre ²)	86.4	8.7	16.1	19.4
n	451	930	1567	1291
	(%)	(%)	(%)	(%)
Year	36.4	15.8	4.7	7.1
Crop	.1	2.6	6.0	10.7
Crop and Year	42.2	34.8	14.4	26.7

The largest year effects were found for irrigated agriculture in Aurepalle, which is precisely the situation for which we had hypothesized no significant rainfall induced year effects. The second largest year effects on monetary returns to crop husbandry are for unirrigated plots in Aurepalle. Nevertheless, the year effects per se are not as pronounced as might be expected. The annual differences “explain” only 15 % of the total variance of these returns. If we consider the crop-year interaction the picture changes. The year, crop and crop-year interaction effects “explain” around 40 % of the variance, which is much more than the sum of the percentages “explained” by crop and year separately, indicating that the year effects differ per crop.

The annual differences in average returns from unirrigated plots in Kanzara, although significant, “explain” only 7 % of total variation of the plot wise returns. Given the relatively abundant and stable rainfall in this village, this was not unexpected. Interaction effects of year with the crops grown were also considerable in Kanzara. Crop and year together, including interaction effects, “explain” around 35 % of the variance.

In Shirapur, less than 5 % of total variation in returns stems from annual differences. Considering the interaction effects with plot value, soil type, season, or even crop, does not alter the very small annual differences between monetary returns.

In terms of the possibility to reduce the annual variation in returns per acre by means of rainfall insurance, the results indicate the following. First, in Aurepalle and Kanzara at most 40 % of the variation in returns per acre could be removed by nullifying the year effects. However, to achieve this may prove to be a difficult task, as it requires a rainfall insurance scheme tailored to the needs of various crops. Moreover, a rainfall insurance scheme based on a distinction between various crops is also complex to understand, and therefore less appealing to farmers. In Shirapur, less than 10 % of variation in returns per acre could be removed by canceling the year effects.

Impact of rainfall on farmers’ planting strategy

In this section the area variability argument is evaluated, i.e. an analysis is made of the extent to which variation (between years) in the rainfall patterns has caused variation in either the cropped area, or the cropping pattern. Only the main results are discussed. For

more details, for a discussion on causes of area variability other than rainfall, and for an account of the difficulties involved in the analysis as a consequence of the phenomenon of intercropping and the tenancy contracts, reference is made to Bakker [7]. For each village, the results are based on the annual totals of the areas under various crops cultivated by the 40 sample households together.

For "rainfall assured" Kanzara there appeared to be little variation in either the total cropped area or the cropping pattern. It is therefore concluded that, if the experiences in Kanzara during the decade 1975-1984 can be extrapolated, rainfall induced area variability is a phenomenon of no importance in the agroclimatic region of which Kanzara is the representative.

The conclusion from the analysis of the variation of cropped area in Aurepalle is that, for the years that were considered, rainfall has had little influence on the size of total cropped area, which does not exclude the possibility that in some years cropped area would be considerably reduced as a consequence of unfavorable rainfall. Such years, however, are likely to be rare, and seem to require rainfall patterns that fall in the class of disasters. Under less dramatic circumstances, there is some scope for unfavorable rainfall to translate into a smaller cropped rainy season area, but usually this can be made up for by means of a larger cropped area in the postrainy season.

The decision on which rainfall seems to have made the largest impact, is the time of planting of unirrigated rainy season crops, which, in turn, influences the cropping pattern, late planting being associated with a reduction of the area under sorghum (often intercropped with pigeon pea and millet), and an increase of the area under castor. In this respect, it is illustrative to show the unirrigated area under sorghum and castor as a percentage of the unirrigated rainy season area, in response to the time of the onset of the monsoon. The figures are given in table IV, and confirm that this effect existed not only for 1976, the year for which the substitution of castor for sorghum was noticed by Walker and Ryan [5], but also for 1979, and to a lesser extent for the last three years. In the interpretation of the figures for the last three years, however, care should be exercised, as there also seems to be a downward trend in the area under sorghum.

Table IV. Percentage of unirrigated rainy season area under sorghum and castor in response to a l(ate) or e(arly) monsoon in Aurepalle, 1975-1984.

	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
monsoon	e	l	e	e	l	e	e	l	l	l
sorghum	51	28	49	43	32	44	34	30	29	28
castor	39	67	45	51	61	47	58	61	67	68

Based on conversations with farmers and on observations from Walker and Ryan [5], the hypothesis was formulated that in Shirapur rainfall has an impact on the area cultivated in the rainy season, a late monsoon being associated with a smaller rainy season area. In the rainy season only the lighter upland soils can be planted; the low-lying deep vertisols are always cultivated in the postrainy season. From observations by Bhende [9], it was

gathered that rainy season planting preferably takes place before mid July, and does not occur after the end of July. The rule of thumb that, if the soil profile is dry, around 30 mm of rain is needed to allow the emergence of a crop (see Popov [10]) appeared to be a good basis for the prediction of the first sowing possibility in Shirapur.

A rule that indicates the first possible planting date does not directly indicate how the size of the area sown in the rainy season depends on rainfall. Two more aspects can be expected to play a role: the amount of rain received in the weeks before that date, and the "follow-up rains". Together they determine the length of the period in which planting is possible. In order to formalize the above ideas, a table was made in which the three aspects of rainfall (earliest planting date, amount of rainfall received before that time, and "follow-up rains") have been evaluated on a 1 to 5 scale. The results are given in table V, which also contains the area planted in the rainy season, as a percentage of total operated area.

The results, then, indicate that it would be difficult, if not impossible, to exactly order the years according to the extent to which they were favorable for rainy season planting. Only extreme years can be identified, and then especially those for which rainy season planting is not possible, like 1979. This does, however, not mean, that in such a year total sown area is also reduced, as it appears that the post rainy season area usually consists of almost all operated area that is not used in the rainy season. This is even true in years in which total annual rainfall (before the start of the postrainy season) is around 400 mm (1977, 1980, and 1984) or less (1976, 330 mm).

Table V. Evaluation of the first planting possibility, the amount of rain received until that time, and the follow-up rains in Shirapur. The numbers 1 through 5 denote very favorable, favorable, not too bad, unfavorable, planting impossible, respectively. In case planting is late (4) follow-up rains no longer matter, as far as planting is concerned. Unirrigated rainy season area is given as a percentage of operated area.

	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Planting time	4	3	2	1	5	2	1	3	3	4
Amount	1	2	3	1	–	1	1	3	3	1
Follow-up rains	–	2	4	1	–	4	2	2	2	–
Rainy season area	34	36	19	34	4	18	21	21	28	27

Since post rainy season crops (sorghum) are, on average, more remunerative than rainy season crops like pigeonpea, which are planted to restore soil fertility, losses from rainfall unfavorable for rainy season cropping are not felt immediately, and, if rainy season cropping is possible in the next year, probably hardly felt at all, except perhaps for the lower availability of e.g. pigeonpea used for home consumption. Therefore, there hardly seems to be a case for paying indemnities in a year in which rainy season sowing is impossible.

Rainfall and crop yield: the example of sorghum in Shirapur

In general, variation in the yield from a crop stems from variation in many factors, which can be grouped under:

- plot characteristics: soil fertility (availability of nutrients, like organic carbon, nitrogen, phosphorus, potassium), water retention capacity, drainage, slope, soil depth;
- external factors: rainfall, temperature, solar radiation, pests, diseases;
- management: field preparation, planting time, choice of variety, weeding, irrigation, use of chemical fertilizer and insecticides.

Besides the large number of factors influencing yield, there are at least two other reasons why it is extremely difficult to quantitatively estimate the impact of these factors on the yield of a crop. First, many of the factors interact with each other. For example, the availability to the plant of certain elements in the soil (N, P, etc.) depend not only on the amounts present in the soil, but also on the acidity of the soil. Second, most factors are time-dependent, and their effects have to be accounted for during the complete period between sowing and harvest.

During the decade 1975-1984 the number of observed plots planted solely with sorghum in the postrainy season in Shirapur amounted to 645. For all observations the following information is available: year, household, plot code, soil type (four categories: deep, medium and shallow black, and miscellaneous), value of the plot per acre, date of sowing, grain yield, byproduct in kg/acre, and the amount of seed used per acre (seed rate). The latter three are given in kg. per unit of area. The data come from the ICRISAT VLS plot data base. In the sequel this data set will be referred to as data set I.

The plot data base was supplemented by an analysis of a considerable number of soil samples taken from the fields owned or operated by the VLS sample households [11-13]. The plot coding system ensured the compatibility of the data with the VLS data base. Laboratory analyses yielded the following soil characteristics: water holding capacity, cation exchange capacity (CEC), pH, organic carbon (C), available phosphorus (P), electrical conductivity (EC), exchangeable cations (Ca, Mg, K, and Na), and mineralizable nitrogen (N). For the case of Shirapur, 54 soil samples were taken and subsequently analyzed, resulting in 176 cases matching the yield data (for CEC and water holding capacity only 56 matching cases were obtained).

Concurrently with the soil sampling, Dvorak [13] investigated what soil classification system is used by the farmers. This system was obtained and coded for 57 plots in Shirapur, which resulted in 202 cases that could be used in the yield data analysis. The set of data for which the indigenous soil type is known, is data set III. Sets II and III have 163 cases in common, so that set II is almost a subset of data set III. According to Dvorak [13] the most important soil characteristics by which Shirapur farmers differentiate their fields are, first, depth and color in comparison to the "ideal" deep, black soils, second, the hardness, and third, the water storage. The hardness of the soil determines the ease of cultivation, and rate of water infiltration.

For each of the three data sets discussed above, one or more models are postulated, and their parameters estimated. The aim of this exercise is to find out to what extent the factors

that were also discussed can “explain” the observed variation in sorghum yields. Use is made of mixed models, that may contain fixed and random categorical variables, and continuous covariates. The first step in the estimation process is the choice of the explanatory variables and the way these are included in the model (as a random or a fixed factor, or as a covariate). Next, the model parameters are estimated, and, if one or more parameters is not significant, the one with the highest p-value is removed from the model. This process is repeated until all parameters are significant.

The dependent variable in all models is the sorghum yield in kg/ha. The list of the models to be estimated is given below. In the epithet of a model the data set with which the estimation process was carried out is indicated. Those explanatory variables that are included in the final model of which the results are presented, are underlined>. Those that are not underlined did not appear to make a significant contribution to the “explanation” of the variation of the dependent variable. For each of the explanatory variables it is indicated how they are included in the model: as a variable with random, or fixed effects, or as a covariate.

Model I	Random:	household
	Fixed:	year, soil, soil-year interaction
	Covariate:	seed rate, and sowing date (Julian day)
Model II	Random:	household
	Fixed:	year
	Covariate:	seed rate, sowing date, potassium, sodium, calcium, organic carbon, pH, electric conductivity, magnesium, phosphorus, mineralizable nitrogen, water holding capacity
Model IIIA	Random:	household
	Fixed:	year, indigenous soil, ind. soil-year interaction
	Covariate:	seed rate and sowing date
Model IIIB	Random:	household
	Fixed:	year, soil, soil-year interaction
	Covariate:	seed rate and sowing date
Model IIIC	Random:	household
	Fixed:	year, soil, ind. soil, soil-ind. soil interaction
	Covariate:	seed rate and sowing date

The results of estimation of the model parameters are presented in table VI. The final models result from excluding, one by one, those explanatory variables that did not contribute significantly to the “explanation” of the observed crop yield variance. Significance levels were 1% for model I, and, because of the smaller number of observations, 5 % for the other models. Only once was this rule not followed, in model IIIB for the variable year, because this is one of the key variables in our analyses. The fractions of the variances that are “explained” by the various models range from 29 to 46.

The model in which the differences between years are the most important is model I. Without the year variable and the soil-year interaction, the estimated residual variance

would be 17 % higher. For model II this figure is 10 %, for models IIIA to IIIC it is 5 % or less. Therefore, in general the findings are similar to those of earlier sections: the differences between years are not large, when compared to those within years.

Table VI. Mixed model estimation results for yields of unirrigated sole cropped sorghum in Shirapur. The symbols have the following meaning: n: number of observations; np: number of parameters in the model;

V_y : estimated variance of the dependent variable (yield);

V_e : estimated variance of the residual term;

If the variable year (including its interaction effects) would be omitted from the model, $d(V_e)$ denotes the resulting increase in V_e , df the resulting decrease in np, and X^2 the resulting increase in $-2LML$. The latter statistic has a Chi-squared distribution with df degrees of freedom, if the model assumptions are correct. The probability value of X^2 with respect to this distribution is given by p.

	n	np	V_y	V_e	$d(V_e)$	-2LML	x^2	df	p
Model I	643	42	177	115	15.6	7850	101.1	36	.000
Model II	176	15	236	134	13.8	2170	25.2	9	.003
Model IIIA	202	15	203	128	11.4	2487	24.9	9	.003
Model IIIB	202	14	203	145	5.9	2510	14.7	9	.099
Model IIIC	202	30	203	109	7.7	2440	22.4	9	.008

In model I, the factor that “explains” most of the variation is the soil type. In the first model estimated with data set III the indigenous soil classification system is used. Models IIIB and IIIC were estimated to compare the two ways of differentiating between plots. The indigenous soil classification appears to be more relevant for predicting sorghum yield than the one used in the VLS data base, which is an interesting result, and is in line with Dvorak [13], who found, with respect to the chemical and physical soil characteristics, that the classification used by Shirapur farmers was the more informative one. From the results from model IIIC, it appears that it is useful to know both soil types. Including the indigenous soil classification also seems to better bring out the yield differences between the years. In model IIIB, with only soil as the other fixed component, the p-value of the year component is as high as 0.1, while with the indigenous soil type it is less than 0.01. Soil-year interactions were insignificant in all three models for set III, which seems to confirm our earlier remark in the discussion of the results for model I.

In general, in model II most of the soil properties, initially included as covariates, appeared not to be (linearly) related to observed sorghum yield, and were excluded from the model. The remaining covariates of model II are factors that tend to change only slowly in the course of time. One might attach considerable import to this observation but for two considerations. First, the model is clearly an overfitted one, as simply all soil properties in the data base were initially used as explanatory variables. Therefore, the resulting model should be viewed at best as one that deserves further testing. Second, one of the four significant soil characteristics, phosphorus, has the wrong sign, and would have to be removed if one would want to use such a model for any relevant purpose. What remains, though, is that the variable that might a priori be selected as the most relevant one, organic

carbon, is indeed the one that appears to have the largest impact of all. The a priori expectation is based on the relationship of the amount of organic carbon in the soil and the availability of nitrogen and phosphorus [14] and the fact that it is a fixed soil property, ensuring that its measured value is likely to be close to the value at the time(s) that the yields were observed.

Conclusions and final remarks

The conclusions from the results presented are informally and qualitatively presented in figure 2, where it is indicated that the main flaws in the arguments in favor of rainfall insurance are found at the start. Of the three hypothesized direct effects of rainfall only that on the cropping pattern was confirmed by the data (in two of the three villages). The rainfall induced changes in the cropping pattern, however, do not seem to lead to much lower monetary returns, which further reduces the prospects of rainfall insurance as a means to reduce (crop) income volatility of rural households in India's semi-arid tropics.

A number of explanations can be put forward to explain these unexpected findings.

First, at the household level there are so many variable factors that influence the outcome of the economic activities, that the factor rainfall is not overriding. If one looks at a larger scale, a region, or a whole country, it will in general be easier to find the influence of rainfall on, e.g. the grain production.

Second, the farmers have adjusted themselves to the environment in which they live. Part of this environment is the climate, including its variation. Farmers follow a production strategy that takes account of this variation. Part of this strategy is to avoid disasters. This too, reduces the influence of rainfall on the economic situation of farmers.

Third, as for the seeming lack of influence of rainfall on crop yields, this is in part an economic matter. If farmers would use chemical fertilizer in order to enhance soil fertility, there would undoubtedly be a stronger dependence on rainfall. The gains of the (presumably) higher average yields would not be enough to cover the cost of the fertilizer.

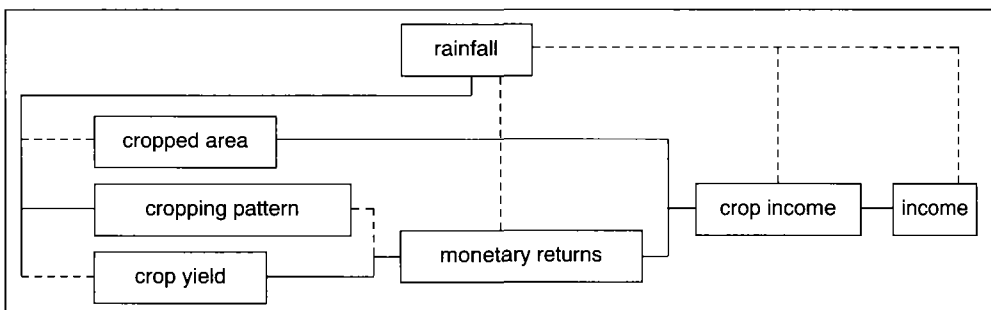


Figure 2. Schematic representation of the impact of rainfall on various economic quantities. Dotted lines represent relationships that were not confirmed by the data.

Acknowledgment

All who have contributed to this paper through comments, discussion, or practical help are gratefully acknowledged. Special thanks go to Caspar Schweigman, Tom Snijders, Geerten Battjes, Meine van Noordwijk, and Tom Walker. Thanks are also due to ICRISAT for making the VLS data available to me, and the "Stichting Steun door RABO-banken" for their funds.

References

1. Walker T.S., Jodha N.S. (1986). How small farmers adapt to risk. In: Hazell *et al.*
2. Huijsman A. (1986). Choice and uncertainty in a semi-subsistence economy: a study of decision making in a Philippine village. PhD-thesis, Netherlands, Agricultural University, Wageningen.
3. Hazell P., Pomareda C., Valdès A. (1986). Crop insurance for agricultural development : issues and experiences. Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA.
4. Dillon J.L. (1986). Institutional possibilities to minimize risk at farm level. Paper presented at the Sixth Agriculture Sector Symposium, World Bank, Washington D.C., 6-10 Jan.
5. Walker T.S., Ryan J.G. (1990). Village and household economies in India's semi-arid tropics, Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA.
6. World Bank (1989). India: recent developments and medium-term issues. The World Bank, Washington D.C., USA.
7. Bakker E.J. (1992). Rainfall and risk in India's agriculture: an ex-ante evaluation of rainfall insurance. PhD-thesis, University of Groningen, Faculty of Economics, P.O. Box 800, 9700 AV Groningen, The Netherlands.
8. Singh R.P., Jodha N.S., Binswanger H.P. (1985). ICRISAT village studies data management system. Mimeo, Economics Group, Resource Management Program. ICRISAT, Patancheru, 502 324 A.P. India.
9. Bhende M.J. (1983). Agro-economic profile of selected villages in Sholapur region of Maharashtra State (India). Economics Program VLS Series, ICRISAT, Patancheru P.O., 502 324 A.P. India.
10. Popov G.F. (1984). Crop monitoring and forecasting in ICRISAT. Agrometeorology of sorghum and millet in the Semi-Arid Tropics. Proceedings of the International Symposium, 15-20 Nov. 1982, ICRISAT Center, Patancheru, A.P., 502 324, India.
11. Dvorak K.A. (1987). A social science perspective on evaluating and designing component research: a case study of nitrogen fertilizer and post-rainy season sorghum in India. Paper presented at the workshop on social science perspectives on managing agricultural technology, Lahore, Pakistan, 24-27 September.
12. Dvorak K.A. (1987). Documentation of soils data for village level studies plots. RMP-Economics, ICRISAT, Patancheru P.O., 502324 A.P. India.
13. Dvorak K.A. (1988). Indigenous soil classification in semi-arid tropical India. Progress Report 84, RMP-Economics, ICRISAT, Patancheru P.O., 502324 A.P. India.
14. Janssen B.H., Guiking F.C.T., Van Der Eijk D., Smaling E.M.A., Wolf J., Van Reuler H. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). Geoderma 46: 299-318.



Achevé d'imprimer par Corlet, Imprimeur, S.A.
14110 Condé-sur-Noireau (France)
N° d'Imprimeur : 2290 - Dépôt légal : janvier 1994

Imprimé en C.E.E.

Dans cet ouvrage, sur le rôle des aléas climatiques en agriculture tropicale semi-aride africaine, les plaintes sur la sécheresse sont remplacées par des propositions constructives pour mieux valoriser les ressources pluviométriques disponibles.

Les recommandations s'enracinent dans plus de vingt ans d'évaluation des flux hydriques dans les cultures en stations agronomiques et en milieu paysan.

Les méthodes de diagnostic des risques fondées sur des indicateurs hydriques écophysiologiques sont validées tant à l'échelle de la plante, que de la parcelle, des bassins-versants ou de la région.

Elles seront précieuses pour choisir des variétés adaptées, des techniques culturales économes en eau, ou concevoir des aménagements, appropriables par les paysans africains en amoindrissant leurs risques.

"La Gestion Agroclimatique des Précipitations : une voie de réduction du *gap* technologique de l'agriculture tropicale africaine" tel est le message de progrès, trop ignoré des auteurs.

In this volume on the role of climatic uncertainties in tropical farming in semi-arid conditions in Africa, complaints about drought have been discarded in favour of proposals for making use of available rainfall resources. The new, more constructive approach is based on over twenty years of research station and onfarm evaluation of water fluxes in crops under Sudano-Sahelian conditions. Risk diagnosis methods based on ecophysiological indicators are proposed. They can be used at plant, plot, catchment and regional scale. Applied to Sudano-Sahelian agrosystems, they will be a precious aid in choosing crop varieties and farming techniques and in designing developments which can be taken over by African farmers and in which risks are reduced.

"Agroclimatic Precipitation Management : a method for reducing the technological gap in African tropical agriculture" - a too-frequently ignored message of progress that the authors wish to put across.