L'ARIDITÉ

UNE CONTRAINTE AU DÉVELOPPEMENT

Caractérisation
Réponses biologiques
Stratégies des sociétés

É. LE FLOC'H, M. GROUZIS, A. CORNET, J.-C. BILLE
Éditeurs scientifiques

ORSTOM
Editions

Le réseau zones arides

CEFE/CNRS, BP 5051, F-34033, Montpellier Cedex
ou
ORSTOM, BP, 5045, F-34032, Montpellier Cedex

Créé en 1984 à l'initiative de l'ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) et du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) le Réseau zones arides (RZA) est un groupe informel de chercheurs*, le plus souvent d'expression française, dont les travaux concernent les milieux arides et semi-arides, méditerranéens et tropicaux, qui occupent le tiers des terres émergées et sont peuplés par près de 15 % de la population mondiale.

Le RZA s'est fixé un double objectif :
- d'une part favoriser les échanges entre les scientifiques de différents pays et les disciplines concernées ;
- d'autre part promouvoir la dissémination des connaissances sur les zones arides du globe.

Le domaine scientifique du RZA couvre non seulement les manifestations de l'aridité, comme les caractéristiques des milieux secs ou l'adaptation des plantes et des animaux à de telles conditions, mais aussi les possibilités d'interventions humaines. Le domaine privilégié du RZA inclut les problèmes de l'érosion des sols, de la dégradation et de la régénération de la végétation, de la lutte contre la désertification, de la reconstitution du potentiel productif et de l'aménagement des ressources hydriques ainsi que la détermination des conditions nécessaires pour le maintien de l'activité humaine dans ces régions défavorisées. De ce fait, le RZA s'efforce de couvrir non seulement les phénomènes qui ressortissent au domaine des sciences de la terre et du climat, ou encore les aspects plus biologiques de croissance des plantes et de comportement des animaux, mais aussi les manifestations des activités des agriculteurs et des éleveurs, avec leurs conséquences d'ordre économique ou social. Plusieurs disciplines scientifiques sont donc représentées au RZA.

La répartition actuelle des membres du réseau (plus de 20 pays du pourtour méditerranéen, de l'Afrique tropicale et de l'Amérique latine) reflète les multiples facettes de leur objet d'étude.

Par ses orientations en matière d'aridité, le RZA rejoint les objectifs de l'Observatoire du Sahara et du Sahel puisqu'il est, depuis 1986, un des principaux liens scientifiques spécialisés en matière de régions sèches, de problème d'aridité et un forum d'échanges multidisciplinaires et interorganismes. Le RZA est en liaison constante avec d'autres réseaux (Érosion et Humus de l'ORSTOM, l'Association française de pastoralisme, le réseau de *l'International Institute for Environment and* Development) ainsi que plusieurs instituts internationaux de recherche en agriculture. En outre, le RZA, en raison de ses actions dans l'esprit du programme «l'Homme et la Biosphère» de l'Unesco, a reçu le label du Comité français du MAB.

Pour diffuser l'information, le RZA réunit annuellement ses membres autour d'un thème scientifique d'actualité, édite un bulletin trimestriel, entretient une base de données bibliographiques et promeut des actions telles que l'édition d'ouvrages collectifs dont celui-ci est le premier exemple.

* L'adhésion au réseau est gratuite et se fait à titre individuel. Elle n'engage qu'à participer aux efforts du groupe d'animation.

Logo RZA : © Glénat ; extrait d'un dessin original de Serri.

L' aridité :

une contrainte au développement

L' aridité :

une contrainte au développement

Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés

É. Le Floc'h, M. Grouzis, A. Cornet, J.-C. Bille
Éditeurs scientifiques

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection DIDACTIQUES

Paris 1992

Comité de lecture

Les éditeurs adressent leurs remerciements aux collaborateurs suivants qui ont bien voulu accepter de les aider à juger et à mettre au point les manuscrits.

AUBERT (G.), ORSTOM-Paris, BOCQUILLON (C.), USTL-Montpellier, BOISSIN (J.), USTL-Montpellier, BONVALLOT (J.), ORSTOM-Tahiti, BORNAND (M.), Inra-Montpellier, BOUDET (G.), IEMVT-Maisons-Alfort, BOULAINE (J.), Ina-Paris, BREMAN (H.), CABO-Wageningen, BROCHET (M.), Cnearc-Montpellier, BROUWERS (R.), Cirad-Montpellier, CAUSSANEL (C.), MNHN-Paris, CAUVIN (J.), Maison Orient-Lyon, CHEVERRY (C.), Ensa-Rennes, CLAUDE (J.), CEE-Bruxelles, COQUE (R.), Institut géographie-Paris, CORNET (A.), ORSTOM-Paris, DAUTREBAND (Mme S.), Gembloux, DORST (J.), MNHN-Paris, ESCADAFAL (R.), ORSTOM-Paris, FAUCK (R.), Vernon, GALLAIS (J.), Université haute Normandie-Rouen, GAVAUD (M.), ORSTOM-Dakar, GILLON (Y.), ORSTOM-Paris, GIRARD (M.C.), Ina-Grignon, GROUZIS (M.), ORSTOM-Dakar, GUENELON (R.), Inra-Montfavet, JOUVE (P.), Cirad-Montpellier, LACAZE (B.), CNRS-Montpellier, LACOSTE (A.), Paris-Orsay, LE BERRE (M.), Université Cl. Bertrand-Lyon, LE FLOC'H (É.), CNRS-Montpellier, LE GOFF (G.), Météorologie nationale-Paris, LE HOUÉROU (H.-N.), CNRS-Montpellier, LONG (G.), CNRS-Montpellier, MENAUT (J.-C.), ENS-Paris, METHY (M.), CNRS-Montpellier, NIZINSKI J., ORSTOM-Dakar, MILLEVILLE (P.), ORSTOM-Montpellier, MOREAU (R.), ORSTOM-Montpellier, PETER (F.), MNHN-Paris, PONTANIER (R.), ORSTOM-Tunisie, POUGET (M.), ORSTOM-Bondy, RAUNET (M.), Cirad-Montpellier, REIJ (Ch.), Free University DOS-Amsterdam, RODIER (J.), Bretignolle-sur-Mer, ROGNON (P.), Paris-Jussieu, ROOSE (É.), ORSTOM-Montpellier, ROUX (F.), MNHN-Paris, SAINT (G.), LERTS-Toulouse, SAUGIER (B.), Paris-Orsay, SEGUIN (B.), Inra-Montfavet, TRICARD (J.), Centre géographie appliquée-Strasbourg, THERIEZ (M.), Inra-Ceyrat, VACHAUD (G.), Institut mécanique-Grenoble

Conception, réalisation : Martine LACOMME
Mise au point du manuscrit, corrections : Charles H.-A. MASSON
Maquette de couverture : Philippe AZZARETTI
Photo de couverture : Patrick LE FLOC'H-Explorer ; *région de Gao, Mali*

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

ISSN 1142-2580 ISBN 2-7099-1068-3

© ORSTOM 1992

Sommaire

Avertissement *9*

Avant-propos *11*

Foreword *15*

Preámbulo *19*

Prólogo *23*

Première partie

Aridité climatique, aridité édaphique à différentes échelles de temps et d'espace

J. CLAUDE
Introduction *29*

J.-P. CARBONNEL et P. HUBERT
Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries *37*

J. SIRCOULON
Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle *53*

G. BOUTEYRE et J.-Y. LOYER
Sols salés, eaux saumâtres, des régions arides tropicales et méditerranéennes : principaux faciès, conséquences pour l'agriculture *69*

B. SEGUIN
Approche de l'évapotranspiration par télédétection : utilisation des satellites météorologiques Météosat et Noaa en Afrique sahélienne *81*

M.-F. COUREL
Albédo et pluviométrie dans le Sahel *95*

R. ESCADAFAL
Télédétection de la surface des sols arides. Concept et applications *105*

J. ALBERGEL, A. CASENAVE, P. RIBSTEIN et C. VALENTIN
Aridité climatique, aridité édaphique : étude des conditions de l'infiltrabilité en Afrique tropicale sèche *123*

J.-C. LEPRUN et C. O. DA SILVEIRA
Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides : le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nordeste brésilien *131*

Deuxième partie
Interactions des facteurs du milieu et réponses biologiques à l'aridité

G. LONG
Introduction *155*

J.-C. BILLE
La réflectance des végétaux. Variations et évolution annuelle *167*

J.-C. BILLE
Tendances évolutives comparées des parcours d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique de l'Est *179*

H.-N. LE HOUÉROU
Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride *197*

J.-C. LEPRUN
Étude de quelques brousses tigrées sahéliennes : structure, dynamique, écologie... *221*

A. CORNET
Relations entre la structure spatiale des peuplements végétaux et le bilan hydrique des sols de quelques phytocénoses en zone aride *245*

M. GROUZIS
Germination et établissement des plantes annuelles sahéliennes *267*

J. POISSONET, F. CHAMBRIS et I. TOURÉ
Équilibre et déséquilibre des phytocénoses herbacées sahéliennes. Influence de la pluviosité annuelle et de la proximité des points d'eau *283*

F. ACHARD
Phytomasse des savanes nord-soudaniennes de Gampéla. Région de Ouagadougou, Burkina Faso *297*

B. SICARD
Influences de l'aridité sur la biologie des rongeurs soudano-sahéliens..... *311*

M.-Y. MOREL et G. J. MOREL
Instabilité climatique et communautés aviennes dans une région semi-aride de l'Ouest africain : la steppe arbustive dans le Nord-Sénégal..... *335*

S. I. GHABBOUR, M. A. RIZK et W. Z. A. MIKHAIL
Bilan hydrique de quelques invertébrés hypogés de la région de Mariout (Égypte). Le cas du cafard des sables *Heterogamia syriaca* Sauss. *353*

H.-N. LE HOUÉROU
Recherches expérimentales sur la tolérance du mouton barbarin à l'inanition et à la restriction alimentaire. Relations entre la consommation d'énergie et la variation de poids..... *369*

A. M'TIMET
Les lœss sahariens et l'amélioration de leurs propriétés géotechniques. Cas des Matmata et de leurs bordures, Tunisie..... *387*

G. BOUTEYRE
Une calamité pour l'agriculture en zone aride : la salinisation des terres irriguées en basse vallée de l'Euphrate (République arabe syrienne)..... *401*

G. SERPANTIÉ, L. TEZENAS DU MONTCEL et C. VALENTIN
La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions..... *419*

C. FLORET, É. LE FLOC'H et R. PONTANIER
Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne..... *449*

Troisième partie
Stratégies des sociétés et des États

P. JOUVE
Introduction..... *467*

J.-O. JOB
Les premiers aménagements hydroagricoles en Mésopotamie et les problèmes de sels..... *473*

É. ROOSE
Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols. Influence du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale..... *481*

J. Bonvallot
Plaidoyer pour les *jessour*. Tunisie du Sud ***507***

M. Lesourd
Maîtrise et valorisation de l'eau aux îles du Cap-Vert. Le défi d'un État et de ses paysans à une nature ingrate ***519***

P. Milleville
Conditions sahéliennes et déplacements des troupeaux bovins (Ouadalan, Burkina Faso) ***539***

E. Bernus
Hydraulique pastorale et gestion des parcours ***555***

G. Monchalin
Politiques de l'eau en Afrique soudano-sahélienne ***565***

Conclusion ***585***

Abstracts ***587***

Avertissement
relatif à la nomenclature botanique

Plusieurs articles du présent ouvrage font référence à des taxons botaniques, sans qu'il ait été entrevu de normaliser la nomenclature et ce pour différentes raisons :

- les zones géographiques sont très diverses et parfois trop éloignées pour qu'il soit possible d'adopter une nomenclature unique, en particulier par manque d'ouvrages de référence ;

- certains articles ont été présentés sans référence au nom d'auteur des combinaisons nomenclaturales retenues ; il était dès lors délicat de chercher une uniformatisation du fait des risques d'erreur ;

- aucun des articles présentés n'a la prétention d'aborder des travaux qui nécessitent une connaissance très précise des taxons impliqués ; de fait les espèces végétales (ou taxons d'autres rangs) dont il est question sont toujours des entités très connues dans les régions concernées, et ne requièrent donc pas obligatoirement que soit précisé le nom d'auteur de la combinaison nomenclaturale utilisée.

Cependant, dans les contributions pour lesquelles les auteurs ont précisé, ne serait-ce que pour une part, le nom d'auteur des taxons référenciés, cette information a été étendue, complétée et vérifiée. Pour l'Afrique de l'Ouest, l'ouvrage de référence a été : «Flore du Sénégal» de J. BERHAUT (1967) 2e édition, Édition Clairafrique, Dakar, 485 p.

Avant-propos

Les régions arides et semi-arides occupent le tiers des terres émergées et sont peuplées par quinze pour cent de la population mondiale. Près de la moitié des pays du monde se trouvent confrontés aux problèmes de l'aridité (BATISSE, 1969).

L'aridité définit l'ensemble des facteurs climatiques qui caractérisent une région : température, précipitations, humidité de l'air, insolation. Il est nécessaire de la distinguer de la sécheresse, qui relève d'un phénomène accidentel, d'une durée et d'une périodicité variables, et qui est marquée par un déficit aigu en eau (TOUPET, 1984 ; PELISSIER, 1989). Si la sécheresse affecte toute zone géographique, c'est dans les zones arides et semi-arides que les perturbations qu'elle engendre au niveau du fonctionnement des écosystèmes et des systèmes de production agricole *lato sensu*, prennent des proportions alarmantes.

À l'échelle régionale, l'aridité est appréciée, en général, par des indices climatiques (MEIGS, 1952 ; EMBERGER, 1971 ; UNESCO 1977 ; etc.) qui se réfèrent aux précipitations, aux températures et/ou à l'évapotranspiration. FLORET et PONTANIER (1984) montrent que cette aridité climatique de l'échelon régional peut être accentuée ou atténuée par le facteur sol. On définit alors une aridité d'origine édaphique qui permet de caractériser, à moyenne échelle, les quantités d'eau mises à la disposition des êtres vivants après redistribution des précipitations par la topographie et par le sol.

Les régions arides et semi-arides sont le domaine des steppes, des savanes et des fourrés tropicaux. Elles sont caractérisées par la rareté et une forte variabilité dans le temps et dans l'espace des précipitations, par l'intensité de l'évaporation et par la précarité des ressources en eau. Dans ces zones souvent prédisposées à l'apparition des phénomènes érosifs, la surexploitation des systèmes écologiques naturellement fragiles, conduit à des changements irréversibles et à la dégradation des potentiels de production.

Ces caractéristiques engendrent des limitations sévères au développement de ces zones, notamment au développement du monde rural auquel se réfère principalement cet ouvrage. En effet, les études de cas concernent la caractérisation des ressources naturelles, les systèmes de

productions pastorale et agricole, les stratégies des sociétés paysannes d'exploitation des écosystèmes. Les activités liées au développement rural des zones arides et semi-arides sont représentées essentiellement par des activités pastorales car l'élevage est susceptible de tirer profit de ces terres marginales auxquelles s'associent, en zones semi-arides, des activités agricoles de cultures sous pluies.

La politique de développement a d'ailleurs beaucoup évolué au cours de ces deux dernières décennies. À la notion d'assistance et à la stratégie selon laquelle, au-delà d'un certain seuil d'investissement, un processus qui conduit à la croissance régulière doit s'amorcer, s'est substituée la notion de développement durable qui suppose de «s'efforcer de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures» (Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1988). La réalisation d'un développement durable requiert l'association de la conservation au développement, c'est-à-dire la nécessité d'augmenter la production en respectant les trois objectifs de la stratégie mondiale de la conservation : - maintien des processus écologiques essentiels ; - préservation de la diversité génétique ; - utilisation durable des espèces et des écosystèmes (MALDAGUE, *s. d.*).

Les caractères d'aridité et leur accentuation constituent des obstacles au fonctionnement des systèmes écologiques et au développement. Ceux-ci relèvent essentiellement :

- de la contrainte, effet permanent des conditions d'aridité qui répond à la loi fondamentale du minimun ou du facteur limitant lequel est ici la disponibilité en eau (FRANQUIN, 1985) ; elle se traduit par un bas niveau des potentiels de production (faible productivité de l'élevage, rendements agricoles médiocres, gamme réduite des plantes cultivables) ;
- du risque sécheresse, caractère aléatoire, responsable de l'insécurité des ressources en eau, des ressources fourragères et des récoltes ; il réduit les possibilités d'une intensification, pourtant nécessaire, des systèmes de cultures, pour nourrir des populations de plus en plus nombreuses ;
- de la salinisation des terres, notamment au niveau des zones irriguées.

Les déséquilibres engendrés par les sécheresses persistantes et généralisées, ainsi que par la surexploitation, et qui aboutissent à la dégradation des structures physiques et des structures sociales, constituent autant d'obstacles au développement, car ils s'opposent aux stratégies à long terme relatives à l'environnement pour un développement durable.

Depuis plus de deux décennies, la communauté internationale* s'est intéressée aux problèmes des zones arides et semi-arides soumises à des pressions d'exploitation de plus en plus fortes. De nombreux travaux de recherches pour le développement ont été entrepris en différentes disciplines scientifiques et dans des situations géographiques variées.

* Man and Biosphere Programme (Mab) et International Hydrological Programme (IHP) de l'Unesco, International Biological Programme (IBP), Comité de lutte contre l'aridité en milieu tropical de la DGRST, Programme parcours Sud (Tunisie), Programme Mexique.

Cet ouvrage collectif se propose de rassembler certains de ces résultats afin de mettre en évidence quelques concepts nouveaux et de comparer les méthodologies et les différentes approches. L'objectif est de montrer la diversité des zones sèches, afin de mieux connaître l'aridité, ses manifestations et ses répercussions sur le développement. Il va sans dire que cette œuvre commune ne prétend pas à l'exhaustivité. C'est un travail qui couvre un ensemble de concepts et non la totalité des situations. De même, concerne-t-il certaines zones géographiques alors que certains déserts, notamment nord-américains, sont totalement occultés. Enfin, la majorité des cas traités se situent en amont du développement, mais sans exclusive, car quel développement peut-on envisager sans connaître les potentialités d'un milieu, son évolution et les caractéristiques des sociétés qui y vivent ?

L'ouvrage se compose de trois parties. La première traite de l'aridité climatique et édaphique à différentes échelles de temps et d'espace. L'évaluation au niveau régional des ressources en eau, de la demande évaporative et de leur variabilité, est effectuée au travers de méthodes statistiques et de l'utilisation de la télédétection. La redistribution de l'eau au niveau stationnel en liaison avec les états de surface est ensuite discutée, notamment par le biais d'études expérimentales de simulation de pluies et de suivi des bilans hydriques.

La deuxième partie aborde les interactions des facteurs du milieu et les réponses biologiques à l'aridité. Les expériences rapportées se réfèrent aux adaptations des systèmes écologiques et des populations végétales et animales dans les milieux naturels ou anthropisés.

Dans la troisième partie, les stratégies développées par les États et par les populations humaines pour la maîtrise de l'eau, ou l'adaptation à la contrainte et à la variabilité de la ressource, sont approchées par une étude historique et actuelle du comportement des exploitants (agriculteurs, pasteurs).

Il est souhaité que cet ouvrage apporte des informations et des éléments de réflexion à tous ceux qui s'intéressent aux problèmes des zones arides dans les domaines de la recherche, de la formation et du développement.

E. Le floc'h, M. Grouzis, A. Cornet, J. - C. Bille

Bibliographie

BATISSE (M.), 1969.- Problems facing arid land nations *in* «Arid lands in perspective», W.G. Mc Ginnies et B.I. Goldman, 1-12. American Association for the Advancement of Science, Washington and University of Arizona, Tucson Press.

Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1988. - «Notre avenir à tous». Les Éditions du Fleuve, Montréal, Quebec, Canada.

EMBERGER (L.), 1971.- Travaux de botanique et d'écologie. Paris, Masson et Cie, 520 p.

FRANQUIN (P.), 1985.- Agrostratégies pour le Sahel, Rapport ORSTOM, *multigr.*, Bondy, 9 p.

FLORET (Ch.) et PONTANIER (R.),1984.- Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot., Fr.*, 131, *Actual. bot.*, 2/3/4 : 265-275.

MALDAGUE (M.), *s. d.*- Concept de développement rural intégré, 10 p.

MEIGS (P.), 1952.- World distribution of arid and semi-arid homo-climates. *Rev. on Arid Zone Hydr.*, Unesco, Paris : 203-210.

PELISSIER (P.), 1989.- Sécheresse, sociétés et développement, 19-25 ; *in* B. BRET Éd., «Les hommes, face aux sécheresses», IHEAL et EST-Samuel Tastet Éditeur, 422 p.

TOUPET (Ch.), 1984.- Signification de la récente sécheresse qui a sévi dans le Sahel. *Bull. Soc. Languedocienne de Géographie*, 18, fasc. 3-4 : 139-146.

UNESCO, 1977.- Carte de la répartition mondiale des régions arides, Note technique du Mab, 55 p. + 1 carte h. t.

World Commissiom Environment and Development, 1987.- "Our Common Future". Oxford University Press, Oxford-New York, 400p.

Foreword

Arid and semi-arid regions form one third of the world's land area and are inhabited by fifteen percent of the world's population. Nearly half the countries in the world are confronted with problems of aridity (BATISSE, 1969).

Aridity defines the set of climatic factors characterising a region: temperature, precipitations, humidity of the air, insolation. Distinction should be made between aridity and drought, which is an accidental phenomenon of variable duration and frequency and marked by an acute shortage of water (TOUPET, 1984; PELISSIER, 1989). Whereas drought affects any geographical zone, in arid and semi-arid zones the disturbances that it causes to the functioning of ecosystems and farming systems in the broad sense gain alarming proportions.

At regional scale, aridity is generally assessed by climatic indexes (MEIGS, 1952; EMBERGER, 1971, UNESCO, 1977; etc.) which refer to precipitations, temperatures and/or evapotranspiration. FLORET and PONTANIER (1984) show that this climatic aridity at regional level can be accentuated or relieved by the soil factor. One can therefore define aridity of edaphic origin, making it possible on a medium scale to characterise the quantities of water available to living organisms after redistribution of precipitations by the topography and by the soil.

Arid and semi-arid regions include steppes, savanna and tropical wooded areas. They are characterised by infrequent rainfall which is extremely variable in time and space, intense evaporation and precarious water resources. Such zones are often liable to erosion and the over-exploitation of naturally fragile ecological systems causes irreversible changes and the degradation of production potential.

These characteristics severely limit development in these zones, and especially rural development, the main concern of the present work. Indeed, the case studies described concern the characterisation of natural resources, pastoral and agricultural systems and the strategies of farming societies which exploit the ecosystems. Activities related to rural development in arid and semi-arid zones are represented essentially by pastoral occupations since animal husbandry can draw a benefit from this marginal land; this is combined with rainfed crops in semi-arid zones.

Development policy has evolved considerably over the past two decades. The notion of assistance and the strategy in which a process of steady growth should be initiated beyond a certain investment threshold have been replaced by the notion of durable development "to meet the needs and aspirations of the present without compromising the ability to meet those of the future" (World Commission on Environment and Development, 1987). Achieving durable development requires a combination of conservation and development, that is to say production must be increased with the respect of the three world conservation strategy objectives: conservation of the essential ecological processes, conservation of genetic diversity and durable use of species and ecosystems (MALDAGUE, *undated*).

The features of aridity and their accentuation are obstacles to the functioning of ecological systems and to development. They consist mainly of:

- constraint, a permanent effect of conditions of aridity of the fundamental law of the minimum or the limiting factor which is here the availability of water (FRANQUIN, 1985); this results in a low level of production potential (low productivity of animal husbandry, mediocre crop farming yields, limited range of cultivable plants):
- risk of drought - of a random nature - which leads to insecurity of water resources, fodder resources and harvests; it reduces the scope for the intensification of cropping systems needed to feed growing populations;
- salination of the soil, especially in irrigated zones.

The imbalances caused by continued, widespread droughts and by over-exploitation, and which lead to the degradation of physical and social structures, form obstacles to development, since they oppose long term strategies concerning the environment and aim at sustainable development.

For over two decades, the international community* has shown interest in the problems of arid and semi-arid zones exposed to increasing exploitation pressure. Much research work on development has been undertaken in different scientific disciplines and in a variety of geographical areas.

This multi-author work assembles some of the results in order to highlight several new concepts and to compare methodologies and the different approaches. The aim is to show the diversity of the dry zones and gain better knowledge of aridity, its effects and the repercussions for development. It goes without saying that this common work does not claim to be exhaustive. It covers a set of concepts and not all the situations. Likewise, it concerns certain geographical zones and some deserts, especially in North America, are not mentioned at all. Finally, most - but not all - of the cases discussed are "upstream" of development,

*Man and Biosphere Programme (Mab) and the Unesco International Hydrological Programme (IHP), The International Biological Programme(IBP), Comité de lutte contre l'aridité en milieu tropical de la DGRST, Programme Parcours Sud (Tunisia), Programme Mexique.

since what development can be envisaged without knowledge of the potential of an environment, its evolution and the characteristics of the societies which live in it?

The book is in three parts. The first discusses climatic and edaphic aridity on different scales of space and time. Evaluation at regional level of water resources, evaporation and their variability is performed using statistical methods and remote sensing. Water redistribution at site level in relation to surface states is then discussed, in particular through experimental studies of rainfall simulation and water balance monitoring.

The interactions between environmental factors and biological responses to aridity are discussed in the second part. The experiments reported refer to the adaptations of ecological systems and plant and animal populations in natural environments or those affected by man.

In part three, the strategies of governments and populations groups for control of water or for adapting to the constraint and variability of water resources are approached through discussion of the history and present behaviour of users (crop farmers and pastoralists).

It is hoped that the work will provide information and food for thought for all those interested in the problems of arid zones in the domains of research, training and development.

Traduction : Simon BARNARD

(See references page 13)

Preámbulo

Las regiones áridas y semi-áridas ocupan los tres cuartos de la superficie de la tierra en donde habita el quince por ciento de la población mundial. Casi la mitad del globo se encuentra confrontado a los problemas de la aridez del suelo (BATISSE, 1969).

La aridez define el conjunto de factores climáticos que caracterizan una región determinada : temperatura, precipitaciones, humedad del aire y brillo solar. Conviene distinguirla de la sequía que proviene de un fenómeno accidental, de duración y periodicidad variables, y que se caracteriza por un déficit hídrico agudo (TOUPET, 1984 ; PELISSIER, 1989). Si la sequía afecta a cualquier zona geográfica, es en las zonas áridas y semi-áridas donde las perturbaciones realizadas por ella - en el funcionamiento de los ecosistemas y de los sistemas de producción agrícola *lato sensu* - que toman proporciones alarmantes.

A escala regional, la aridez se evalua, en general, a través de índices climáticos (MEIGS, 1952 ; EMBERGER, 1971 ; UNESCO 1977 ; etc.) que hacen referencia a las precipitaciones, a las temperaturas y/o a la evapo-transpiración. FLORET y PONTANIER (1984) demuestran que la aridez climática a escala regional puede acentuarse o atenuarse según el tipo de suelo. Se define en este caso una aridez de tipo edáfica que permite caracterizar a media escala, los volúmenes hídricos de que disponen las poblaciones vegetales o animales una vez que la redistribución de las lluvias por escurrimiento de la superficie del suelo se ha realizado.

Las regiones áridas y semi-áridas son propias de las estepas, de las savanas y de las areas tropicales. Estas se caracterizan por la rareza y por la gran variabilidad de las precipitaciones realizadas en el tiempo y en el espacio, por la intensidad de la evaporación y por la precaridad de los recursos hídricos. En estas zonas predispuestas a menudo a la aparición de fenómenos erosivos, la explotación exagerada de los sistemas ecológicos frágiles por naturaleza, conduce a cambios irreversibles y a la degradación de los potenciales de producción.

Todo ello limita en forma severa el desarrollo de estas zonas, en particular la del mundo rural al que hace hincapié esta obra. En esta se citan los estudios de casos concernientes a la caracterización de los

recursos naturales, los sistemas de producción agro-pecuaria y el modo de vida de las sociedades campesinas explotadoras de los ecosistemas. Las actividades ligadas al desarrollo rural de las zonas áridas y semi-áridas están principalmente representadas por actividades de pastereo ya que la cría de ganado en estas tierras tan particulares puede ser provechosa. A estas se asocian - en zonas semi-áridas - actividades agrícolas de cultivo de temporal.

Incluso la política de desarrollo agrícola ha evolucionado considerablemente en el transcurso de las dos últimas décadas. A la noción de apoyo y de la estrategia según la cual mas allá de cierta tasa de inversión debía establecerse un proceso que condujera a un desarrollo equilibrado, se le ha sustituido por la de una política de desarrollo duradero que reconsidera «los esfuerzos para responder a las necesidades del presente sin arriesgar las de satisfacer aquellas de las generaciones futuras» (World Commission on environment and development, 1987). La realización de un desarrollo duradero requiere de la relación entre el manejo de los recursos y del desarrollo, es decir, la necesidad de aumentar la producción tomando en cuenta los tres objetivos de la estrategia mundial de la conservación : - respeto de los procesos ecológicos esenciales ; - conservación de la diversidad genética ; y - utilización a largo plazo de las especies y de los ecosistemas (MALDAGUE, *s.d.*).

Las características de la aridez y su acentuación constituyen obstáculos al buen funcionamiento de los sistemas ecológicos y al desarrollo. Estas se originan principalmente :

- del desequilibrio, efecto permanente de las condiciones de aridez, que responde a la ley del mínimo fundamental, o del factor limitante que es en este caso el abastecimiento de agua (Franquin, 1985); esta se traduce por un bajo nivel de producción (escasa productividad ganadera, rendimiento agrícola mediocre y de una reducida variedad de plantas cultivables) ;
- del riesgo de sequía, — de caracter aleatorio — responsable de lo imprevisible de los recursos hídricos, de los recursos forrageros y de las cosechas ; reduce las posibilidades de una intensificación, por lo tanto necesario, de sistemas de cultivo, para alimentar poblaciones cada vez más numerosas ;
- de la salinización de los suelos, especialmente en zonas de riego.

Los desequilibrios ocasionados por sequías prolongadas y generalizadas, así como por la sobre-explotación llegando a degradar las estructuras físicas y sociales de una comunidad, representan igualmente obstáculos al desarrollo pues se oponen a largo plazo a las estrategias del medio ambiente para un desarrollo duradero.

Hace ya más de dos décadas que la comunidad internacional* se interesa por el problema de las zonas áridas y semi-áridas sometidas a procesos de explotación cada vez más intensos. Así mismo, son

* Man and biosphere Programme (Mab) y International Hydrological Programme (IHP) de la Unesco, International Biological Programme (IBP), Comité de lutte contre l'aridité en milieu tropical de la DGRST, Programme parcours Sud (Tunicia), Programme Mexique.

numerosos los trabajos de investigación que se han emprendido sobre el desarrollo en varias disciplinas científicas y en situaciones geográficas diversas.

Esta obra colectiva se propone reunir algunos de esos resultados, y dar con ello a conocer algunos conceptos nuevos, comparar las metodologías utilizadas y sus distintas aplicaciones. El objetivo principal es de demostrar la diversidad de las zonas secas con el propósito de conocer mejor la aridez, sus manifestaciones y sus repercusiones sobre el desarrollo. En ningún momento esta obra común tiene pretenciones de ser exhaustiva. Es un trabajo que abarca solo un conjunto de conceptos, y no todas las situaciones. De la misma manera solo concierne a algunas zonas geográficas, por lo que quedan totalmente excluídos algunos desiertos, en especial los norteamericanos. Por último el desarrollo implica un conocimiento profundo de la mayoría de los casos estudiados aquí pues, ¿ cómo se podría vislumbrar un desarrollo sin conocer el potencial de un medio dado, así como su evolución y las características de las sociedades que lo componen ?

La obra se compone de tres partes : la primera trata de la aridez climática y edáfica a diferentes intervalos de tiempo y de espacio. La evaluación por región, de los recursos hídricos, de la demanda evaporativa y de su variabilidad se realizó por medio de métodos estadísticos y de la teledetección. La redistribución del agua in situ ligada al estado de la capa superficial del suelo se discute después, en particular a través de estudios experimentales de simulación de lluvias y del control de balances hídricos.

La segunda parte aborda las interacciones de los factores ocasionados por el medio y las respuestas biológicas dadas a la aridez. Los resultados obtenidos de las investigaciones se refieren a las adaptaciones de los sistemas ecológicos y de las poblaciones vegetales y animales en medios naturales o a aquellos modificados por las actividades humanas.

En la tercera parte, se presentan las políticas realizadas por distintas naciones para el control de la utilización del agua o su adaptación según la problemática de los recursos ; todo ello es analizado por medio de un estudio histórico actualizado del modo de vida de los explotadores de la tierra (campesinos, agricultores y ganaderos).

Auguramos que esta obra pueda brindar información y elementos de reflexión a todos aquellos que se interesen por los problemas de zonas áridas en los campos de la investigación, de la capacitación y del desarrollo.

Traduction : Carmen CAVALIÉ

(Ver bibliografia en pagina 13)

Prólogo

As regiões áridas e semi-áridas ocupam um terço das terras emersas e são povoadas por quinze por cento da população mundial. Cerca da metade dos países do mundo deparam-se com os problemas acarretados pela aridez (BATISSE, 1969).

A aridez define o conjunto de fatores climáticos que caracterizam uma região: temperatura, precipitações, umidade do ar, insolação. É necessário distingui-la da seca, que está ligada a um fenômeno acidental, de duração e periodicidade variáveis, e que é marcada por um deficit agudo de água (TOUPET, 1984; PELISSIER, 1989). Embora a seca afete todas as zonas geográficas, é nas zonas áridas e semi-áridas que as perturbações que ela engendra ao nível do funcionamento dos ecossistemas e dos sistemas de produção agrícola *lato sensu* adquirem proporções alarmantes.

À escala regional, a aridez é avaliada, em geral, por índices climáticos (MEIGS, 1952; EMBERGER, 1971; UNESCO, 1977; etc.) que se referem às precipitações, às temperaturas e/ou à evapotranspiração. FLORET e PONTANIER (1984) mostram que esta aridez climática da escala regional pode ser acentuada ou atenuada pelo fator solo. Define, então, uma aridez de origem edáfica, que permite caracterizar, em escala média, as quantidades de água postas à disposição dos seres vivos após redistribuição das precipitações pela topografia e pelo solo.

As regiões áridas e semi-áridas são as extensões de estepes, savanas e matas tropicais. Caracterizam-se pela raridade e por uma forte variabilidade no tempo e no espaço das precipitações, pela intensidade da evaporação e pela precariedade dos recursos em água. Nessas zonas, muitas vezes predispostas ao surgimento de fenômenos de erosão, a exploração excessiva dos sistemas ecológicos, naturalmente frágeis, acarreta transformações irreversíveis e a degradação dos potenciais de produção.

Essas características engendram severas limitações ao desenvolvimento das referidas zonas, sobretudo ao desenvolvimento do mundo rural, a que se refere principalmente este livro. Com efeito, os estudos de casos tratam da caracterização dos recursos naturais, dos sistemas de produção agro-pecuária, das estratégias das sociedades agrícolas de

exploração dos ecossistemas. As atividades ligadas ao desenvolvimento rural das zonas áridas e semi-áridas são representadas essencialmente por atividades pecuárias, pois a pecuária é suscetível de tirar proveito dessas terras marginais, às quais se associam, em zonas semi-áridas, atividades agrícolas de culturas sob chuvas.

A política de desenvolvimento, aliás, tem evoluído muito nestes dois últimos decênios. A noção de assistência e a estratégia segundo a qual além de um determinado limiar de investimento deve se iniciar um processo que conduza ao crescimento regular, cedeu o lugar à noção de desenvolvimento durável «que suponha a satisfação das necessidades atuais sem comprometer a das gerações futuras» (relatório da ONU, Our Common Future, da comissão Brundtland). A realização de um desenvolvimento durável requer a associação da conservação ao desenvolvimento, isto é, a necessidade de aumentar a produção respeitando-se os três objetivos da estratégia mundial da conservação: - manutenção dos processos ecológicos essenciais; - preservação da diversidade genética; - utilização durável das espécies e dos ecossistemas MALDAGUE *s. d.*).

As características da aridez e seu gravamento constituem obstáculos ao funcionamento dos sistemas ecológicos e ao desenvolvimento e estão ligadas essencialmente :

- à limitação, efeito permanente das condições de aridez que corresponde à lei fundamental do mínimo ou ao fator limitante que é neste caso a disponibilidade de água (FRANQUIN, 1985); traduz-se por um baixo nível dos potenciais de produção (baixa produtividade da pecuária, rendimentos agrícolas medíocres, gama reduzida das plantas cultiváveis);
- ao risco de seca, fator aleatório, responsável pela insegurança dos recursos em água, dos recursos em forragem e das colheitas; reduz as possibilidades de uma intensificação dos sistemas de culturas, necessários, no entanto, para a alimentação de populações cada vez mais numerosas;
- à salinização das terras, notadamente ao nível das zonas irrigadas.

Os desequilíbrios engendrados pelas secas persistentes e generalizadas, bem como pela exploração excessiva, que resultam na degradação das estruturas físicas e sociais, constituem obstáculos ao desenvolvimento, pois se opõem às estratégias a longo prazo relativas ao meio-ambiente para um desenvolvimento durável.

Há mais de dois decênios, a comunidade internacional* tem-se interessado pelos problemas das zonas áridas e semi-áridas submetidas a pressões de exploração cada vez mais intensas. Numerosos trabalhos de pesquisas para o desenvolvimento foram empreendidos em diferentes disciplinas científicas e em situações geográficas variadas.

---

* Man and Biosphere Programme (Mab) e International Hydrological Programme da Unesco (IHP), International Biological Programme(IBP), Comité de lutte contre l'aridité en milieu tropical de la DGRST, Programme Parcours Sud (Tunisia), Programme Mexique.

A presente obra coletiva propõe-se reunir alguns desses resultados para evidenciar determinados conceitos novos, comparando as metodologias e as diferentes abordagens. O objetivo é mostrar a diversidade das zonas secas, para que se conheçam melhor a aridez, suas manifestações e suas repercussões no desenvolvimento. É evidente que esta obra comum não tem a pretensão de ser exaustiva. É um trabalho que cobre um conjunto de conceitos e não a totalidade das situações. Da mesma forma, ele se refere a determinadas zonas geográficas, quando certos desertos, notadamente norteamericanos, são totalmente ocultados. Por fim, a maioria dos casos tratados se situa a montante no processo de desenvolvimento, mas não exclusivamente, pois a que desenvolvimento se pode aspirar, se não conhecermos as potencialidades de um meio, sua evolução e as características das sociedades que nele vivem?

A obra compõe-se de três partes. A primeira trata da aridez climática e edáfica em diferentes escalas de tempo e de espaço. A avaliação ao nível regional dos recursos em água, da demanda de evaporação e da sua variabilidade é efetuada através de métodos estatísticos e da utilização da teledetecção. A redistribuição da água ao nível estacional em ligação com os estados de superfície é, a seguir, discutida, nomeadamente através de estudos experimentais de simulação de chuvas e de acompanhamento dos balanços hídricos.

A segunda parte aborda as interações dos fatores do meio e as respostas biológicas à aridez. As experiências relatadas referem-se às adaptações dos sistemas ecológicos e das populações vegetais e animais nos meios naturais e antrópicos.

Na terceira parte, as estratégias desenvolvidas pelos Estados e pelas populações humanas para o domínio da água ou a adaptação à limitação e à variabilidade do recurso são abordadas através de um estudo histórico e atual do comportamento dos responsáveis por explorações (agrícolas e pecuárias).

É desejável que esta obra contribua com informações e elementos de reflexão para todos aqueles que se interessam pelos problemas das zonas áridas nas áreas da pesquisa, da formação e do desenvolvimento.

Traduction: Sergio BITTENCOURT DOS ANJOS

(Vide Bibliografia, página 13)

Première partie

☜ *Photo* : H. Camus et R. Pontanier
Campagne de simulation de pluie en Tunisie

Aridité climatique, aridité édaphique à différentes échelles de temps et d'espace

Dans la vie courante comme en sciences, les mots les plus usités finissent par perdre de leur sens et voient leur signification se diluer en concepts généraux et englobants aux contours de plus en plus flous ; ainsi en est-il des termes «sécheresse» et «aridité» très souvent liés à l'idée de désertisation ou désertification. Aussi les scientifiques spécialistes des régions arides éprouvent-ils toujours le besoin de redéfinir les termes qu'ils emploient et d'accoler un qualificatif à ces mots génériques qui recouvrent une quantité de phénomènes divers, naturels ou anthropiques.

Pour clarifier notre propos, nous essaierons de réserver le mot «aridité» à la description d'un état *ou à* la qualification d'un milieu *alors que «sécheresse» caractérisera plutôt* l'évolution des milieux sous l'effet de phénomènes climatiques *dont le principal est bien entendu la rareté et la variabilité des précipitations atmosphériques.*

Évidemment, l'aridité est le résultat de la sécheresse (aride, lat. aridus *«sec, desséché», de* arere *«être sec») et notre but n'est pas de définir une nouvelle fois les causes et les effets de l'aridité et de la sécheresse ; leurs relations complexes et multiformes ont été étudiées dans de nombreux ouvrages et colloques dont on trouvera les références dans les abondantes bibliographies citées.*

La sélection des articles présentés dans ce chapitre ne prétend pas davantage faire le point des connaissances actuelles sur le sujet mais se propose en revanche de mettre en évidence quelques concepts nouveaux, résultats de recherches récentes et de montrer l'utilité d'outils performants et adaptés à la spécificité des problèmes des zones arides.

En effet, la longue période de sécheresse qui affecte le Sahel africain depuis le début des années soixante-dix a soulevé des interrogations auxquelles les scientifiques n'étaient pas équipés pour répondre ; elles ont suscité un ensemble de nouvelles recherches de base dont les résultats doivent pouvoir être transférés très rapidement en termes d'action sur le terrain (parfois même sans les précautions qui devraient s'imposer!). La «nouveauté» du contenu de ces articles pourra paraître un peu fanée à certains lecteurs très au fait des questions sahéliennes ; cepen-

dant, si l'on se réfère aux concepts qui prévalaient il y a une quinzaine d'années où l'on parlait de lutte contre la sécheresse, d'endiguement de l'avancée du désert, d'attente de retour à la «situation normale» et même d'évacuation temporaire des zones sinistrées, on mesurera l'impact des résultats scientifiques sur les politiques d'aménagement qui mettent en avant aujourd'hui les notions d'adaptation à la sécheresse, de préservation des ressources, de complémentarité des activités agricoles et pastorales. Il n'est pas inutile de souligner également que cet effort de recherche, soutenu par les pouvoirs publics au Sahel africain principalement, permet de précieuses comparaisons et des adaptations dans d'autres régions arides du globe, et que les initiatives des réseaux associatifs de recherche, comme le Réseau zones arides (RZA) ou le Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse (R3S), jouent ici de toute leur efficacité.

Le premier exemple d'application d'une méthodologie nouvelle qui nous est fourni concerne le traitement statistique des données pluviométriques. La mesure pluviométrique est le paramètre le plus simple et le plus facilement accessible pour caractériser l'aridité et la sécheresse. Les séries pluviométriques de longue durée sont donc très précieuses pour analyser les évolutions climatiques ; mais, d'une part la seule valeur du total pluviométrique annuel est tout à fait insuffisante pour caractériser un régime pluviométrique et la disponibilité de la ressource en eau qui découle de la pluie, d'autre part, l'arsenal statistique habituellement utilisé n'est pas adapté à la nature et à la variabilité de la donnée pluviométrique. C'est ce que montrent CARBONNEL *et* HUBERT *qui constatent que les hypothèses simplificatrices de stationnarité et d'indépendance des séries pluviométriques sont incompatibles avec les phénomènes de persistance mis en évidence, dès 1975, par* BRUNET-MORET *et* ROCHE. *Ils proposent alors une nouvelle méthode d'analyse statistique des séries de longue durée, applicable aux totaux pluviométriques annuels mais aussi à d'autres paramètres descriptifs du régime pluviométrique tels que les fractions pluviométriques qui résultent de pluies journalières classées, le nombre de jours de pluie et la répartition temporelle des épisodes pluvieux pendant la saison des pluies.*

Cette méthode met tout d'abord en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques avec une rupture nette et généralisée en Afrique de l'Ouest située avec un maximum de probabilité en 1969-70 ; ceci conduit à une segmentation des séries.

L'ensemble de leurs analyses statistiques permet à CARBONNEL *et à* HUBERT *de conclure que* «l'évolution climatique au Sahel depuis le début du siècle n'a pas été continue et encore moins cyclique» ; *mais elle a évolué vers une aridification* «...à travers une série de paliers successifs interprétables comme une succession d'états d'équilibre du bilan énergétique régional».

Ces analyses ne permettent pas une modélisation des processus aléatoires qui régissent ces paliers d'équilibre et elles n'expliquent, pas davantage que les théories de la circulation atmosphérique globale, les causes de ces changements d'état. Cependant, elles rendent mieux compte de la réalité des phénomènes observés et elles devraient en tout cas éviter de se fourvoyer dans des modèles prédictionnistes trop simples, comme les moyennes glissantes ou les corrélations linéaires

avec des phénomènes astrophysiques cycliques qui ont fait naître trop de faux espoirs d'un retour à une pluviosité «normale» à la fin des années soixante-dix.

Ce même constat de variabilité et d'hétérogénéité de la ressource en eau des zones arides est dressé par SIRCOULON, *à travers une analyse historique des écoulements des cours d'eau sahéliens ; mais le constat d'une tendance générale à l'aridification due à la diminution de la pluviométrie doit être nuancé et accompagné d'une bonne connaissance des situations locales :*

- tout d'abord parce que les séries d'observations et de mesures sur les cours d'eau sont courtes et comportent beaucoup de lacunes. L'installation et la maintenance de réseaux hydrométriques performants étaient et demeurent une priorité ; si les moyens technologiques modernes (acquisition de données automatiques, télétransmission) sont de nature à alléger les tribulations des hydrologues sahéliens, il ne faut pas perdre de vue qu'aucune simulation statistique ou modélisation mathématique ne remplacera jamais la vérité du terrain et la collecte des données ;

- ensuite parce que les facteurs qui conditionnent l'écoulement intègrent des paramètres physiographiques et géomorphologiques, lesquels n'évoluent pas aux mêmes rythmes que les paramètres climatiques.

Il faut donc distinguer les grands cours d'eau tropicaux, qui traversent ou aboutissent dans les zones sahéliennes (Niger, Sénégal, Logone-Chari), et qui intègrent des ressources exogènes de régions plus arrosées, des cours d'eau strictement sahéliens, où la régulation interannuelle des débits par les échanges avec les nappes souterraines ne joue pratiquement aucun rôle ; il faut également différencier les bassins versants en fonction de leur superficie et de l'état de dégradation de leur réseau hydrographique.

Pour les grands fleuves, où les séries d'observations dépassent soixante ans pour quelques stations, SIRCOULON *constate, durant la période 1968-1985, une diminution drastique des volumes écoulés annuels, des débits de crues maximales et des débits d'étiage, par rapport aux moyennes établies jusqu'en 1967. Malgré l'insuffisance des données, qui ne permet pas un traitement statistique parallèle à celui des séries pluviométriques, on doit singulariser la période actuelle de sécheresse persistante, dont les effets se font sentir à plus long terme que lors des phases historiques de sécheresse précédentes (1910-1914 et 1940-1943).*

En revanche, au niveau des cours d'eau sahéliens, on ne constate pas de diminution significative des débits maximaux de crues ni de diminution des lames d'eau écoulées, jusqu'à une certaine taille du bassin versant ; une étude de POUYAUD *(1987) sur 8 cours d'eau du Burkina Faso montre que pour des bassins versants de moins de 10 000 km² les coefficients d'écoulement et, dans certains cas, les lames d'eau écoulées, ont augmenté sur la période 1970-1985 alors que les pluies moyennes annuelles ont diminué de 15 à 30 %. Pour les plus grands bassins (> 30 000 km²) on retrouve une diminution générale de tous les paramètres hydrologiques.* A priori, *ces résultats paradoxaux s'expliquent en grande partie par l'évolution des états de surface des sols qui condition-*

nent quasi exclusivement le ruissellement et l'infiltration en zone sahélienne ; mais ils concordent aussi avec l'analyse statistique des plus fortes pluies journalières, laquelle ne révèle pas de diminution des hauteurs de pluies de fréquence rare au cours de la période sèche actuelle (ALBERGEL, CARBONNEL et GROUZIS, 1984).

L'importance des états de surface et l'analyse des facteurs qui conditionnent le ruissellement et l'infiltration en zones sahéliennes sont le fruit de toute une recherche collective et pluridisciplinaire entreprise depuis le début de la sécheresse actuelle au Sahel. Elle s'est appuyée sur les nombreuses études de bassins versants représentatifs menées dès les années cinquante par les hydrologues de l'ORSTOM et elle a provoqué la mise en œuvre de nouveaux outils de mesures, d'expérimentation et d'interprétation, tels que le simulateur de pluie, les humidimètres neutroniques et les tensiomètres, la télédétection satellitaire et la modélisation des écoulements et des crues.

À partir de mesures sous pluies simulées, de cartographies des états de surfaces et de leur évolution dans le temps, de comparaisons des mesures d'écoulement enregistrées sur petits bassins versants à vingt ans d'intervalle, ALBERGEL, CASENAVE, RIBSTEIN et VALENTIN montrent que l'infiltrabilité de la pluie (et donc le ruissellement) en zone sahélienne est sous la dépendance très étroite des états de surface ; ces derniers évoluent considérablement sous l'effet de la sécheresse et des activités anthropiques. La diminution de la strate herbacée et arbustive et celle de l'activité mésofaunique, qui y est associée, supprime la macroporosité de surface et favorise l'augmentation des surfaces encroûtées, ou érodées, où le ruissellement augmente considérablement.

Donc, si en période de sécheresse prolongée les lames écoulées par ruissellement se maintiennent à des valeurs voisines de leurs valeurs antérieures sur les petits bassins versants, où les surfaces dégradées occupent un espace en augmentation, cela signifie que les lames d'eau infiltrées sont beaucoup plus faibles et que le bilan hydrique des sols sous-jacents est fortement péjoré ; l'aridité édaphique est exacerbée par les effets directs et indirects de la sécheresse. Les conséquences pratiques de ces résultats de recherche sont assez considérables ; d'une part, la variabilité dans le temps comme l'hétérogénéité spatiale de la ressource en eau et de sa disponibilité interdisent l'application généralisée de normes ou de pratiques strictes en matière d'aménagement rural et de productions agricoles - c'est notamment le constat auquel est arrivé le colloque sur la révision des normes hydrologiques, organisé par le CIEH (Centre interafricain d'études hydrauliques) à Ouagadougou en 1986 ; d'autre part, elles nécessitent une connaissance approfondie et détaillée du fonctionnement et des transferts aux interfaces sol-plante-atmosphère.

Pour ces études, qui ont toujours une assez grande extension spatiale, la télédétection satellitaire est un outil de choix dont les applications se diversifient et se diffusent très rapidement, parallèlement aux progrès technologiques de la micro-informatique. ESCADAFAL présente une méthodologie de cartographie et de classification des états de surface des sols des zones arides ; à partir d'observations de terrain ponctuelles, elle permet de caractériser, par traitement numérique d'images Spot ou Landsat, la couleur, la composition minéralogique et la rugosité de la

surface des sols et donc de déterminer des classes de susceptibilité à l'érosion. Mise au point pour une cartographie des ressources en sol du Sud tunisien, cette méthode, est applicable en de nombreux domaines, notamment en hydrologie pour la modélisation de l'infiltrabilité, en phyto-écologie pour les relations entre états de surface et état de la végétation et pour le diagnostic des phénomènes de dégradation des milieux naturels, qui se manifestent généralement par une augmentation de l'albédo des surfaces.

Sur ce postulat, COUREL a étudié les variations de l'albédo de surface de 4 régions sahéliennes, entre 1972 et 1982, à partir de données des satellites Météosat et Landsat.

Les variations interannuelles de l'albédo sont conditionnées par les changements d'état de la steppe arbustive et herbacée.

Si on observe une étroite corrélation entre la biomasse herbacée en fin de saison des pluies et, tout au long de cette dernière, l'indice de satisfaction des besoins en eau de la végétation, ce n'est pas le cas, de façon significative, avec le total pluviométrique annuel ; ceci confirme l'importance de la répartition temporelle des pluies au cours de la saison et la nécessité de prendre en compte cette répartition pour établir une relation entre albédo de surface et pluviométrie. En revanche, les variations de l'albédo mesurées dépassent rarement 10 % ; elle sont passées par un minimum, entre 1974 et 1979, pour augmenter en 1981-82, sans pouvoir être mises en concordance avec les déficits de pluviométrie de ces mêmes périodes ; ces résultats infirment formellement les hypothèses du mécanisme de rétroaction biogéophysique émises par CHARNEY (1975) qui tentait d'expliquer les déficits pluviométriques par la forte subsidence de l'air, entraînée par l'augmentation de température due à l'énergie radiative des sols à fort albédo. Par une voie toute différente, COUREL parvient à la même conclusion que CARBONNEL et HUBERT : la sécheresse persistante est essentiellement le résultat de perturbations de la circulation générale de l'atmosphère.

Dans le même domaine d'application de la télédétection à la caractérisation de phénomènes biophysiques sur de grandes étendues, SEGUIN présente une méthode d'estimation de l'évapotranspiration, à partir de mesures satellitaires (Meteosat et Noaa-AVHRR), par une double approche : estimation à partir de la température de surface du sol (mesurable par le canal infrarouge thermique) et mise en relation avec un indice de végétation normalisé (indicateur de la production de biomasse). Les relations établies entre l'évapotranspiration réelle et la différence de température entre le sol et l'atmosphère d'une part, et l'indice de végétation normalisé d'autre part, permettent d'estimer l'évapotranspiration sur des périodes de quelques jours et donc de la cartographier à partir de données de télédétection. Cette méthode devrait donc autoriser un suivi agrométéorologique des cultures et de la végétation tout au long de la saison des pluies, comme cela a été testé au Sénégal.

Les résultats de ces recherches récentes et l'apport de la télédétection satellitaire permettent déjà une expression cartographique des potentialités de production en zones arides et un suivi régulier de l'élaboration des productions végétales. Mais la gestion à long terme et conservatrice des potentialités fragiles de ces milieux dégradés exige de bien connaître leur mode de fonctionnement et de pouvoir anticiper sur leur

évolution pour la corriger si cela est possible. Il faut alors synthétiser tout un ensemble de résultats de recherche et de savoir-faire plus ou moins empiriques pour diagnostiquer des risques et imaginer des stratégies de mise en valeur qui les évitent. L'accumulation des connaissances sur des milieux arides qui évoluent dans des conditions climatiques comparables permet des comparaisons utiles et l'appréhension des mécanismes qui peuvent faire évoluer ces milieux de façon différente.

Deux exemples de ce type de démarche nous sont donnés pour clore la première partie.

BOUTEYRE et LOYER étudient les phénomènes de salinisation des sols et des eaux soumis à un bilan évaporatoire fortement positif dans des régions où la culture irriguée peut apporter la garantie d'une production agricole soutenue.

Dans de nombreux pays, l'accroissement des besoins alimentaires et industriels a conduit à mobiliser des ressources en eau et en sol pour la culture irriguée sans toujours disposer d'une connaissance suffisante des mécanismes géochimiques qui devraient en régir la gestion ; la salinisation, consécutive au non-respect de ces règles, a provoqué la stérilisation de périmètres irrigués très anciens, comme en Mésopotamie, ou plus récents, comme en Syrie et en Iraq.

En zones arides, la connaissance des faciès salés dans les eaux et dans les sols permet de guider les stratégies d'aménagement et de gestion des cultures irriguées : évaluation des doses d'irrigation en fonction d'une salinité limite tolérable par les différentes cultures, choix de systèmes d'irrigation qui permettent de limiter les volumes d'eau apportés, nécessité du drainage artificiel lorsque la nappe phréatique ne peut évacuer les eaux de percolation, appréciation de l'aptitude des sols à un lessivage intensif ou progressif.

Les conditions d'une agriculture irriguée durable et conservatrice des potentialités de production des sols sont précisées par BOUTEYRE et LOYER sur la base d'un référentiel des faciès de sols et d'eau et du suivi des processus d'accumulation saline sous différentes conditions.

LEPRUN, sur la base d'une longue expérience personnelle au Sahel africain et au Nordeste brésilien, dresse un tableau comparatif des analogies et des différences entre les sols et les eaux de ces deux régions arides. Les analogies sont frappantes au niveau :

- des formations géologiques dominantes issues d'un même socle cristallin précambrien ;

- de la pédogenèse des sols, qui présentent des morphologies semblables : sols bruns tropicaux et sols ferralitiques ;

- de la végétation arbustive basse et adaptée à l'aridité ;

- d'une agriculture de subsistance soumise aux aléas climatiques ;

- d'une population rurale pauvre vouée aux migrations.

En revanche, d'importants facteurs de différenciation se manifestent au niveau :

- de la tectonique postjurassique qui induit au Nordeste un relief plus vigoureux et une faible épaisseur du manteau d'altération d'où une meilleure perméabilité des sols, favorisée par leur meilleure structure et une végétation plus dense ;

- d'un drainage externe limité au Nordeste qui induit une minéralisation rapide des eaux infiltrées alors qu'on observe au Sahel un faible

drainage interne dû à la présence fréquente de pellicules et de croûtes de battance ;

- d'une végétation beaucoup plus dense au Nordeste avec une prédominance d'espèces arborées xérophytes alors qu'au Sahel la végétation herbacée annuelle laisse les sols sans protection pendant une grande partie de l'année.

Des mesures sous pluies simulées, effectuées dans les deux régions, montrent d'une part que les sols du Nordeste infiltrent beaucoup plus que leurs homologues africains, d'autre part que l'eau qui traverse un sol peu épais, riche en minéraux altérables, se charge beaucoup plus en sels dissous.

La complexité des interrelations entre l'aridité climatique et l'aridité édaphique est bien démontrée dans cette comparaison riche d'enseignements. Les mêmes contraintes climatiques et édaphiques n'entraînent pas forcément les mêmes conséquences sur la fragilité des milieux et la préservation de leurs potentialités.

Jacques CLAUDE : *hydrologue,*
Club des organismes de recherche associés (Clora),
47 rue Montoyer, 1040, Bruxelles, Belgique

Jean-Pierre CARBONNEL, Pierre HUBERT

Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne

Remise en cause de la stationnarité des séries

INTRODUCTION

Sans doute n'est-il pas nécessaire de rappeler l'importance de l'eau pour la vie, la santé et les activités humaines. Primordiale dans les régions soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, où l'eau constitue un facteur limitant du développement, cette importance ne peut que s'accroître par la priorité désormais reconnue à l'agriculture comme base du développement par de nombreux pays africains. Or l'eau disponible, susceptible de devenir ressource, provient des précipitations, et celles-ci sont mal connues.

Cette méconnaissance est d'abord due à la rareté des données d'observation disponibles. Les réseaux météorologiques officiels, aux niveaux régional et national, sont peu denses. Récentes pour beaucoup d'entre elles, de nombreuses stations présentent des lacunes dans leurs observations. L'information issue de réseaux locaux, implantés autour d'un centre de recherche ou pour une étude spécifique, est généralement peu accessible et/ou limitée quant à sa durée. Si l'on considère la surface d'un pluviomètre, 400 cm^2, et une densité - exceptionnelle en Afrique - de mise en place de 1 pour 100 km^2, le rapport d'échantillonnage n'est que de l'ordre de 10^{-8}. Cet appareil, le plus répandu, n'est l'objet, en général, que d'un relevé quotidien. Les pluviographes, qui permettent une meilleure résolution temporelle, demeurent rares. La fenêtre d'observation est donc extrêmement étroite.

On dispose depuis quelques années de mesures satellitaires qui échantillonnent de façon quasi instantanée des champs géophysiques sur des zones infiniment plus vastes (environ 25 km^2 pour Meteosat). Le champ des flux de précipitation leur est malheureusement inaccessible et il est difficile d'établir les formules empiriques qui permettraient d'estimer précisément les précipitations à partir d'autres champs, comme la température radiative du sommet des nuages, en l'absence d'une bonne connaissance des données au sol. En la matière, l'outil satellitaire pose autant de questions qu'il en résout.

Devant ces difficultés une attention toute particulière a été portée à l'étude des séries pluviométriques de longue durée observées en un lieu donné. On s'abstrait ainsi, dans un premier temps, du difficile problème de la variabilité spatiale du phénomène pluie.

Nous présentons ici une nouvelle méthodologie d'étude de ces séries et les résultats auxquels elle conduit.

L'approche proposée n'a pas la prétention de fournir une clé pour expliquer et prévoir la pluviométrie soudano-sahélienne mais seulement les éléments qui permettent de la décrire avec plus de rigueur à partir des outils mathématiques les mieux adaptés à sa nature.

NOTIONS DE PERSISTANCE

Sans précédent depuis le début du siècle, la sécheresse subie depuis bientôt vingt ans par l'Afrique de l'Ouest met en relief une des principales caractéristiques des séries météorologiques annuelles : la persistance (BRUNET-MORET et ROCHE, 1975). Cette dernière se traduit souvent par le rejet fréquent de l'hypothèse d'indépendance, par des coefficients d'autocorrélation souvent significatifs et par des coefficients de Hurst élevés (HURST, 1950).

Si le phénomène pluie s'exprimait dans le temps sous forme d'une suite stationnaire, distribuée normalement et dont les réalisations successives étaient indépendantes, la probabilité d'obtenir 20 réalisations consécutives inférieures à la moyenne (ce qui est le cas, depuis 1970, pour beaucoup de stations sahélo-soudaniennes) serait de l'ordre de 10^{-6} ! On se trouve là devant une incompatibilité entre les hypothèses classiques de stationnarité et d'indépendance des séries météorologiques d'une part, et la réalité des données de terrain d'autre part. Mais il en est souvent ainsi en hydrologie.

Pour tenter de rendre compte de ce phénomène de persistance, nous tenterons donc d'ajuster aux séries de pluviométries annuelles d'Afrique de l'Ouest une structure stochastique, en testant tout d'abord les hypothèses de stationnarité et d'indépendance de ces séries.

STATIONNARITÉ DES SÉRIES

La stationnarité des séries hydrométéorologiques a beaucoup préoccupé les chercheurs (BERNIER, 1977). BUISHAND (1982, 1984) a étudié et comparé plusieurs méthodes qui permettent de tester l'homogénéité des séries chronologiques. Nous utiliserons ici une méthode bayésienne (BLANCHET *et al.*, 1971), plus précisément celle décrite par LEE et HEGHINIAN (1977) dont une application en hydrologie de surface a été réalisée par BRUNEAU et RASSAM (1983). Le principe de la procédure de LEE et HEGHINIAN a été décrit précédemment (HUBERT et CARBONNEL, 1987). Nous l'avons appliquée à 42 séries pluviométriques réparties sur toute l'Afrique de l'Ouest entre 10° et 20° de latitude nord et entre 15° de longitude est et 17° de longitude ouest (fig. 1).

La plupart des séries pluviométriques étudiées présentent une probabilité maximale de rupture de stationnarité très nette vers la fin de la décennie 1960. Nous avons tenté une synthèse de l'ensemble des résultats du test pour les 42 stations, traduite par l'histogramme tracé en bas de la figure 2. Elle nous amène à situer la probabilité maximale de rupture de l'ensemble des séries soudano-sahéliennes étudiées au niveau de la transition 1969-1970*.

La procédure définie par LEE et HEGHINIAN suppose que les variances des 2 sous-séries obtenues par partition de la série initiale sont égales. Nous avons testé cette hypothèse chaque fois qu'un maximum de probabilité de rupture apparaissait. Les résultats du test d'égalité des variances des sous-séries (test F) sont indiqués sur la figure 2.

---

*On remarquera que, si l'on ne prend en compte que les stations purement sahéliennes, on obtient le même résultat.

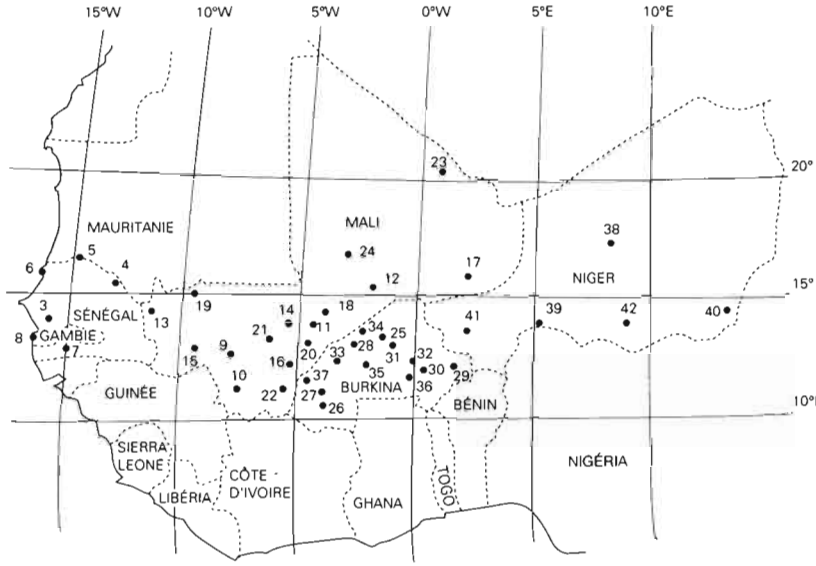


FIGURE 1 - *Localisation des stations étudiées et présentées à la figure 2.*

Sur les 42 séries étudiées, 35 ont un maximum de probabilité de rupture non situé à une extrémité de la série et c'est seulement pour 3 de ces séries que le test F est négatif.

À l'issue de cette étude, l'hypothèse de non-stationnarité des séries pluviométriques soudano-sahéliennes nous semble acceptable. On peut donc considérer que les séries pluviométriques étudiées ne sont pas homogènes. Elles sont constituées de 2 sous-séries homogènes, la seconde, à partir des années soixante-dix, étant plus courte et de moyenne sensiblement plus faible que la première. La superposition de ces 2 échantillons de populations différentes conduit à un échantillon global qui doit présenter une asymétrie positive.

SEGMENTATION DES SÉRIES

La mise en évidence de l'hétérogénéité des séries pluviométriques d'Afrique de l'Ouest a permis d'observer que certaines rares séries présentaient une double rupture de stationnarité. Cette observation nous a amenés à envisager la modélisation de ces séries dans une optique de segmentation. Pour ce faire, nous avons développé un algorithme original (HUBERT *et al.*, 1989) que nous ne reprendrons pas ici.

33 stations pluviométriques, réparties au Sénégal (10), au Mali (9), au Burkina Faso (5) et au Niger (9), ont été testées tant pour leur série de hauteurs annuelles de pluie que pour leur série de nombre annuel de jours de pluie. La longueur de ces séries varie

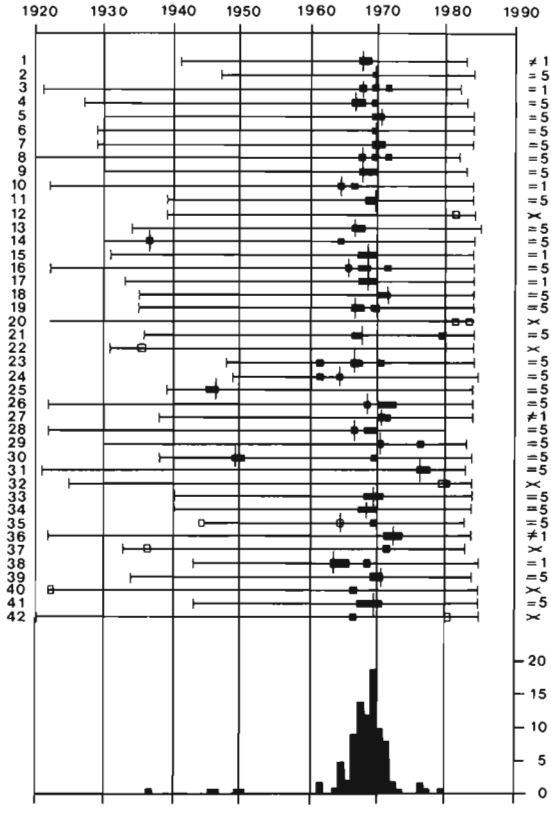


FIGURE 2 - *Tentative de synthèse de la procédure de* LEE *et* HEGHINIAN *appliquée à 42 séries pluviométriques annuelles d'Afrique de l'Ouest. Une ligne est consacrée à chacune des stations. Nous avons repéré, par un trait plein horizontal, la durée de la série pluviométrique étudiée. Un carré noir marque toute transition entre deux années, pour laquelle la probabilité de rupture est supérieure à 10 %, à condition que cette transition soit à plus de cinq années de l'extrémité des séries, ceci afin d'éliminer des effets de bord indésirables (une telle probabilité est cependant indiquée par un carré blanc). La transition à laquelle est associée la probabilité maximale de rupture est soulignée par un trait vertical. Nous avons ensuite sommé verticalement, c'est-à-dire pour chaque transition, le nombre de carrés noirs ; on obtient ainsi l'histogramme tracé au bas de la figure. Les résultats du test F sur l'égalité des variances des sous-séries délimitées par le test précédant sont reportés sur la partie droite de la figure. Ω = 5 Ω signifie que les variances sont égales au niveau de signification 5 % ; Ω = 1 Ω signifie que les variances sont égales seulement au niveau de signification 1 % ; Ω¡ 1 Ω signifie que les variances sont différentes au niveau de signification 1 % ; Ω x Ω signifie enfin que le test n'a pas été effectué (probabilité maximale de rupture à une extrémité de la série).*

de 36 à 63 ans (moyenne : 49 ans), elles débutent entre 1921 et 1947 et se terminent entre 1972 et 1984. La procédure de segmentation a été appliquée à ces séries avec un niveau de signification du test de Scheffé égal à 0,01.

La figure 3 présente les résultats obtenus. Chaque rupture mise en évidence est repérée par un astérisque. Cet astérisque est porté sur la ligne de l'année n si la rupture est repérée entre l'année n et l'année n + 1 ; à gauche s'il s'agit d'une diminution de moyenne, à droite s'il s'agit d'une augmentation de moyenne.

2 ruptures s'imposent : l'une positive, entre 1950 et 1951, qui correspond à la fin de la période sèche 1940-1945, l'autre négative, entre 1968 et 1969. Si la première, discrète pour la hauteur annuelle des précipitations, se trouve bien mise en évidence dans les séries de nombres de jours de pluie, la seconde apparaît nettement sur les deux paramètres climatiques étudiés.

On notera que ces 2 ruptures majeures s'étalent en réalité sur plusieurs années :

- de 1950 à 1952 et de 1949 à 1955, pour la première ;
- de 1964 à 1971 (les hauteurs) et de 1968 à 1971 (les nombres de jours de pluies annuels), pour la seconde.

En outre, on observe quelques signaux positifs de ruptures pendant les années trente et les années quarante mais leur niveau très modeste ne permet pas de les interpréter.

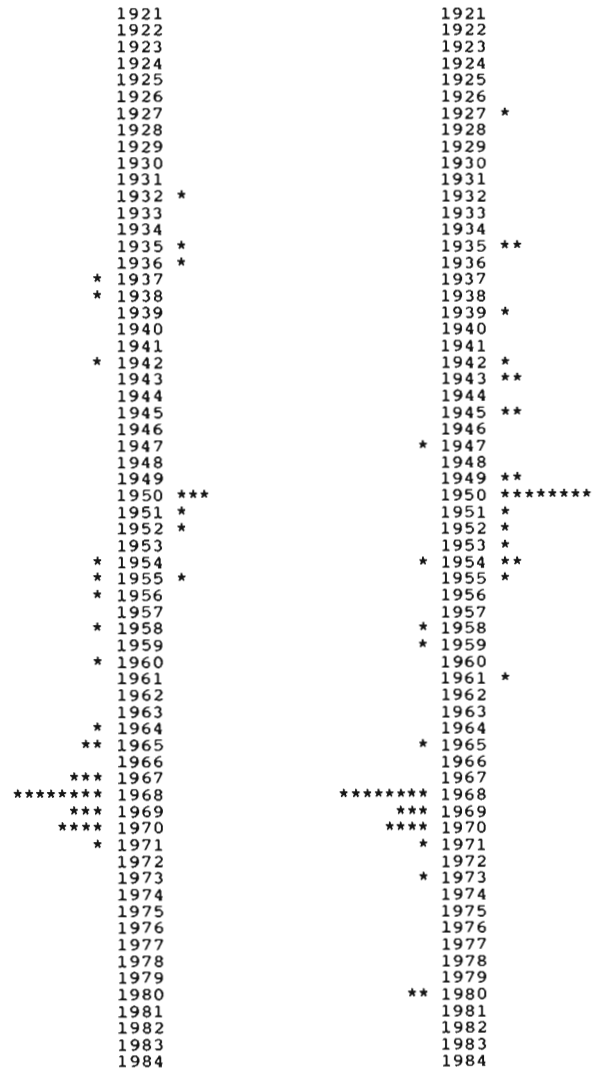


FIGURE 3 - *Synthèse des résultats de la procédure de segmentation appliquée aux séries pluviométriques annuelles (à gauche) et aux séries de nombre annuel de jours de pluies (à droite) ; le niveau de signification du test de Scheffé étant choisi égal à 0,01.*

Les quelques signaux négatifs situés dans les années cinquante peuvent sans doute être interprétés comme précurseurs de l'importante rupture de 1968-69 (CHAOUCHE, 1988).

Ces 2 ruptures se retrouvent au niveau des débits moyens annuels des deux principaux fleuves ouest-africains, le Niger et le Sénégal (HUBERT *et al.*, 1989). De plus, sur ces séries pour lesquelles nous disposons de mesures depuis le début du siècle, 2 ruptures antérieures à 1950, respectivement positive et négative, apparaissent en 1923-24 et 1932-33.

L'analyse des séries pluviométriques, pourtant sujettes à des aléas locaux, tout comme celle des séries de débits, qui intègrent les facteurs climatiques sur de vastes surfaces, permet de décrire leur évolution, en tant que succession de séquences climatiques contrastées, qui constituent autant de phases climatiques statistiquement distinctes.

Ces séquences sont longues de 9 à 19 ans et plus ; il n'est donc pas question de parler d'évolution cyclique du climat. De plus, elles s'inscrivent sur une tendance similaire et générale d'aridification puisque les phases relativement sèches ou humides ne sont pas, au cours de ce siècle tout du moins, remontées au niveau atteint par les précédentes phases relativement sèches ou humides.

La modélisation d'un tel comportement peut alors être envisagée comme la superposition de 3 processus aléatoires :

- l'un concernerait la longueur des segments ;
- le suivant, le niveau moyen de ces segments ;
- le dernier, enfin, représenterait un bruit autour de ce niveau moyen.

Malheureusement, le matériel statistique à notre disposition est bien limité pour aller plus avant dans la modélisation de ces processus stochastiques, en particulier de celui qui concerne la longueur des segments.

La tendance générale à l'aridification mise en évidence semble bien s'inscrire dans la logique de l'évolution générale du climat ouest-africain depuis la fin de la dernière période humide importante ; datée à environ - 4000 BP, celle-ci a été observée depuis le début du XVIIIe siècle, en particulier à travers les variations de niveau du lac Tchad (MALEY, 1981). Mais nous venons de voir que cette aridification n'est pas un processus continu. En fait, il semble nécessaire de considérer que le bilan énergétique global, qui définit le climat avec ses modalités régionales, ne peut être en équilibre qu'autour de certains états discrets dont on retrouverait la trace au niveau des paramètres climatiques.

PARAMÈTRES DESCRIPTIFS DE L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE RÉCENTE

L'évolution climatique récente se concrétise également par des changements au cours du déroulement de la saison pluvieuse. Ceux-ci intéressent aussi bien la répartition temporelle des pluies que les quantités de pluies apportées à différentes échelles de temps. Nous présentons ici les principaux paramètres évolutifs étudiés jusqu'alors.

FRACTIONS PLUVIOMÉTRIQUES

En vue de caractériser avec davantage de précision la tendance générale de l'évolution climatique, les hauteurs de pluies journalières ont été réparties en 3 classes (CARBONNEL, 1983) :

- P1 = somme des pluies journalières inférieures à 20 mm ;
- P2 = somme des pluies journalières comprises entre 20 et 40 mm ;
- P3 = somme des pluies journalières supérieures à 40 mm.

L'étude de l'évolution temporelle de ces différentes fractions sur l'ensemble des stations du Burkina Faso (ALBERGEL *et al.*, 1984) a montré une bonne relation entre P3 et la pluie annuelle, donc une cofluctuation de ces 2 variables, et une relative constance de la variable P1, que nous avons appelée «bruit de fond» de la mousson.

Il apparaît donc que le passage de la phase humide, antérieure à 1968, à la phase sèche actuelle se fait par une diminution significative des pluies supérieures à 40 mm.

Cependant, les pluies maximales semblent échapper à cette règle. En effet, il a été montré (ALBERGEL, 1987) que la probabilité d'occurrence des précipitations maximales à chaque station prise individuellement est équivalente dans les 2 périodes.

Sur un plan météorologique, ces résultats tendraient donc à prouver que la phase sèche actuelle se caractérise par une moindre production des épisodes convectifs res-

ponsables de la majorité de la pluviométrie intertropicale, sans affecter cependant les épisodes extrêmes, lesquels procéderaient de situations météorologiques différentes.

RÉPARTITION TEMPORELLE DES PLUIES DURANT LA SAISON PLUVIEUSE

On sait que, plus encore que la hauteur totale annuelle des précipitations, la répartition des pluies est le principal facteur limitant de l'agriculture intertropicale. Si les nouvelles variétés de mil à cycle court - 90 jours - permettent *a priori* une meilleure utilisation des ressources en eau, ces dernières doivent-elles encore assurer le développement normal du cycle végétatif pendant trois mois consécutifs.

Une première tentative de description de la forme de la saison pluvieuse s'est intéressée aux coefficients de forme (asymétrie et aplatissement) des histogrammes décadaires des pluies (GALLE, 1985). Aucune conclusion valable pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest n'a pu être obtenue. MOREL (1986), cependant, a pu montrer pour 10 stations ouest-africaines qu'il existait, à l'échelle mensuelle, un net fléchissement des pluies d'août et, selon les stations, des pluies de juin et/ou de septembre.

Si nous appelons «médiane décadaire d'une sous-série, relative à la jième décade», la médiane de la série des x (i, l) où l = j et i varie entre les limites de la sous-série

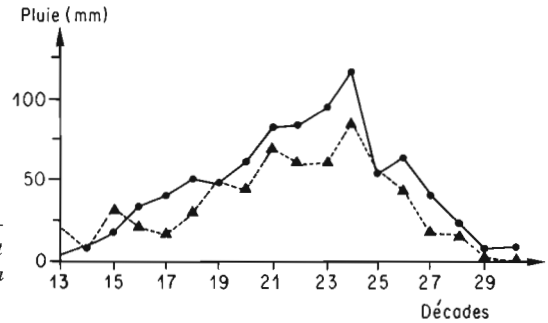


FIGURE 4 - *Médianes décadaires des sous-séries 1950-1967 (en trait continu) et 1968-1980 (en trait discontinu) pour la station de Dedougou (Burkina Faso).*

considérée, pour la station de Dedougou, par exemple, en considérant les 2 sous-séries délimitées par la procédure de segmentation, l'évolution des médianes décadaires relatives aux décades comprises entre le 1er mai (décade 13) et le 31 octobre (décade 30) est représentée sur la figure 4.

La comparaison des 2 graphiques montre que certaines décades ont des médianes décadaires très proches (décades de mai, juillet, octobre) ; d'autres en revanche (des mois de juin, août, septembre) présentent de forts contrastes d'une phase stationnaire à la suivante.

Ce phénomène, observé de façon systématique pour la quasi-totalité des stations considérées, suggère qu'une saison des pluies peut être caractérisée par certaines décades bien définies.

Ce résultat a fait rechercher de façon systématique des ruptures de stationnarité dans les séries de hauteurs relatives à des intervalles de temps qui couvrent 1, 2 ou 3 décades consécutives, comprises entre les 13e et 30e décades (CHAOUCHE, 1988). La procédure de segmentation, précédemmment utilisée, à laquelle est attaché un niveau

de signification, a été appliquée à ces séries. Elle ne montre pas de signal de rupture net à l'exception des séries mensuelles des pluies de septembre. La grande variabilité interannuelle des hauteurs décadaires, bidécadaires ou mensuelles, peut être invoquée pour expliquer ce résultat négatif. La hauteur de pluie a été remplacée par une variable plus robuste, le rang de ces hauteurs décadaires et la même procédure de segmentation lui a été appliquée (fig. 5). Parmi ces séries, celles qui fournissent les signaux de rupture les plus nets sont relatives :

- à la décade 24 (20-31 août), laquelle présente une rupture positive, en 1950, et une rupture négative, entre 1964 et 1972 ;
- aux décades 17, 18, 25 et 28, qui présentent une seule rupture négative de stationnarité entre 1967 et 1973.

La même procédure, appliquée aux séries des rangs des hauteurs bidécadaires, fait apparaître des ruptures de stationnarité significatives pour les groupements de décades suivants : 17 et 18 (11-30 juin), 22 et 23 (1er-20 août), 23 et 24 (11-31 août) et 27 et 28 (21 septembre-10 octobre).

Pour les séries des rangs des hauteurs mensuelles, les signaux de rupture les plus nets sont relatifs :

- aux mois de juin (saut négatif entre 1966 et 1971 et saut positif, moins prononcé, en 1952-53) ;
- d'août (saut négatif de 1959-60 et, surtout, saut négatif entre 1966 et 1972) ;
- de septembre (saut positif en 1950 et saut négatif entre 1967 et 1972).

La segmentation des séries des rangs des nombres mensuels de jours de pluie présente les mêmes ruptures, positives en 1950 et négatives entre 1966 et 1971.

Ainsi, le passage d'une phase climatique définie par la segmentation des séries climatiques annuelles à une autre se fait bien avec une modification de leur répartition temporelle. Ce changement n'est pas constant au cours du déroulement de la saison des pluies. 5 décades (17, 18, 24, 25 et 28) sont particulièrement touchées et semblent en premier lieu responsables de l'évolution de la structure de la saison pluvieuse.

C'est donc la deuxième moitié de la mousson, principalement, qui est affectée. Le nombre de situations météorologiques de caractère convectif (lignes de grains) diminue, ainsi que leur productivité, mais ce phénomène se fait notablement sentir durant les mois de juin, août et septembre, pour l'essentiel.

DURÉE DES ÉPISODES PLUVIEUX ET DES ÉPISODES SECS AU SEIN DE LA SAISON DES PLUIES

Les données pluviométriques dont on dispose sont majoritairement composées de données journalières (type météorologie 8 h-18 h), il est alors impossible de définir le nombre et la durée des épisodes pluvieux réels. En revanche, il est permis de définir des séquences de jours pluvieux et de jours secs successifs. C'est ce que nous avons réalisé pour une station synoptique - celle de Ouagadougou-Aéro - entre le 1er mai et le 31 octobre, pour les années 1952 à 1986 (l'année 1977, incomplète, n'est pas prise en compte). Dans cet intervalle de temps et pour chaque année, nous avons calculé le nombre de séquences de jours pluvieux et de jours secs consécutifs de n jours (n variant de 1 à plus de 7 jours) (tabl. I).

De part et d'autre de la rupture de stationnarité de la série des hauteurs annuelles en 1968-69, la durée moyenne des épisodes pluvieux passe de 1,80 ± 0,3 à 1,55 ± 0,16 jours. Cette différence est significative au sens du test de Student (n. s. = 0,5 %). Cependant, le nombre d'épisodes pluvieux de chaque année est relativement constant :

- pour la période 1952-1968 : 39,8 ± 3,4 ;
- pour la période 1969-1986 : 40,5 ± 2,7.

1927	1927	1927	1927	1927 **	1927	
1928	1928	1928	1928	1928	1928	
1929	1929	1929	1929	1929	1929	
1930	1930	1930	1930	1930	1930	
1931	1931	1931	1931	1931	1931	
1932	1932	1932	1932	1932	1932	
1933	1933	1933	1933	1933	1933	
* 1934	1934	1934	1934	1934	1934 *	
1935	1935 *	1935	1935	1935 **	1935 **	
1936	1936	1936	1936	1936	1936	
1937	1937	1937	* 1937	1937 *	1937	
1938	1938	1938	1938	1938	1938	
1939	1939	1939	1939	1939	1939	
* 1940	1940	1940	1940	1940	1940	
1941	1941	1941	1941	1941	1941 *	
1942	* 1942	1942	1942	1942 *	1942	
* 1943	1943	1943	* 1943	1943 *	1943 **	
1944	1944	1944	1944	1944	1944	
1945	1945	1945	1945	1945	1945	
1946	1946	1946	1946	1946	1946 *	
1947	1947	1947	1947 *	1947	* 1947	
1948	1948	1948	1948 *******	* 1948	1948	
1949	1949	1949	1949	1949	1949	
1950	1950 *	1950 *	1950	1950	1950 *****	
1951	* 1951	1951	1951	1951 *	1951	
1952	* 1952	1952	1952 ***	1952	1952 *	
1953	1953	1953	1953 ***	1953	1953	
1954	1954	1954	1954	1954 ***	1954	
1955	1955	1955	1955	1955	1955 *	
1956	1956	1956	1956	1956	1956	
1957	1957	1957	1957	1957 *	1957	
1958	1958	1958	1958	1958	1958	
1959	** 1959	1959	1959	1959	1959	
1960	1960	1960	1960	1960	1960	
1961	1961	1961	1961	1961	* 1961	
1962	* 1962	* 1962	1962	1962	1962	
1963	1963	1963	1963	1963	1963	
1964	1964	1964	1964 *	* 1964	1964	
1965	1965	1965	1965	* 1965	1965	
* 1966	**** 1966	1966	1966	* 1966	* 1966	
* 1967	* 1967	1967	1967	1967	1967	
*** 1968	***** 1968	** 1968	* 1968	** 1968	***** 1968	
** 1969	* 1969	*** 1969	*** 1969	1969	** 1969	
** 1970	* 1970	**** 1970	* 1970	* 1970	** 1970	
1971	* 1971	*** 1971	1971	1971	1971	
1972	** 1972	* 1972	1972	*** 1972	1972	
1973	1973	1973	1973	1973	1973	
** 1974	1974	1974	1974	* 1974	1974	
1975	** 1975	1975	1975	** 1975	1975	
1976	* 1976	* 1976	1976	* 1976	1976	
1977	1977	1977	1977	1977	1977	
1978 *	1978	* 1978	1978	1978	1978	
1979	** 1979	* 1979	1979	1979	1979	
1980	1980	* 1980	1980	1980	* 1980	
1981	1981	1981	* 1981	1981	1981	
1982	1982	1982	1982	1982	1982	
1983	1983	1983	1983	1983	1983	
1984	1984	1984	1984	1984	1984	

FIGURE 5 - *Synthèse des résultats de la segmentation des séries des rangs. De gauche à droite : des hauteurs de pluie de juin, août, septembre, des nombres de jours. de pluie de juin, août et septembre (même légende que fig. 3).*

Tableau I - Station pluviométrique de Ouagadougou-Aero. Nombre de jours pluvieux et secs consécutifs du 1er au 30 octobre

Jours	SÉQUENCES PLUVIEUSES									SÉQUENCES SÈCHES								
	1	2	3	4	5	6	7	>7	*Moy.*	1	2	3	4	5	6	7	>7	*Moy.*
1952	23	6	3	3	0	1	0	2	2,56	17	8	6	2	3	0	2	1	2,62
1953	25	6	6	2	0	0	0	1	1,80	17	10	3	5	0	1	2	3	2,73
1954	25	10	1	4	0	1	0	0	1,71	16	13	4	3	2	1	0	3	2,71
1955	27	6	7	2	1	0	0	0	1,70	16	17	3	4	0	1	1	2	2,52
1956	22	10	4	0	2	0	0	1	1,87	16	15	0	4	1	1	1	2	2,75
1957	30	11	3	1	0	0	0	1	1,59	21	11	5	4	2	0	0	3	2,41
1958	29	7	1	0	2	0	0	1	1,73	20	9	3	6	0	1	0	2	2,80
1959	19	5	4	2	0	0	1	1	2,25	11	6	6	3	2	1	1	3	3,39
1960	22	10	5	2	1	1	0	0	1,85	19	10	4	5	1	0	0	3	2,57
1961	25	4	1	3	2	0	0	0	1,66	14	8	6	3	1	1	1	2	3,50
1962	24	9	4	2	0	1	0	1	1,85	18	8	5	4	3	1	1	1	2,63
1963	24	8	4	1	1	1	0	0	1,72	16	8	7	3	2	1	0	3	2,95
1964	23	6	5	2	1	0	0	1	2,21	18	9	5	3	2	0	0	2	2,55
1965	33	7	2	1	1	0	0	0	1,41	17	14	4	3	2	2	1	2	2,71
1966	27	13	2	1	0	0	0	0	1,47	23	7	5	4	2	1	0	3	2,69
1967	16	11	3	2	3	0	1	0	2,11	16	10	5	1	1	1	1	2	2,86
1968	28	7	2	0	1	1	0	1	1,68	16	10	5	2	4	0	1	3	2,85
1969	22	8	3	2	3	0	0	0	1,84	13	10	6	5	0	2	0	3	2,90
1970	29	4	3	3	0	0	0	1	1,65	18	9	4	1	4	1	0	3	2,95

1971	25	6	4	0	1	0	0	0	1,50	13	7	8	1	1	2	0	5	3,51
1972	31	7	3	3	0	0	0	0	1,50	20	10	4	6	1	1	0	3	2,60
1973	27	10	0	2	0	0	0	0	1,41	8	17	3	5	4	0	0	3	3,23
1974	24	7	7	0	0	1	0	0	1,67	15	7	9	5	0	0	2	2	2,98
1975	23	11	2	2	1	0	0	0	1,64	14	11	4	5	1	1	0	4	3,00
1976	32	8	4	1	0	1	0	0	1,52	23	9	4	2	3	4	2	0	2,43
1977	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1978	23	9	5	2	1	0	0	0	1,73	14	10	8	2	1	2	1	3	2,80
1979	27	6	6	0	0	0	0	1	1,78	14	9	5	2	3	5	0	1	2,83
1980	31	8	2	2	0	0	0	0	1,42	15	13	5	4	2	1	0	4	2,80
1981	30	6	3	2	1	0	0	0	1,52	16	12	6	2	2	2	0	2	2,86
1982	26	10	5	1	0	0	0	0	1,55	15	10	5	6	2	3	1	1	2,77
1983	34	3	2	1	0	0	0	0	1,25	14	9	7	3	4	1	1	2	3,27
1984	31	8	3	0	0	0	0	0	1,33	18	6	3	10	2	1	0	3	2,74
1985	18	14	4	0	0	0	0	0	1,61	11	13	5	4	0	0	0	4	3,41
1986	31	10	1	1	0	0	0	0	1,35	13	12	8	2	5	0	2	1	2,93
Moyenne																		
1951-68	24,8	8,0	3,4	1,7	0,9	0,4	0,1	0,6	1,80	17,1	10,2	4,5	3,5	1,7	0,8	0,7	2,4	2,78
	±4,1	±2,5	±1,8	±1,1	±0,9	±0,5	±0,3	±0,6	±0,30	±2,7	±3,0	±1,6	±1,2	±1,1	±0,6	±0,7	±0,7	±0,28
1969-86	27,4	7,9	3,4	1,3	0,4	0,1	0,0	0,1	1,55	14,9	10,2	5,5	3,8	2,1	1,5	0,5	2,6	2,94
	±4,2	±2,7	±1,8	±1,1	±0,8	±0,3	±0,0	±0,3	±0,16	±3,4	±2,7	±1,9	±2,3	±1,6	±1,4	±0,8	±1,3	±0,28

On interprète généralement la succession des épisodes secs et pluvieux selon un modèle Markovien d'ordre 1 du type :

$$\begin{bmatrix} Ps \\ Ph \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pss & Phs \\ Psh & Phh \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ps \\ Ph \end{bmatrix}$$

Avec les hypothèses d'un tel modèle, les probabilités d'apparition d'un jour sec ou pluvieux peuvent s'exprimer en fonction de la durée moyenne des épisodes secs ou pluvieux comme :

$$Ps = \frac{Ts}{Ts + Th} \qquad Ph = \frac{Th}{Ts + Th}$$

Cette formulation conduit à des estimations de Ps et de Ph bien meilleures que celles issues d'une analyse fréquentielle ; en effet, ces dernières risquent d'être profondément biaisées en raison des phénomènes de persistance, lesquels justifient d'ailleurs l'hypothèse Markovienne.

Pour les 2 sous-séries (1952-1968 et 1969-1986) on obtient des valeurs qui indiquent une évolution très sensible (tabl. II).

Tableau II - Probabilité d'apparition d'un jour sec (Ps) ou pluvieux (Ph) pour les périodes 1952-1968 et 1968-1986. Station de Ouagadougou (Burkina Faso)

	1952-1968	1969-1986
Ps	0,60	0,66
Ph	0,40	0,34

CONCLUSIONS

L'étude de l'évolution climatique récente que nous avons présentée ici n'aborde pas le problème des causes naturelles et/ou anthropiques de cette évolution. Nous avons considéré les données des séries chronologiques de mesures climatiques ouest-africaines indépendamment des processus qui les produisent.

Cette démarche nous a conduits à remettre en cause l'hypothèse, généralement admise, de stationnarité à court terme (quelques décennies) des séries climatiques. Au contraire, il semble bien que de réelles modifications climatiques ont été observées.

L'évolution climatique n'a pas été continue et encore moins cyclique. Depuis le début du siècle, se dessine une tendance générale à l'aridification de la zone géographique intéressée par notre travail ; cette aridification se développe à travers une série de paliers que nous interprétons comme une succession d'états d'équilibre du bilan énergétique régional.

Au plan théorique, ces résultats nous suggèrent de considérer ces séries comme résultant de la composition de 3 processus aléatoires qui gouvernent respectivement :

- la durée moyenne des différentes phases climatiques ;
- le niveau moyen de ces phases ;

- la fluctuation autour de ce niveau moyen.

Sur le plan pratique, la longueur des chroniques disponibles est malheureusement trop courte pour permettre d'estimer les paramètres d'un tel modèle et donc d'envisager une prévision, même de l'avenir proche.

Le passage d'une phase relativement humide à une phase relativement sèche est sensible à travers l'évolution d'un certain nombre de paramètres descriptifs de la saison des pluies :

- la hauteur pluviométrique annuelle (P) diminue depuis quatre-vingts ans, la diminution la plus brutale - de l'ordre de 30 % en moyenne - a eu lieu aux alentours de 1968 ;
- le nombre annuel de jours de pluie (N) diminue également, mais pas dans les mêmes proportions ; la «productivité» (P/N) moyenne des épisodes pluvieux tend, de ce fait, elle aussi, à diminuer ;
- des fractions pluviométriques qui composent la pluie annuelle :

$$P = P1\ (S\ 0\text{-}20\ mm) + P2\ (S\ 20\text{-}40\ mm) + P3\ (S > 40\ mm)$$

c'est la fraction P3 qui est la plus affectée par la diminution de la pluviométrie annuelle : $P = f\ (P3)$;

- la diminution des précipitations n'est pas identique tout au long de la saison des pluies. Les mois de juin, août et septembre, et plus particulièrement les décades 17, 18, 24, 25 et 28, paraissent les plus touchés par l'évolution pluviométrique ;
- enfin la longueur des épisodes humides au cours de la saison des pluies tend à diminuer et celle des épisodes secs à augmenter alors que leur nombre resterait relativement constant du 1er mai au 31 octobre.

Si, à travers la démarche poursuivie, on commence à mieux connaître certains éléments descriptifs de l'évolution climatique actuelle, il reste cependant à en comprendre les causes. Celles-ci ressortissent au domaine de la dynamique atmosphérique qui n'appartient pas à notre propos. L'Afrique de l'Ouest subit une évolution climatique qui ne peut être isolée de l'évolution générale du climat terrestre ; c'est donc à cette échelle que le problème des causes et des processus inducteurs de cette évolution devra être abordé.

Cette dernière constatation tend à faire apparaître les modifications environnementales régionales (déforestation, pression anthropique) comme secondaires par rapport à une évolution planétaire du climat où les facteurs anthropiques (augmentation du CO2 atmosphérique, par exemple) ont certainement leur place.

J.-P. CARBONNEL : *climatologue,*
département de géologie dynamique, université Pierre-et-Marie-Curie, 75252 Paris cedex 5
P. HUBERT : *hydrologue,*
École des mines, CIG, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987. - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Thèse université Paris VI, *multigr.*, 341 p.

ALBERGEL (J.), CARBONNEL (J.-P.) et GROUZIS (M.), 1984. - Péjoration climatique du Burkina Faso. Incidences sur les ressources en eau et sur les productions végétales. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n°1 : 3-19.

BALLERINI (R.) et BOES (D. C.), 1985. - Hurst behavior of shifting level processes. *Water Resources Res.*, 21 (4) : 1642-1648.

BERNIER (J.), 1977. - Étude de la stationnarité des séries hydrométéorologiques. *La Houille Blanche*, 4 : 313-319.

BLANCHET (M.), BOUZID (M.), DELHOMME (R.), OUAKAM (J. P.), PIETRI (M.) ET BERNIER (J.), 1971. - Phénomènes de rupture dans une série chronologique. *Rev. Stat. Appl.*, 19 (4) : 5-22.

BOES (D. C.) AND SALAS (J. D.), 1978. - Nonstationarity of the mean and the hurst phenomenon. *Water Resources Res.*, 14 (1) : 135-143.

BRUNEAU (P.) et RASSAM (J. C.), 1983. - Application d'un modèle bayésien de détection de changement de moyenne d'une série. *Hydrol. Sci. J. Sci. Hydrol.*, 28 : 341-354.

BRUNET-MORET (Y.) ET ROCHE (M.), 1975. - Persistance dans les suites chronologiques de précipitations annuelles. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XII : 147-165.

BUISHAND (T. A.), 1982 - Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.*, 58 : 11-27.

BUISHAND (T. A.), 1984. - Tests for detecting a shift in the mean of hydrological times series. *J. Hydrol.*, 73 : 51-69.

CARBONNEL (J.-P.), 1983. - Évolution climatique récente en Haute-Volta. Première partie. *Notes et Documents Voltaïques*, 14 (3/4) : 1-20.

CARBONNEL (J.-P.), 1984. - Évolution climatique récente en Haute-Volta. Deuxième partie. *Notes et Documents Voltaïques*, 15 (1/2) : 14-24.

CARBONNEL (J.-P.) et HUBERT (P.), 1985. - Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute-Volta). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 301, II, n° 13 : 941-944.

CARBONNEL (J.-P.), HUBERT (P.) ET CHAOUCHE (A.), 1987. - Sur l'évolution séquentielle de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest depuis le début du siècle. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 305, II, : 625-628.

CHAOUCHE (A.), 1988. - Structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne. Thèse doct. École des mines de Paris, déc. 1988, 1 vol. *multigr.*, 263 p.

CHARNEY (J. G.), 1975. - Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 101 : 193-202.

FAURE (H.) et GAC (J.-Y.), 1981. - Will the sahelian drought end in 1985. *Nature*, 291 (5815) : 475-478.

GAC (J.-Y.) et FAURE (H.), 1987. - Le «vrai» retour à l'humide au Sahel est-il pour demain. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 305, II : 777-781.

GALLE (C.), 1985 - Structure temporelle des pluies de mousson en zone soudano-sahélienne. Mémoire DEA, univ. Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 42 p. + ann.

HASTEN (S.), 1984. - Predictability of north-east Brazil droughts. *Nature*, 307 : 531-533.

HUBERT (P.) et CARBONNEL (J -P.), 1986. - Approches statistiques de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 197 : 199-202.

HUBERT (P.) et CARBONNEL (J.-P.), 1987. - Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 95 : 165-183.

HUBERT (P.), CARBONNEL (J.-P.) et CHAOUCHE (A.), 1989. - Segmentation des séries hydrométéorologiques. Applications à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 110 (1989) : 349-367.

HURST (H. E.), 1950. - Longterm storage capacity of reservoirs. *Proc. Amer. Soc. civil Eng.*, 76 (11).

KANE (R. P.) et TRIVEDI (N. B.), 1986. - Are droughts predictable. *Climatic Change*, 8 : 209-223.

KLEMES (V.), 1974. - The hurst phenomenon : a puzzle ? *Water Resource Res.*, 10 (4) : 675-688.

LEE (A. F. S.) et HEGHINIAN (S. M.), 1977. - A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables - a Bayesian approach. *Technometrics*, 19 : 503-506.

MALEY (J.), 1981. - Études palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 129, 586 p.

MOREL (R.), 1986. - Problèmes posés par les normes pluviométriques dans la région sahélienne. Coll. intrafricain sur la Révision des normes hydrologiques, CIEH, Ouagadougou.

NICHOLSON (S. E.), 1983. - Sub-saharan rainfall in the years 1976-80 : evidence of continued drought. *Monthy Weather Rev.*, 111 : 1646-1654.

OLIVRY (J.-C.), 1983. - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries pluviométriques de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 20 (1) : 47-69.

POTTER (K. W.), 1976. - Evidence of nonstationarity as a physical explanation of the hurst phenomemon. *Water Resources Res.*, 12 (5) : 1047-1052.

SIRCOULON (J.), 1976. - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses «1913» et «1940». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 13 (2) : 75-174.

SNIDJERS (T. A.), 1986. - Interstation correlations and nonstationarity of Burkina Faso rainfall. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25 : 524-531.

THIRRIOT (C.) et ARNAUD (M.), 1985. - Leçons et ambiguïté d'une longue série pluviométrique à Toulouse. *J. Rech. Atmos.*, 19 (1) : 25-45.

Jacques SIRCOULON

Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'Ouest

Variabilité et évolution actuelle

INTRODUCTION

En se référant à des critères basés sur l'écoulement, les hydrologues (RODIER, 1964) font correspondre la zone aride d'Afrique de l'Ouest au régime subdésertique, limité au nord par l'isohyète 100 mm, et la zone semi-aride au régime sahélien, limité au sud par l'isohyète 750 mm. Les auteurs s'entendent à l'heure actuelle pour estimer que la limite entre zone aride et zone semi-aride correspond à une hauteur annuelle de précipitations comprise entre 400 et 500 mm.

Ces 2 zones forment une bande d'environ 600 km de large qui traverse tous les pays francophones au sud du Sahara. Les limites de cette bande sont très mouvantes sur le terrain, car, en l'espace de quelques décennies, les isohyètes précitées peuvent se déplacer de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord (période humide 1950-1965) ou régresser encore plus nettement vers le sud (sécheresse actuelle).

La mobilisation de toutes les ressources en eau (précipitations, eaux de surface, eaux souterraines) se révèle nécessaire pour permettre le maintien de l'homme dans un environnement climatique difficile.

Les eaux de surface, traitées ici, constituent un capital remarquablement variable dans le temps et dans l'espace. Après de longs mois de saison sèche, il survient un écoulement plus ou moins bref et localisé qui peut se montrer, selon les années, insignifiant ou représenter des crues violentes au caractère aussi dévastateur que momentané.

Une bonne connaissance de cette ressource et de ses fluctuations est un préalable indispensable à une gestion efficace de cette richesse fugace. Les données disponibles sur l'écoulement sont malheureusement limitées, souvent fragmentaires, voire inexistantes en certaines régions. De solides raisons l'expliquent :

- la faible densité des réseaux de mesures, limités le plus souvent aux zones les plus facilement accessibles ;
- leur exploitation très onéreuse ;
- les mesures souvent rendues délicates ou dangereuses par la brièveté de l'écoulement ou par la violence des crues ;
- le personnel spécialisé peu nombreux et souvent mal préparé aux dures contraintes du terrain.

Cependant, le développement de ces régions et l'accroissement démographique continu, entraînent une augmentation constante des besoins en eau ; ceux-ci sont d'autant plus difficiles à satisfaire que l'on observe une diminution très préoccupante des précipitations depuis maintenant deux décennies.

HISTORIQUE DE LA CONNAISSANCE DE LA RESSOURCE

Avant les années quarante, dans l'ensemble des zones sahéliennes et sahariennes, il n'existe aucune donnée d'ordre quantitatif sur l'écoulement, si l'on fait abstraction des fleuves tropicaux qui parviennent aux régions arides, pour lesquels quelques stations anciennes sont bien connues (*cf. infra*).

DUBIEF (1953) a publié des renseignements d'ordre qualitatif à propos des écoulements qui ont pu se produire sur les oueds sahariens depuis le début du XXe siècle. Il s'agit d'indications sommaires et fragmentaires sur le nombre de crues, leur durée, et les points extrêmes atteints en aval. Cet important inventaire est constitué des informations obtenues auprès des populations nomades et des militaires ;

il concerne un certain nombre de cours d'eau qui empruntent en général des lits fossiles et qui appartiennent aux principaux massifs montagneux, depuis le Maroc et l'Algérie jusqu'au Mali actuel. Les éléments recueillis montrent que des écoulements très localisés peuvent se produire chaque année, même en zone désertique.

La connaissance correcte du régime des petits cours d'eau devenait cruciale dès 1951 - une date qui coïncide par ailleurs avec le début d'une phase climatique plus humide -, car les crues détruisaient de nombreux ouvrages ou aménagements (ponts, barrages réservoirs).

Cette période allait connaître la mise en place des premières mesures indispensables de terrain ; alors de création récente, le Service hydrologique de l'ORSTOM, associé à l'Électricité de France, allait jouer un rôle majeur, secondé progressivement par un certain nombre d'organismes (Services de l'hydraulique ou du Génie rural, missions d'aménagements des grands fleuves, Office du Niger, Mission des vallées sèches du Niger, etc.).

Dès l'origine, l'insertion de l'ORSTOM dans les structures hydrologiques de l'Afrique de l'Ouest prenait ainsi des formes très variées, depuis la mise à disposition d'hydrologues (missions d'aménagement des grands fleuves) jusqu'à la gestion directe de réseaux (comme celui du Tchad).

Les missions dévolues (ROCHE, 1983) s'énonçaient ainsi :

- la mise au point de méthodes d'observations et de mesures ;
- l'organisation de la gestion des stations permanentes (adaptées aux conditions locales) ;
- la détermination des grands traits des régimes et des caractéristiques hydrologiques ;

l'assistance au développement intervenait dans les nombreux domaines concernés par les ressources en eau (hydroélectricité, navigation, transports routiers et ferroviaires, aide à l'agriculture, etc.).

La connaissance des crues (pointe et volume) était le premier objectif hydrologique à réaliser. Dès 1953-54, commençait l'installation de bassins représentatifs où l'on recueillait une information précieuse sur les précipitations, en plus des données sur l'écoulement ; à partir de 1956, ces actions devaient se multiplier considérablement avec l'appui des administrations et des bureaux d'étude. En 1956-57 enfin, des campagnes extensives de mesure dans les régions les plus arides étaient lancées.

Ce sont ces actions dans les diverses zones climatiques que nous allons évoquer brièvement.

Bassins d'études et campagnes extensives

Les grands massifs en zone désertique (moins de 100 mm annuels de pluie) ont fait l'objet de campagnes de mesures à caractère extensif dans des conditions souvent difficiles. Ces véritables expéditions, qui commençaient en véhicules tous-terrains, se ter-

minaient souvent à dos de dromadaire ou à pied. Citons les campagnes de l'Ennedi (BRAQUAVAL, 1957 ; ROCHE, 1958), de l'Aïr (LEFEVRE, 1959 ; ROCHE, 1965), du Tibesti (BRUNET-MORET, 1963). Trois bassins représentatifs étaient aménagés dans l'Ennedi, en 1958-59, et dans l'Aïr, en 1959-60. Dans ce dernier massif, les études sur le Teloua, qui avaient repris en 1975, se poursuivent actuellement.

Les études en zone subdésertique, commencées à la même époque, sont déja plus nombreuses. Outre les campagnes déja mentionnées, on doit citer les missions ORSTOM dans le Brakna et le Tagant (1958-59), celles du nord de l'Ouaddaï (1961) et de l'Affole en Mauritanie (1960). D'autres études ont été conduites par les services du Génie rural de Mauritanie (Oued Ketchi, lac Aleg) et par ceux du Niger en 1966 et en 1967 notamment.

Les bassins représentatifs, au nombre d'une dizaine, couvrent en général le centre de la zone subdésertique depuis la Mauritanie (Dionaba, 1958-59) jusqu'au Tchad (Kadjemeur, 1965-66, Razelmamoulni, 1959-60). Ces bassins, qui n'ont fonctionné que deux ou trois ans, ont été installés pour la plupart à la fin des années cinquante, au cours d'une période climatique plus favorable. Le seul bassin récent, celui de l'Oued de Kidal dans l'Adrar des Iforas a été suivi en 1984 et surtout en 1986 (PEPIN *et al.*, 1987). Comme pour le régime désertique, il n'existe pas de stations permanentes de réseau dans ces régions.

En zone sahélienne au sens strict (hauteur annuelle de précipitations comprise entre 400 et 750 mm), les données recueillies depuis une trentaine d'années, bien que plus abondantes, demeurent cependant très insuffisantes dans certaines régions. Des études régionales, menées sur des périodes de deux à quatre ans, couvrent toute la zone sahélienne, avec des lacunes toutefois. Des séries d'observations nettement plus longues concernent le Burkina Faso uniquement (lac de Bam, 1966-1974 ; mare d'Oursi, 1976-1981). Environ 35 ensembles de bassins représentatifs ont été étudiés dans des conditions très variées (perméabilité des divers types de sol, pente et réseau hydrographique, couverture végétale).

Réseaux sahéliens

Les stations permanentes des réseaux de mesure nationaux concernent uniquement des cours d'eau situés au sud de l'isohyète 400 mm ; jusqu'au milieu des années soixante-dix, elles couvrent une zone à l'est du méridien international depuis le Burkina Faso jusqu'au Tchad :

- sur les affluents rive droite du fleuve Niger, comme le Gorouol (station d'Alcongui, ouverte en 1957 ; de Dolbel, ouverte en 1961 ; de Koriziena, suivie de 1955 à 1965, puis reprise en 1970) ;
- les rivières des vallées sèches, le long de la frontière Niger-Nigeria (comme la Maggia, suivie depuis 1954), ou qui se jettent dans le lac Tchad (Komadougou, dès 1957) ;
- les rivières de l'est du Tchad (Bahr Azoum, à partir de 1953 ; le Ba Tha, à partir de 1955).

À la fin des années soixante-dix, si le programme Agrhymet permet, en Mauritanie, la réouverture de quelques stations suivies avec des fortunes diverses (Gorgol Blanc et Noir, Oued Ghorfa, etc.), celles de l'est du Tchad, en revanche, ne sont plus lues.

Ces stations contrôlent des superficies, qui vont de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés, où la dégradation hydrographique est très variable (*cf.* cet ouvrage, BOUTEYRE et LOYER : 69-80). On dispose, dans le meilleur des cas, de 30 années d'observations qui présentent souvent des lacunes.

Nous évoquerons plus loin les difficultés de gestion de ces réseaux sahéliens.

Les fleuves tropicaux qui parviennent au Sahel

Les fleuves tropicaux qui parviennent au Sahel (Sénégal, Logone-Chari) ou qui le traversent (Niger) représentent des conditions d'écoulement exogènes puisque les têtes de bassins se trouvent dans des régions beaucoup plus arrosées (Fouta Djalon, notamment). Néanmoins, il est utile de les prendre en compte, non seulement pour leurs apports, qui conditionnent la survie de vastes régions, mais encore pour leur rôle comme précieux indicateurs des variations climatiques. Les plus longues séries d'observation, qui dépassent quatre-vingts ans, montrent des fluctuations interannuelles de l'écoulement, très sensibles aux variations spatio-temporelles des régimes pluviométriques.

Respectivement situées sur le Sénégal et sur le Niger, les stations de Bakel et de Koulikoro (tabl. I, II et III), suivies depuis le début du siècle pour des raisons de navigation fluviale, fournissent des données chiffrées largement exploitées dans les études qui portent sur la sécheresse (SIRCOULON, 1976 ; OLIVRY, 1983 ; SIRCOULON, 1986a et b ; etc.).

Tableau I - Caractéristiques des modules ($m^3.s^{-1}$)

STATION	NBRE AN. D'OBSERV.	MODULE INTERANNUEL	COEF. VARIATION	MODULE MAX.	AN	MODULE MINI.	*An*
Sénégal à Bakel	84	702	0,38	1 247	24	215	84
Niger à Koulikoro	80	1 437	0,18	2 300	25	636	84
Chari à N'Djamena	54	1 115	0,31	1 720	55	213	84

Tableau II - Modules moyens extrêmes sur 5 ans consécutifs

STATION	HUMIDE		SÈCHE	
	Module	*Période*	*Module*	*Période*
Sénégal à Bakel	1 027	54 - 58	285	1982 - 1986
	941	32 - 36		
	917	24 - 28		
Niger à Koulikoro	2 024	24 - 28	773	1983 - 1987
	1 942	51 - 55		
Chari à N'Djamena	1 500	60 - 64	533	1981 - 1985
	1 450	52 - 56		

Tableau III - Apports des fleuves tropicaux au Sahel (en 10^9 m^3)

	Sénégal à Bakel	Niger à Koulikoro	Bani à Douna	Chari à N'Djamena	*Total*
Début des observations à 1985	22,3	46,2	17,3	35,1	120,9
Début des observations à 1967	24,7	48,7	22,1	40,4	135,9
Période 1968-1985	13,7	37,7	8,3	24,6	84,3
Année 1984	6,9	20,1	2,2	6,3	35,5

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT EN ZONE ARIDE

Dans les régimes hydrologiques où l'écoulement est pérenne, la ressource en eau est représentée par un certain nombre de paramètres hydrologiques classiques comme :

- son abondance (module annuel exprimé en $m^3.s^{-1}$, ou volume d'eau annuel écoulé en mètres cubes ou lame d'eau écoulée moyenne en millimètres) ;
- ses variations saisonnières et interannuelles ;
- ses valeurs extrêmes (étiages et crues).

En zones aride et semi-aride, l'écoulement est un phénomène ni régulier ni permanent ; il est caractérisé :

- par son intermittence (due à des pluies concentrées sur quelques semaines ou sur quelques mois) ;
- sa forte hétérogénéité spatio-temporelle (provoquée par le caractère, lui-même très hétérogène, des précipitations et des conditions très diversifiées de perméabilité des sols).

De plus, les effets de la dégradation hydrographique se font sentir très rapidement lorsque la superficie du bassin dépasse quelques dizaines ou quelques centaines de kilomètres carrés. Dans ce cas, on assiste à un affaiblissement des lames d'eau écoulées et des coefficients d'écoulement lorsque la taille des bassins croît, avec diminution du débit d'amont en aval (sauf exceptions, *cf. infra*).

Sous ces régimes, certains paramètres usuels perdent donc de leur signification ou de leur intérêt ; que signifie, par exemple, un débit moyen annuel ou un débit minimal d'étiage pour un cours d'eau à sec onze mois par an ? En revanche, les notions de volume écoulé, de durée de l'écoulement et de pointe de crue (maximum, forme et durée) prendront un relief tout particulier.

Dégradation hydrographique

Décrit en détail par Rodier (1975), ce phénomène, généralisé dans toutes les zones arides, se produit dès que la pente des cours d'eau diminue et d'autant plus vite que

l'on se rapproche des conditions désertiques. Il apparaît, en Afrique de l'Ouest, dès que la hauteur de précipitation interannuelle est inférieure à 750 mm (d'où la limite adoptée par les hydrologues pour la frontière méridionale du Sahel) et tous les cours d'eau sahéliens contrôlés par les réseaux de mesures le connaissent peu ou prou (tabl. IV). Cette dégradation est causée par plusieurs facteurs :

- longueur de la saison sèche, qui favorise la dénudation du sol ;
- crues sporadiques, incapables d'évacuer tous les matériaux érodés du lit ;
- grandes étendues à faible pente en aval, qui permettent l'étalement de l'écoulement et donc sa disparition progressive par évaporation.

Tableau IV - Quelques crues estimées de fréquence décennale

BASSIN	P. an^{-1} (mm)	S (km^2)	Q^{10} ($m^3.s^{-1}$)	q^{10} ($l.s^{-1}.km^2$)	DÉGRADATION
Sofaya (Tchad)	120	345	12	100	+
Haouach (Tchad)	120	7 700	3	0,4	+++
El Meki (Niger)	150	165	200	1 200	0
Teloua (Niger)	170	1 170	450	380	0
Enne (Tchad)	530	525	75	140	++
Fera (Tchad)	420	5 600	120	21	+++
Djajibine (Mauritanie)	450	148	325	2 200	0
Boudame (Mauritanie)	450	149	35	230	+
Boudame (Mauritanie)	450	1 125	200	180	+
Tambas (Niger)	460	280	400	870	0
Maggia (Niger)	475	25 25	140	55	0
Bam Bam (Tchad)	800	1 200	350	290	+
Mayo Oulo (Cameroun)	1 000	1 160	(1 000)	800-900	0

Intermittence

En zones désertiques au nord de l'isohyète 100 mm, les enquêtes menées par DUBIEF (1953) et les campagnes extensives effectuées (*cf. supra*) montrent que dans les zones les plus favorables (fort relief montagneux et sols imperméables), il peut se produire une crue par an sur des bassins de quelques kilomètres carrés bien exposés. Cependant, dès que la superficie du bassin croît, l'événement devient beaucoup plus rare. RODIER (1964) cite le cas de l'Enneri Bardagne à Bardaï (4 050 km^2) qui a connu, de 1954 à 1962 (période humide), les crues annuelles suivantes : 425 m^3.s^{-1} ; 0 ; 0 ; 0 ; > 5 m^3.s^{-1} ; 0 ; > 5 m^3.s^{-1} ; 5 m^3.s^{-1} ; 3 crues de 4, 9 et 32 m^3.s^{-1}. En zones subdésertiques, dans les massifs montagneux et les zones de piémont, il peut se produire quelques crues chaque année, pendant une courte période de juillet à fin août. Un exemple intéressant est donné par le bassin, peu dégradé, du Kori Teloua dans l'Aïr (1 300 km^2, 150 mm de hauteur de pluie interannuelle). Les observations qualitatives réalisées par les sœurs d'Azel, depuis 1956, et les mesures quantitatives, relevées en 1959, en 1960, en 1964 et depuis 1975, montrent que le nombre de jours d'écoulement par an semble osciller autour de 25 dans les années moyennes, atteindre 50 dans les années plus arrosées (1980) et s'abaisser à 5 ou 6 dans les années très déficitaires, comme 1972. Toutefois, en 1984, année de loin la plus sèche (la pluie moyenne sur le bassin est estimée à seulement 15 mm, contre 169 mm en 1980), la durée totale de l'écoulement n'est plus que de 35 heures. Ce qui semble bien indiquer qu'il n'y ait pas du tout d'écoulement une fois par siècle.

En zones sahéliennes, une série de crues, avec souvent un écoulement continu durant les intervalles, s'observe chaque année, sur une période qui peut dépasser trois à quatre mois. Sur les petits bassins des réseaux, les conditions de sécheresse ne semblent pas trop influer sur la durée totale de l'écoulement ; ainsi, au Burkina Faso, le Gorouol à Koriziena (2 500 km^2) connaît 80 à 100 jours d'écoulement par an, même les années à pluviométrie très médiocre. En revanche, sur les grands bassins, la durée est beaucoup plus sensible aux aléas climatiques. Dans le cas du bassin de la Komadougou à Gueskérou (120 000 km^2) et en 1984, l'écoulement s'observe seulement quatre mois, du 4 août au 30 novembre, alors qu'il dure en général neuf mois, de juillet à fin mars, grâce à un soutien par les nappes souterraines.

Hétérogénéité spatio-temporelle

Le premier facteur d'hétérogénéité est dû aux précipitations. Celles-ci se produisent sous la forme d'averses convectives de courte durée (15 min à 2 h), les intensités les plus fortes du corps de l'averse peuvent atteindre 150 mm.h^{-1} en 5 min (sous 200-300 mm de total annuel). Ces averses couvrent en général plusieurs dizaines de kilomètres carrés et dépassent rarement 100 à 200 km^2. Vers l'isohyète 750 mm, la saison des pluies, qui dure environ quatre mois, est constituée d'une cinquantaine de pluies alors que vers l'isohyète 100 mm, réduite à quelques semaines, elle n'est constituée que d'une dizaine de pluies. L'irrégularité interannuelle est d'autant plus forte que la hauteur de précipitations annuelle est plus faible. CARBONNEL et HUBERT (*cf.* cet ouvrage : 37-51) décrivent en détail les caractéristiques des précipitations en Afrique de l'Ouest et leur évolution actuelle.

Le second facteur d'hétérogénéité est dû aux conditions physio-géographiques (types de sol, nature du sous-sol, végétation, relief). Les averses, déjà localisées, donneront des coefficients de ruissellement très variables, qui, en cas de forte pluie, peuvent très bien varier de 5 %, sur des sables granitiques, jusqu'à 75 %, sur les regs argileux

(DUBREUIL, 1985). De plus, un sol verra sa perméabilité évoluer de façon sensible, au cours de la saison des pluies, en fonction de son état de saturation, de la pousse de la végétation et de la formation de pellicules de battance (VALENTIN, 1985).

La connaissance des parties «actives» des bassins (RODIER, 1985a) sera essentielle dans l'évaluation des crues. Le bassin de type Maggia, où un plateau de grès à très faible ruissellement domine des pentes de colluvions argileuses très imperméables, est l'exemple le plus connu.

La dégradation hydrographique va encore aggraver cette hétérogénéité en provoquant parfois des pertes très rapides d'amont vers l'aval (cas du Kori Teloua, dès que la dégradation se fait sentir).

ÉVALUATION DE LA RESSOURCE

Problème de la mesure

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La détermination des paramètres de l'écoulement rendue très difficile par les caractéristiques mêmes de la ressource (*cf. supra*), l'hydrologue se voit confronté à de nombreux problèmes. Les observations en zone aride exigent donc une méthodologie adaptée aux dures conditions de terrain, une stratégie opératoire spécifique, un matériel approprié et le respect d'une organisation générale rigoureuse (RODIER et ROCHE, 1978).

Il sera souvent combiné 3 sortes d'opérations (*cf. supra*) :

- les études extensives (déplacements rapides dans la zone choisie avec visite des stations installées, mesure des débits ou des délaissées de crues, préparation cartographique minutieuse des campagnes, missions préparatoires de reconnaissance en saison sèche, etc.) ;
- les bassins représentatifs (présence à temps plein pendant la saison des pluies, matériel installé à l'avance, stations aménagées, protocoles de mesures au point) ;
- les stations de référence avec station permanente de jaugeage (coûteuses, donc suivies avec beaucoup de soin, notamment en ce qui concerne le choix du site, sa dégradation éventuelle et sa stabilité, la maintenance rigoureuse des appareils et une préparation poussée des procédés de mesure comme dans le cas des bassins représentatifs).

SITUATION ACTUELLE

Au cours de ces vingt dernières années, l'opinion internationale a été régulièrement sensibilisée au drame vécu par les populations sahéliennes, et les gouvernements respectifs des pays concernés ont pris conscience de la nécessité d'un renforcement des moyens qui permettent de mieux connaître et de suivre les ressources en eau. La création du Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS), après le paroxysme de sécheresse des années 1972-73, comme le lancement, en 1975, du programme Agrhymet pour réactiver les réseaux sahéliens (avec la formation de personnel spécialisé) ont été des réponses à ces préoccupations et jouent un rôle important grâce à l'aide internationale. Malheureusement, la gestion des réseaux se révèle une charge très lourde et très difficile à assumer car le suivi de la ressource

exige un combat de tous les instants ; aux zones non couvertes par les mesures viennent s'ajouter les lacunes d'observation des stations existantes, leur détérioration ou le détarage des cours d'eau. Le développement des modèles mathématiques, lié à l'explosion de l'informatique, a parfois créé l'espoir fallacieux que les mesures de terrain deviendraient secondaires ; bien vite, on a dû constater que la vérité terrain demeurait indispensable à l'emploi de ces modèles dont l'aide, par ailleurs, se montre extrêmement précieuse (au niveau de la simulation de l'écoulement, par exemple ; *cf. infra*).

S'il faut donc affronter les difficultés et poursuivre les mesures (POUYAUD, 1986), cette tâche peut néanmoins bénéficier des développements technologiques de ces dernières années à 2 niveaux :

- celui de la collecte de l'information et de son traitement, grâce à l'emploi de stations de mesures autonomes avec enregistrements sur mémoire statique et chaînes de traitement informatisé ;
- celui de la transmission de l'information, grâce aux possibilités de télétransmission des données par satellite, très bien rodée à l'heure actuelle (les opérations Hydroniger ou de lutte contre l'onchocercose sont des exemples réussis).

Cependant, ces nouveaux moyens demandent des disponibilités financières non négligeables et une maintenance appropriée qui freinent encore leur diffusion.

Résultats obtenus

De nombreuses études allaient être réalisées à mesure que progressaient les connaissances sur les ressources superficielles et leurs caractéristiques. Les synthèses les plus notables ont été effectuées à l'instigation du Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH) créé en mars 1960.

Dès 1964, les caractéristiques générales des régimes arides et subarides (abondance annuelle, variations saisonnières, crues, coefficient d'écoulement, irrégularité interannuelle) étaient formulées dans un ouvrage de base (RODIER, 1964) consacré à l'ensemble de l'Afrique noire à l'ouest du Congo.

Dès l'origine, l'estimation des crues décennales sur petits bassins était l'un des objectifs assigné aux hydrologues. La note de RODIER et AUVRAY (1965) représente une contribution fondamentale à la résolution de ce problème en fournissant la méthode de calcul de ces crues (essentiellement pour les zones comprises entre 150 et 800 mm de pluie annuelle et pour des bassins inférieurs à 200 km^2, en donnant des abaques qui fournissent le coefficient de ruissellement, en fonction de classes de perméabilité et de relief, ainsi que les temps de montée et de baisse de ces crues).

En 1972, les mesures acquises sur bassins représentatifs faisaient l'objet, sous la direction de DUBREUIL, de la publication d'un recueil qui exploite sous une forme standardisée les résultats hydrologiques de 106 ensembles de bassins versants (dont une proportion notable en zone aride et subaride).

Dans les années suivantes, en liaison avec les besoins diversifiés qui concernaient les zones arides soumises au début d'une période déficitaire, RODIER (1975) réalisait une synthèse sur l'évaluation, dans le Sahel tropical africain, de l'écoulement annuel exprimé en volume annuel et de sa variabilité temporelle. Opérée à partir d'un certain nombre de bassins types de référence, cette évaluation s'appuyait sur l'étude des courbes de distribution des précipitations annuelles et sur l'utilisation d'un modèle simplifié, élaboré par GIRARD (1975) qui a permis de simuler de longues séries d'écoulement annuel.

Pour le calcul des crues, l'utilisation plus complète de l'information obtenue sur bassins représentatifs et l'emploi du minisimulateur de pluie pour caractériser l'aptitude

des états de surface au ruissellement *(cf.* en particulier les travaux de CASENAVE et VALENTIN et leur publication la plus récente, 1990) permettaient les révisions et les améliorations nécessaires de la note RODIER et AUVRAY (1965) ; d'une part celle-ci voyaient ses éléments de calcul repris et affinés (RODIER, 1984), d'autre part elle bénéficiait de l'amélioration très sensible des connaissances sur les caractéristiques des crues des bassins sahéliens de moins de 10 km² (RODIER, 1984-1985). Une synthèse générale, qui est en voie d'achèvement et dont certains éléments ont déjà été esquissés (RODIER et RIBSTEIN, 1986 et 1988), doit favoriser la prédétermination des fortes crues (programme de recherche Forcrusa, de l'ORSTOM) et l'estimation des apports au Sahel.

L'amélioration progressive de la connaissance sur les phénomènes contributifs de l'écoulement a également permis la formation de notes synthétiques qui récapitulent les acquis des trente années écoulées (DUBREUIL, 1985).

Enfin, l'exploitation des fichiers de données, informatisés à partir de 1967, assurait l'édition régulière d'annuaires (très vite assumée par les services nationaux) et permettait surtout la publication de monographies hydrologiques. Ces vastes études régionales fournissent les facteurs physiques et climatiques qui conditionnent les régimes, et facilitent la recherche de liaisons significatives entre facteurs conditionnels (surface, relief, pluviosité, nature du sous-sol et caractéristiques hydrologiques). Citons, notamment, la monographie du Sénégal (ROCHETTE, 1974), en cours de refonte, et celle du Niger, dont la troisième version date de 1986, qui renferme des données d'un certain nombre de cours d'eau sahéliens.

ÉVOLUTION ACTUELLE

L'appréciation de la variabilité interannuelle de la ressource en eau superficielle, des fluctuations ou des tendances qui peuvent affecter ce capital, demande une continuité des observations et de longues séries de mesures.

Ces conditions ne sont guère remplies en Afrique de l'Ouest, où l'on dispose seulement :

- de quelques stations de longue durée sur les grands fleuves tropicaux ;
- d'une quinzaine de stations sahéliennes, suivies depuis trente ans dans le meilleur des cas ;
- des résultats fournis par les bassins versants représentatifs, suivis pendant deux ou trois ans dans la majorité des cas.

Depuis une vingtaine d'années, la diminution des précipitations au Sahel (*cf.* cet ouvrage : 37-51) a entraîné un sévère déficit de l'écoulement.

La synthèse la plus importante est celle de SIRCOULON (1976) avec des compléments (1986a et b, 1987). Il est à noter également que la synthèse UNESCO/OMM (Organisation météorologique mondiale), *Aspects hydrologiques des sécheresses,* consacre une part notable à l'Afrique de l'Ouest.

Évolution des cours d'eau tropicaux

Depuis 1968, les grands cours d'eau présentent :

- un effondrement des volumes écoulés annuels ; par rapport aux moyennes établies jusqu'à 1967 inclus, le déficit de la période 1968-1985 atteint 44 % sur le Sénégal, à Bakel, 22 % sur le Niger, à Koulikoro, 39 % sur le Chari, à N'Djamena. Pour 1984, année record, le déficit s'élève à 83 % ;

- un effondrement des crues maximales, les débordements dans la basse vallée du Sénégal, le remplissage de la cuvette intérieure du Niger et l'inondation des plaines au sud du lac Tchad sont de moins en moins assurés ;
- des étiages records certaines années, avec un arrêt de l'écoulement, pour le Sénégal à Bakel, pour le Niger à Niamey et pour le Chari en amont de sa confluence avec le Logone.

Les tableaux I à III (d'après SIRCOULON, 1987) résument quelques résultats (année 1986 incluse).

Évolution des cours d'eau sahéliens

Bien qu'il soit impossible de dresser un bilan exact de l'évolution des ressources en eau endogènes et de leurs caractéristiques, les résultats obtenus aux stations qui contrôlent des bassins sahéliens de plusieurs milliers de kilomètres carrés se révèlent en contradiction avec ceux observés sur les grands cours d'eau tropicaux pour la dernière période de sécheresse.

CAS DES CRUES

Le tableau IV (RODIER, 1989) présente quelques valeurs de crues estimées de fréquence décennale (Q^{10}). L'examen des débits spécifiques q^{10} montre une très grande variabilité pour des hauteurs annuelles de précipitations ($P.an^{-1}$) identiques (cas de Djajibine et de Boudamé). Ces différences s'expliquent par la perméabilité, par la pente et par la dégradation hydrographique également (0 = nulle à peu marquée, +++ considérable).

Les études qui portent sur les crues récentes ne montrent pas de diminution des pointes de crues maximales. Ainsi (SIRCOULON, 1986b) dans le cas du Gorouol, à Dolbel (7 500 km²), l'estimation de la crue de récurrence décennale, sur un échantillon glissant constitué des crues maximales annuelles, fait apparaître une stationnarité des crues avec même une augmentation des valeurs basées sur les deux dernières années observées (tabl. V).

Tableau V - Crues du Gorouol à Dolbel ($m^3.s^{-1}$)

PÉRIODE	CRUE MÉDIANE	CRUE DÉCENNALE Q^{10} (PEARSON III)
1961-1985	96,2	157
1961-1970	93,9	119
1966-1975	90,5	117
1971-1980	97,8	182
1976-1985	124,0	198

CAS DES ÉLÉMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE

Le tableau VI (RODIER, 1989) donne des valeurs de lame d'eau écoulée annuelle (fréquence médiane et décennale) pour des bassins types sahéliens de 25 km² de superficie sous une pluie annuelle moyenne ($P.\ an^{-1}$) de 400 mm.

Tableau VI - Écoulement annuel

BASSIN	SOL	Le (med)	Le (dec)
Galmi réduit (Niger)	Colluvions argileuses	140 mm	50 mm
Gountoure (Burkina Faso)	Granit sain avec dépressions peu profondes comblées par des sols sableux	86 mm	30 mm
Gagara (Burkina Faso)	Vertisols imperméables sur granit sur une partie du bassin	52 mm	17 mm
Barlo (Tchad)	Sols de Gountouré + sols perméables	24 mm	7 mm
Abou Goulem (Tchad)	Majorité de sols perméables sur granit	12 mm	3 mm
Niamey (Niger)	Sols sableux perméables ± cultivés	(2) mm	0 mm

Au cours d'une étude qui portait sur 8 bassins (de 7 500 à 95 000 km^2), POUYAUD (1987) s'est attaché à suivre sur toute la période d'observation les valeurs moyennes des principaux paramètres hydrologiques.

La synthèse des résultats (tabl. VII) fournit en particulier la pluie moyenne (P.an^{-1}), la lame d'eau écoulée annuelle (Le), le coefficient d'écoulement (Ke) ainsi que les rapports entre les moyennes de ces 3 paramètres à partir de 1970, pour la période sèche (S), et jusqu'à 1969 inclus, pour la période humide (H).

L'analyse de ces paramètres montre que pour les bassins les plus petits, la période sèche n'a pas réduit les écoulements (LeS/LeH > 100 %) et encore moins les coefficients d'écoulement (KeS/KeH > 100 %), alors que les précipitations actuelles sont plus faibles (P.an^{-1} S/P.an^{-1} H < 100 %).

Toutefois, on doit noter que ces stations n'intéressent que la partie centrale du Sahel, moins durement touchée par la sécheresse que l'Ouest ou le Tchad, où ces conclusions seraient probablement moins nettes.

En revanche, pour les plus grands bassins, on retrouve bien une diminution générale des valeurs de tous les paramètres hydrologiques.

Les résultats obtenus sur petits bassins sont expliqués par ALBERGEL *et al.* (*cf.* cet ouvrage : 123-130) ; à partir d'une expérimentation entreprise sur de nombreux bassins ou parcelles du Burkina Faso, ils montrent que, en zone sahélienne, le ruissellement (ou l'infiltrabilité) est sous la dépendance quasi exclusive des états de surface. La sécheresse actuelle a considérablement favorisé le développement des zones érodées et des surfaces encroûtées, d'où une augmentation très nette des coefficients de ruissellement (ALBERGEL, 1987).

Lorsque la superficie des bassins augmente, l'apparition de la dégradation hydrographique, l'action de l'évaporation sur les zones d'épandage et l'absence d'infiltration en période sèche sont des facteurs qui se conjuguent pour réduire de façon dramatique l'écoulement.

Tableau VII - Synthèse des paramètres hydrologiques

Bassin	Station	Période d'observation	Superficie km²	P. an⁻¹ mm	Le mm	Ke mm	P. an⁻¹S/P. an⁻¹H %	LeS/LeH %	KeS/KeH %
Gorouol	Dolbel	1961-1978	500	483	35,6	7,52	73	92	127
Gorouol	Alcongui	1961-1977	44 850	486	7,0	1,48	70	71	102
Dargol	Tera	1961-1978	2 750	495	36,2	7,3	71	83	119
Dargol	Kakassi	1963-1978	6 940	484	25,6	5,3	83	112	139
Lac de Bam	-	1966-1976	2 600	576	11,0	1,8	101	316	287
Sirba	Garbe-Kourou	1962-1977	38 750	658	16,9	2,50	83	76	91
Volta Noire	Dapola	1951-1983	94 000	898	36	3,94	83	59	71
Volta Blanche	Yakala	1956-1983	32 000	733	29,5	3,94	88	70	79

CONCLUSION

Cet article a évoqué les difficultés inhérentes à la connaissance des ressources en eau superficielles dans les zones arides d'Afrique de l'Ouest.

Depuis le début des années cinquante environ, les travaux entrepris par les infrastructures hydrologiques qui œuvrent dans ces pays (et auxquelles l'ORSTOM a fourni une contribution très diversifiée) représentent une riche moisson. Les études réalisées apportent des éléments d'appréciation sur les caractéristiques des divers régimes hydrologiques, les conditions de formation de l'écoulement, la prédétermination des crues et les ordres de grandeur relatifs à la ressource. La valorisation des études faites sur bassins représentatifs, l'emploi du minisimulateur de pluie, la mise au point d'outils statistiques, la modélisation de l'écoulement et l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface, notamment, ont facilité à des degrés divers ces résultats.

Toutefois, dans ce domaine où existent de nombreuses lacunes et des zones encore non étudiées, rien n'est jamais définitivement acquis :

- la grande variabilité spatio-temporelle de la ressource impose la continuité des mesures, la mise à jour régulière des synthèses ou des monographies anciennes et un effort accru dans le fonctionnement des réseaux sahéliens actuels. Au niveau du captage-codage, de la transmission et du traitement des paramètres hydrologiques, les technologies nouvelles apportent des solutions séduisantes mais onéreuses pour les services nationaux ;
- la persistance de conditions sévères de sécheresse bouleverse les certitudes acquises, soulève le problème des normes hydrologiques à choisir pour réaliser des aménagements toujours plus nombreux en vue de satisfaire des besoins accrus en eau. Une grande prudence s'impose néanmoins dans la modification des normes actuellement employées ; les résultats des campagnes de simulation de pluie sur des bassins anciennement exploités par l'ORSTOM montrent bien l'extrême importance des états de surface et de leurs modifications sous l'action anthropique et sous l'effet de la sécheresse persistante.

J. SIRCOULON : *hydrologue*, ORSTOM, 213 rue Lafayette, 75480 Paris cedex 10

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987. - Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. *Symposium AISH* n° 168, Vancouver : 355-365.

BRAQUAVAL (R.), 1957. - Études d'écoulement en régime désertique. Massif de l'Ennedi et région nord du Mortcha. Campagne 1957. ORSTOM, CSLT Paris, 90 p., 27 pl.

BRUNET-MORET (Y.), 1963. - Le bassin du Zoumri au Tibesti. Annuaire hydrologique de l'ORSTOM, Paris. Année 1959 : 9-18.

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1990 - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Didactiques*, ORSTOM, Paris, 229 P., 196 pl. couleur.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. - Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (1976-1981). *Trav. et Doc.* ORSTOM, n° 190, Paris, 251 p.

DUBIEF (J.), 1953. - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Gouvernement général de l'Algérie. SES Clairbois-Birmandreis. Algérie.

DUBREUIL (P.), 1985. - Review of field observations of runoff generation in the Tropics. *Journal of Hydrology*, 80 : 237-264.

DUBREUIL (P.), CHAPERON, (P.), GUISCAFRE (J.) et HERBAUD (J.), 1972. - Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951 à 1969. ORSTOM, Paris, 916 p.

FAO, 1981 - Arid Zone Hydrology, FAO Irrigation and Drainage paper n°37, 271 p. + 96 p. (annexes), Rome.

GIRARD (G.), 1975. - Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, vol. XII, n° 3 : 189-221.

GIRARD (G.) et RODIER (J. A.), 1979. - Application de modèles mathématiques déterministes à l'étude des crues et de l'écoulement annuel en zone sahélienne. AISH, Canberra, *Publication* n° 128 : 65-78.

LEFEVRE (R.), 1959. - Études d'écoulement dans le massif de l'Aïr. Alimentation en eau de la zone des grès d'Agadès. Campagne 1959. ORSTOM, Paris, 131 p. + figures, *multigr.*

MARGAT (J.), 1979. - Aridité et ressources en eau (79 SGN 255 HYD) CIEH/CEFIGRE, Niamey.

OLIVRY (J.-C.), 1983. - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM. sér. hydrol.*, vol. XX, n°1.

PÉPIN (Y.), BERTHAULT (C.) et KOME (B.), 1987. - Bassin versant de l'oued de Kidal (Adrar des Iforas). Campagne 1986. Direction de l'Hydraulique et de l'Energie. ORSTOM, Bamako, 71 p.

POUYAUD (B.), 1986. - Normes hydrologiques des réseaux de mesure hydrométriques et sécheresse. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 86.

POUYAUD (B.), 1987. - Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques. *Symposium AISH*, n° 168. Vancouver : 447-461.

ROCHE (M.), 1958. - Études d'écoulement en régime désertique. Massif de l'Ennedi. Campagne 1958. ORSTOM, organisation commune des régions sahariennes, Paris, 80 p. + annexes, *multigr.*

ROCHE (M.), 1965. - Étude des nappes d'infero-flux des rivières de la bordure ouest de l'Aïr (campagne 1964). ORSTOM, Paris, 54 p. + annexes, *multigr.*

ROCHE (M.), 1983. - L'apport de l'ORSTOM dans l'hydrologie de l'Afrique de l'Ouest. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n° 3-4 : 205-211.

ROCHETTE (C.), 1974. - Le Bassin du fleuve Sénégal. *Monogr. Hydrol.* n°1, ORSTOM, Paris, 442 p. et 3 cartes.

RODIER (J. A.), 1964. - Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *Mém. ORSTOM*, n° 6, Paris, 137 p.

RODIER (J. A.), 1975. - Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical Africain. *Trav et Doc.* ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p.

RODIER (J. A.), 1979. - Évaluation des ressources en eau de surface dans les régions tropicales arides. CIEH/CEFIGRE. Doc. BE5, 15 p. Niamey.

RODIER (J. A.), 1984. - Évaluation hydrométéorologique des critères de conception des ouvrages de drainage routiers et des évacuateurs de crues des petits barrages dans la région du Sahel. Projet UNSO/RAF/83/504. Genève.

RODIER (J. A.), 1984-1985. - Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n° 2, 65 p.

RODIER (J. A.), 1985 - Aspects of Arid Zone Hydrology, in Facets of Hydrology, chapter 8, vol. II, Ed. J.C. Rodda John Wiley and Sons Ltd : 205-247.

RODIER (J. A.), 1989. - Caractères généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi-arides en Afrique. Leurs conséquences sur les études des ingénieurs in Proceedings of the Sahel Forum «État de l'Art en hydrologie et en hydrogéologie». Unesco/CIEH/AIRE. Ouagadougou, 13-18 février 1989 : 19-37.

RODIER (J. A.) et AUVRAY (C.),1965. - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM, CIEH, Paris, 30 p., 13 gr.

RODIER (J. A.) et RIBSTEIN (P.), 1986. - Utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 1986.

RODIER (J. A.) et RIBSTEIN (P.). - 1988. - Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 108 p. + annexes, *multigr.*

RODIER (J. A.) et ROCHE (M.), 1978. - River flow in arid regions, in R.W. Herschy (Ed.) Hydrometry. Principles and Practices, John Wiley and Sons (Chichester) chapter 13 : 453-472.

SIRCOULON (J.), 1976. - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique Intertropicale. Comparaison avec les sécheresses «1913» et «1940». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 2 : 75-174.

SIRCOULON (J.), 1986a. - La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-84 avec les années 1972-73. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n° 4, 1984-85 : 75-86.

SIRCOULON (J.), 1986b. - Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et centrale. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 1986.

SIRCOULON (J.), 1987. - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du XXe siècle. *Symposium AISH,* Vancouver, n° 168 : 13-25.

UNESCO/OMM , 1988. - Aspects hydrologiques des sécheresses. *Collection Études et Rapports en hydrologie*, n° 39. Paris, 149 p. (rapporteurs M. Beran et J. A. Rodier).

VALENTIN (C.), 1985. - Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de régions subdésertiques. *Études et Thèses* ORSTOM, Paris, 260 p., 11 pl. photos.

Guy BOUTEYRE, Jean-Yves LOYER

Sols salés, eaux saumâtres, des régions arides tropicales et méditerranéennes :

principaux faciès, conséquences pour l'agriculture

INTRODUCTION

En régions arides les précipitations, faibles et occasionnelles, induisent un drainage climatique nettement déficitaire pendant la plus grande partie de l'année. Les écoulements, superficiels (oueds, marigots) ou hypodermiques, y sont le plus souvent temporaires. Ils atteignent des zones de concentration qui sont les lieux privilégiés de manifestations salines dans les eaux et dans les sols.

L'importance de ces phénomènes de salinité dépend des apports hydriques et du bilan évaporatoire imposé par le climat. Le bilan évaporatoire, ou différence entre l'évaporation et les précipitations, varie dans de larges limites depuis des valeurs annuelles supérieures à 3 000 mm jusqu'à des valeurs inférieures à 1 000 mm. Dans les zones subdésertiques extrêmement arides, il est positif tout au long de l'année, avec des épisodes pluvieux dont les effets sont rapidement effacés. Les périodes d'interruption de l'évaporation sont moins importantes dans les régions tropicales sèches, où les pluies tombent en saison chaude, que dans les régions méditerranéennes, où elles tombent en saison froide.

Conséquence de ce bilan évaporatoire le plus souvent positif, les eaux se concentrent et deviennent saumâtres. La salinité des eaux de surface en lame peu épaisse devient telle qu'il peut y avoir précipitation de chlorure de sodium pur par exemple, comme on l'observe dans quelques salines naturelles : bras morts de l'Euphrate à Hatla et à Ghabra en Syrie, lac Retba au Sénégal, sebkhas d'Amadror dans le Hoggar, etc. Les eaux des nappes très peu profondes, naturelles, ou engendrées par des irrigations mal contrôlées, se concentrent sous l'effet d'une dynamique essentiellement ascendante par capillarité. Elles salinisent les sols à leur contact. Ces phénomènes conduisent à la formation de paysages naturels typiques par leur végétation spécialisée dite halophile, ou encore par l'absence de végétation. On observe alors souvent, à la surface des sols, des manifestations cristallines caractéristiques des profils salins ascendants (fig. 2) : efflorescences, croûtes salines, pseudosables, et formations poudreuses (tel le *fech-fech* au Sahara). Ces poudres ont pu et peuvent être modelées par les vents en accumulations diverses : voiles et rides éoliens, nebkas, dunes, telles que les grandes dunes gypseuses de Kebili (Tunisie), et même véritables collines appelées *lunettes* comme celles de la sebkha Kelbia, en Tunisie centrale, ou celle de Ben Ziane, en Algérie.

Du fait du climat de ces pays arides et, dans une moindre mesure, des pays semi-arides, une grande partie de l'agriculture est irriguée. Elle utilise des ressources en eau

très diverses : puits, captages, forages, cours d'eau. De très grands fleuves allogènes, nés en zones montagneuses humides (Sénégal, Niger, Nil, Euphrate, Tigre) apportent des volumes d'eaux très importants et de bonne qualité aux zones arides dont les sols n'étaient pas toujours salés au moment de leur mise en culture. Les agriculteurs arabes, exemple le plus connu, ont été pendant très longtemps des maîtres dans la pratique de l'irrigation, depuis le captage et le transport de l'eau jusqu'à sa distribution gravitaire à la parcelle (Moyen Orient, Maghreb). Mais l'accroissement des besoins alimentaires et industriels a conduit un certain nombre de pays à mobiliser des ressources en eau de moins bonne qualité, inexploitées auparavant, sur toutes sortes de sols. Les résultats sont très souvent médiocres, par méconnaissance ou non-respect des règles d'utilisation. Ainsi, des superficies importantes ont dû être abandonnées chaque fois que la maîtrise des conditions techniques a périclité et partout où le drainage naturel était, ou est, devenu insuffisant : la salinisation a conduit à l'abandon des très anciens périmètres irrigués de Mésopotamie. Des parties étendues de périmètres mis en valeur au début des années cinquante en Syrie et en Iraq, sont déjà abandonnées.

Les faciès chimiques des eaux, en particulier de celles utilisées ou utilisables pour l'irrigation sont recensés ci-après. Les grands faciès chimiques des sols des zones tropicales et méditerranéennes affectés par la salinisation sont également examinés, sans aborder le détail des mécanismes géochimiques qui règlent les équilibres minéraux à l'intérieur des solutions au cours de leur évolution dans les sols (formation d'ions complexes, hydroxylés, protonés, de paires d'ions).

PRINCIPAUX FACIÈS SALÉS DANS LES EAUX

Les faciès des eaux dépendent de leur origine et des transformations subies par concentration, par précipitations, par échanges avec les argiles et, éventuellement, par dissolutions. 2 grandes catégories d'eaux sont distinguées : eaux de surface, et eaux de nappes. Les observations retenues ici sont regroupées sur le diagramme de Piper (fig. 1).

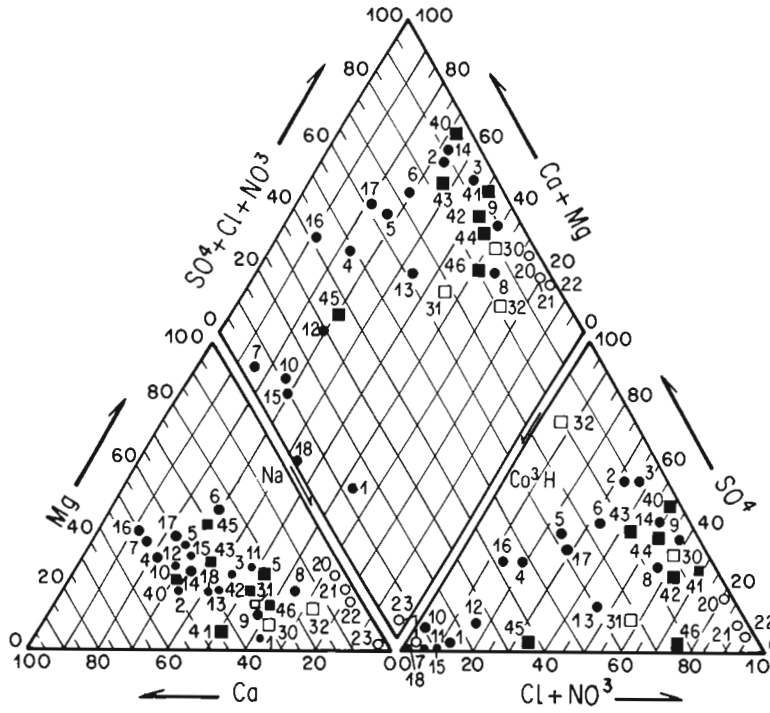
Eaux de surface

Les grands fleuves africains qui traversent les zones arides tropicales et méditerranéennes proviennent de régions de montagnes humides parfois très éloignées ; si la plupart rejoignent la mer, quelques-uns font exceptions, comme le Chari et le Logone qui alimentent le lac Tchad dont l'eau sert à l'irrigation de plusieurs polders ; de même, mais à un degré moindre, certains oueds méditerranéens.

Les eaux des fleuves issus du vieux socle africain - Gambie, Niger, Nil, Sénégal - et celles du lac Tchad sont toutes très peu minéralisées. La conductivité y est inférieure à 0,2 $dS.m^{-1}$*, sauf pour les eaux du Sénégal où elle atteint 0,4 $dS.m^{-1}$. Leur concentration saline demeure stable d'amont en aval, ce qui indique qu'elles sont peu utilisées et, en particulier, qu'elles ne reçoivent pas, ou peu, d'eaux de drainage. Ces eaux sont essentiellement bicarbonatées calciques et, à un moindre degré, magnésiennes. Le sodium y est peu abondant sauf saisonnièrement, en période d'étiage, comme pour le Niger à Niamey. Chlorures et sulfates n'y sont présents quelquefois qu'à l'état de traces.

---

* L'unité internationale de conductivité électrolytique est le Siemens par mètre ($S.m^{-1}$) (ISO 1979). Pour les mesures de conductivité dans les eaux et les extraits de sols un sous-multiple est utilisé, le $dS.m^{-1}$ ou le $mS.cm^{-1}$, qui est exactement équivalent au $mmho.cm^{-1}$ employé précédemment.



● *EAUX DE SURFACE*

		CE (dS/m)
1--	AWASH (Éthiopie)	0,3
2,3-	CHELIF (Algérie)	1,1 ; 2,3
4, 5, 6-	EUPHRATE (Syrie, Iraq)	0,5 ; 0,7 ; 2,3
7-	GAMBIE (Sénégal)	0,04
8-	JOURDAIN (Jordanie)	3,2
9-	MEDJERDA (Tunisie)	2,1
10-	NIGER	0,05
11, 12-	NIL (Soudan, Égypte)	0,3 ; 0,4
13-	OUM-ER-RBIA (Maroc)	0,9
14-	SEBOU (Maroc)	1,0
15-	SÉNÉGAL (Sénégal)	0,4
16, 17-	TIGRE (Iraq)	0,5 ; 0,9
18-	LAC TCHAD (Tchad)	0,15

❒ *EAUX DE NAPPES PEU PROFONDES*

		CE (dS/m)
30-	Drainage Oasis AL HASSA	5,3
31-	Vallée du Nil (Égypte)	0,9
32-	Polder de Bol Guini	2,8

■ *EAUX DE NAPPES PROFONDES*

40-	Nappe Albienne (O. RHIR ; Algérie)	2,2
41-	Nappe du SAQ (Arabie)	2,1
42-	Source de AL HASSA (Arabie)	2,2
43-	Nappe de la JEFFARA (Libye)	2,4
44-	Nappe de SIRTE (Libye)	4,2
45-	Nappe de l'Éocène (Sénégal)	1,3
46-	Nappe du Maestrichien (Sénégal)	4,6

○ *EAUX DE SURFACES CONCENTRÉES*

20-	Drainage fleuve Sénégal Telliel	22
21-	Sine Saloum-Finela	84
22-	Koubalan (Marigot)	130
23-	Polder de Carré (Tchad)	41

FIGURE 1 - *Diagramme de Piper.*

Les eaux des fleuves issus des zones montagneuses méditerranéennes, Atlas au Maghreb, Plateau arménien en Turquie, sont sensiblement plus minéralisées. À leur entrée en Iraq et en Syrie, le Tigre et l'Euphrate, par exemple, ont déjà une conductivité de l'ordre de 0,5 $dS.m^{-1}$. Des prélèvements sont opérés tout au long de ces fleuves pour l'irrigation de périmètres importants. Les eaux de drainage - naturel et artificiel quelquefois - retournent aux cours d'eaux dont elles augmentent la minéralisation. L'eau de l'Euphrate n'est pratiquement plus consommable à Nassiriyah, près de l'antique cité d'Ur. Assez bien équilibrées dans la partie amont, les eaux deviennent de plus en plus riches en chlorures et en sodium. Les bicarbonates précipitent rapidement dans les canaux sous forme de carbonate de calcium. Du gypse précipite également, en faible quantité. Le SAR* de ces eaux augmente, mais leur pH reste neutre.

Les eaux des oueds issus des reliefs du Maghreb sont assez minéralisées à leur arrivée dans les périmètres irrigués, surtout lorqu'elles ont drainé des bassins versants sédimentaires riches en roches calco-magnésiennes, gypseuses, ou localement salées comme l'oued Zéroud, en Tunisie, dont les eaux peuvent titrer 4 à 5 $g.l^{-1}$. Les bicarbonates sont peu abondants, le sodium est souvent le cation dominant. Les variations saisonnières de concentration, liées aux débits, sont importantes. L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation est quelquefois aléatoire, principalement en absence de travaux de stockage.

Les eaux de surface peuvent se concentrer très fortement dans quelques situations particulières :

- par contamination avec l'eau de mer ou avec des sédiments marins ou lagunaires sursalés, comme dans le delta du fleuve Sénégal ;
- par évaporation lorsque l'alimentation directe est interrompue, comme dans les bras morts de l'Euphrate.

Les faciès sont alors fortement chlorurés-sodiques et les conductivités très élevées. Ces eaux sont impropres à tout usage en dehors d'un aménagement en salines pour la production de chlorure de sodium.

La concentration des eaux du lac Tchad conduit à un faciès très différent, où carbonate et bicarbonate de sodium constituent la quasi-totalité des sels (polder de Carré, au nord-est du lac).

Eaux de nappes

La richesse en sels des eaux des nappes phréatiques des vallées des grands fleuves est toujours supérieure à celles des fleuves eux-mêmes ; elle augmente souvent avec la distance au lit mineur. Le faciès des eaux reste peu différent lorsqu'elles sont chloruro-sulfatées ; il change considérablement lorsqu'elles sont bicarbonatées, même si la concentration saline évolue peu. Dans la vallée du Nil, les eaux de la nappe sont devenues chlorurées sodiques après précipitation de carbonate de calcium et de magnésium. Lorsque le niveau de cette nappe s'élève, le risque de salinisation des sols s'accroît fortement. Dans les polders du lac Tchad, la nappe phréatique, utilisée pour l'irrigation, est alimentée par infiltration à travers les sédiments dont certains sont riches en sulfures. Oxydés en sulfates, ces sulfures modifient complètement le faciès de l'eau venue du lac.

Beaucoup d'eaux de nappes profondes prospectées pour la création de périmètres irrigués se sont révélées trop salées pour être utilisables. Celles qui sont exploitées sont

* SAR = Sodium Adsorption Ratio = $Na/\sqrt{(Ca+Mg)/2}$, en $mé.l^{-1}$.

souvent plus chargées en sels que les eaux de surface (*cf. supra*) ; cependant, elles constituent le plus souvent l'unique ressource en eau dans les zones où elles sont accessibles. Les grandes nappes du Sud-Algérien, de Libye, d'Arabie, sont chloruro-sulfatées, sodico-calciques. Leur composition varie quelquefois vers le pôle chloruré en cas de surexploitation ou de contamination marine (partie ouest de la nappe du Maestrichien sénégalo-mauritanienne). Ce danger s'ajoute au risque qui pèse sur elles du fait de l'incertitude de leur alimentation.

PRINCIPAUX FACIÈS SALÉS DANS LES SOLS

Selon l'origine et la nature chimique des sels, différents faciès salins apparaissent dans les sols. Ils sont caractérisés soit par la présence de sels plus ou moins solubles (sulfates mixtes dérivés de sulfures, chlorures et sulfates neutres, carbonates ou bicarbonates), soit par la présence de cations (sodium, magnésium) énergiquement fixés sur le complexe d'échange des sols. Alors que les manifestations de ces derniers sont peu visibles dans les paysages, leurs effets sur les sols se révèlent au moins aussi nocifs et plus durables que ceux des sels solubles.

Sols sulfurés et sulfatés acides

Les formations sulfurées de mangroves, caractéristiques de régions nettement plus humides, peuvent néanmoins s'étendre sous les climats arides très contrastés, même dans des situations très sèches. Les eaux superficielles sont alors caractérisées par de très fortes salinités, supérieures à celle de l'eau de mer. C'est le cas, par exemple, sur la côte sénégalo-mauritanienne à l'embouchure du fleuve Sénégal, dans le Siné Saloum et même en Casamance au Sénégal, très localement en Somalie, et dans le Nordeste brésilien. Sous ces climats, la mangrove - à l'état de relique - est fragile et protégée de l'action destructrice de la mer par des situations estuariennes ou lagunaires. Elle est souvent remplacée dans ces milieux par des surfaces sans végétation, sursalées, où les sulfures originels ont évolué, par oxydation, en sulfates mixtes caractéristiques de ces zones sulfatées acides.

La séquence d'évolution géochimique qui conduit des sulfures à ces sulfates a été étudiée dans différents sites du Sénégal et il a été montré qu'elle résultait de l'exacerbation de la sécheresse des dernières années au Sahel. Dans les conditions humides et chaudes des côtes équatoriales ou tropicales humides, les sédiments pyriteux de la mangrove, potentiellement sulfatés acides, sont maintenus en conditions anaérobies ; ils sont proches de la neutralité et ils restent modérément salés. Localement, ou temporairement lorsque les nappes s'abaissent, le sulfure de fer est oxydé par voie microbienne et il se forme de la jarosite et de la goethite. En conditions normalement drainantes, l'acidité produite est évacuée jusqu'à la mer et neutralisée. Mais lorsque des conditions d'aridité se manifestent, la lixiviation des éléments solubles se trouve empêchée ; les sulfates sont maintenus dans la solution du sol et le pH s'abaisse fortement en provoquant une attaque des argiles (acidolyse). Soumis alors aux conditions évaporatoires intenses du climat chaud à longue saison sèche, ces sulfates se concentrent à la surface des sols. Des sels particuliers - sulfates mixtes de fer, d'aluminium et de magnésium - peu connus en milieu naturel, y précipitent de façon parfois spectaculaire et étendue sous forme d'encroûtements blancs ou jaunâtres, pulvérulents : alunite, tamarugite, halotrichite, rozenite, pickéringite, hexahydrite, bloedite, coquimbite, ont été identifiés au Sénégal. En saison suffisamment humide et en système ouvert, ces sels sont entraî-

nés et neutralisés par les bicarbonates marins ; en système moins drainant plus fermé, ils se maintiennent dans les solutions du sol et dans les eaux superficielles et sont redistribués dans les sols et les paysages à la saison sèche suivante.

Si la mangrove *stricto sensu* peut être considérée comme représentative des milieux chauds et humides, l'apparition et l'extension, à ses dépens, des termes extrêmes de son évolution - les sols sulfatés acides à sulfates mixtes - sont des indicateurs de l'aridification. Parfaitement visible actuellement sur la côte ouest-africaine sur une séquence latitudinale qui va de la Guinée humide jusqu'en Mauritanie aride, l'extension relative des différents termes de cette dégradation rapide est en relation avec la diminution récente des précipitations et des écoulements.

Sols Chloruro-sulfatés

Un faciès de salinité largement représenté dans les régions arides est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfates.

L'origine de ces sels est variable :

- elle est bien souvent liée à des invasions marines anciennes ou actuelles plus ou moins loin à l'intérieur des terres (vallée du fleuve Sénégal, certaines îles de la République du Cap-Vert, plaine d'Utique et Chott Djérid en Tunisie) ;
- elle peut être due à une contamination souterraine de nappes alluviales en raison d'une inversion de gradient de pression hydrostatique ;
- elle peut être due, également, à des embruns ou au volcanisme ;
- elle peut aussi être secondaire, induite par l'homme sous l'effet d'eaux d'irrigation même peu chargées en chlorures. Ces eaux peuvent être prélevées dans des fleuves (vallée de l'Euphrate en Mésopotamie, Rio Grande au Mexique), ou provenir de nappes profondes contaminées comme en Algérie, en Tunisie, en Libye et en Arabie Saoudite.

Le vaste complexe alluvial sénégalo-mauritanien de la basse vallée du fleuve Sénégal a été, et demeure encore, influencé par les sels marins très loin en amont de l'embouchure. En effet, grâce à un ancien golfe aujourd'hui comblé, les eaux océaniques ont pénétré profondément le continent au Quaternaire récent sur près de 300 km. Les sels abandonnés ont contaminé les sédiments fluvio-marins déposés après le retrait de la mer. En outre, jusqu'en 1985, le lit mineur du fleuve restait encore affecté en période d'étiage par une remontée saline océanique sur plus de 250 km. Depuis, cette intrusion peut être considérée comme maîtrisée avec la fermeture du barrage antisel de Diama construit près de l'embouchure. Mais la salure ancienne, dite «fossile», piégée dans les sols et les nappes de la basse vallée, dans le delta essentiellement, demeure importante et certaines nappes alluviales atteignant 2 à 3 fois la salinité de l'eau de mer. Celle-ci est de nature chloruro-sulfatée sodique et magnésienne. Neutre à l'origine, elle a été influencée par l'acidité potentielle de la mangrove initiale et les pH y sont souvent relativement bas (3 à 5). Peu, ou pas, mise en mouvement par les trop faibles précipitations atmosphériques, cette salinité est essentiellement soumise à un fort gradient vertical ascendant. Les sels concentrés à la surface des sols apparaissent sous des formes diverses, efflorescences, croûtes ou formations poudreuses de teintes très changeantes en raison de la forte hygroscopicité de certains d'entre eux ($MgCl_2$, $CaCl_2$). La concentration en sels de ces salants humides peut être très élevée, (jusqu'à 67 $dS.m^{-1}$ de conductivité mesurée sur extrait 1/5 dans le delta).

Un vaste complexe hydroagricole de 400 000 ha est prévu sur cet ensemble alluvial. Le problème posé aujourd'hui est celui de la conduite des différentes spéculations agricoles envisagées - essentiellement riz, canne à sucre et cultures maraîchères -, tout en maîtrisant cette forte salinité. Il est autant plus ardu que le choix d'aménagement retenu exclut tout drainage agricole souterrain et que la pente pratiquement nulle empêche tout drainage naturel. Néanmoins, il a été démontré, par expérimentation au champ, qu'un dessalement était possible sous irrigation permanente (riziculture), grâce à la forte mobilité de ces sels chlorurés entraînés jusqu'aux sables sous-jacents dans les nappes alluviales. Les sols présentent alors un profil salin descendant (fig. 2). Il a été montré également que le système, s'il évoluait bien après abaissement de ces nappes par pompage, pouvait s'orienter à moyen terme vers une salure de type sulfaté beaucoup moins toxique, après élimination préférentielle des chlorures.

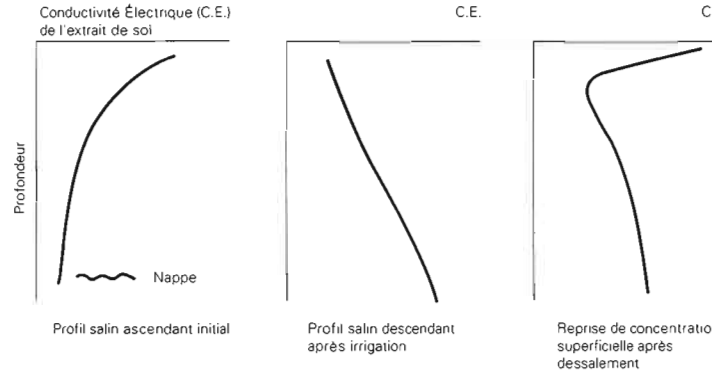


FIGURE 2 - *Allure de quelques profils salins verticaux caractéristiques des sols des zones tropicales sèches (vallée du fleuve Sénégal).*

En basse vallée de l'Euphrate, en Syrie, une salinisation de même nature s'est manifestée sous l'influence de la mise en valeur partout où les conditions naturelles de drainage ont été insuffisantes. Elle concerne essentiellement les alluvions holocènes (peut-être du Rharbien) situées à quelque distance du fleuve. Environ 120 000 ha ont été mis en culture par irrigation depuis les années quarante jusqu'aux années soixante pour une production intensive de coton et de céréales. La nappe s'est enrichie en sels et s'est rapprochée de la surface. Conséquence de l'évaporation, des sels solubles se sont accumulés en grandes quantités dans la couche exploitée par les racines. Limités au début à quelques zones déprimées, ces phénomènes se sont progressivement étendus à des superficies importantes. Les rendements des cultures ont diminué, avec apparition de taches stériles. Le besoin en terres cultivables est aujourd'hui tel dans la vallée que les agriculteurs continuent les cultures jusqu'à la limite extrême de tolérance des plantes aux sels (jusqu'à des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée de 20 à 25 $dS.m^{-1}$ pour le blé et le coton), avec des rendements pratiquement nuls. La culture irriguée n'est pratiquée de façon satisfaisante que sur les parties assez proches du fleuve et sur quelques îlots qui bénéficient d'un drainage suffisant. La salinisation se poursuit sur les zones abandonnées où la nappe reste haute, (la conductivité de l'extrait saturé atteint 60 $dS.m^{-1}$ dans la couche supérieure du sol et dépasse 150 $dS.m^{-1}$ dans les croûtes superficielles). Ce processus s'est réalisé en quelques décennies seulement et, dans les cas les plus défavorables, quelques années ont suffi à rendre des sols inaptes à la culture. Toujours neutre, la salinité est de nature chlorurée sodique et calcique dominante avec localement présence de sulfates de sodium et de magnésium.

Dans les zones abandonnées, le gradient vertical de salinité est ascendant ; il est nul ou descendant en zones cultivées. Les endroits où la salinité chlorurée calcique et magnésienne domine, se présentent sous un aspect très reconnaissable, brun et humide en surface, parfois collant même en saison sèche. En hiver, après une période de dessiccation rapide qui succède à un épisode pluvieux, le sol se couvre d'efflorescences blanches, poudreuses. Dans la mesure où un drainage artificiel est possible, la récupération de ces sols, nécessaire pour les besoins de l'agriculture du pays, implique l'élimination de l'excès de sels par lessivage et la mise en pratique d'une irrigation rationnelle. Ces actions sont essentielles pour la conservation du support de la production agricole du pays, où la ressource en eau est abondante.

Sols sulfatés

Dans les régions méditerranéennes, d'énormes quantités de gypse se sont accumulées dans les matériaux sédimentaires, à partir du Trias et jusqu'au Mio-Pliocène. Au cours du Quaternaire, la dissolution de ces roches a mobilisé d'importantes quantités de ce gypse qui s'est concentré dans les nappes profondes et dans les sédiments plus superficiels. En conditions très arides, sous climat saharien ou subsaharien, ce sulfate de calcium n'est pas éliminé par les eaux pluviales et il s'établit un cycle de dissolution-précipitation avec reprise éolienne. D'immenses régions subdésertiques sont affectées par des manifestations sulfatées diverses qui vont des amas gypseux, roses des sables, dunes et voiles éoliens gypseux, jusqu'aux encroûtements et croûtes indurées, continus, parfois très étendus. Ces accumulations sont souvent liées à l'évaporation d'une nappe salée dont les eaux sont saturées en sulfate de calcium (de 2 à 7 $g.l^{-1}$ selon la teneur en NaCl). Lorsque son produit de solubilité est dépassé, le gypse précipite à la surface des sols, au niveau des sources, des résurgences diverses ou des zones d'artésianisme comme dans tout le Sud tunisien. En Arabie Saoudite, des croûtes gypseuses tuffacées sont rencontrées à la surface du sol, sur des superficies assez importantes à proximité d'oasis (Al Hassa, Al Jawf). Dans les zones actuellement irriguées avec des eaux sulfato-chlorurées, la précipitation de gypse se produit peu profondément dans les sols au niveau de la frange capillaire de la nappe phréatique. Elle forme des croûtes, ou *terch*, fréquentes dans les sols d'oasis de la Tunisie présaharienne ou du Souf algérien. Elles sont parfois si indurées qu'elles constituent un obstacle à l'enracinement du palmier-dattier.

Sols carbonatés et bicarbonatés

Au nord-est du lac Tchad, plusieurs bras, isolés par des barrages, ont été transformés en polders dans les années cinquante à soixante. La poldérisation est obtenue par évaporation. Le niveau de l'eau s'abaisse de plus de 3 m en concentrant les eaux emprisonnées mais aussi une partie des eaux infiltrées qui proviennent de plans d'eau libre des bras non barrés du lac. Des sols complètement nouveaux se sont formés sur les matériaux des fonds ainsi exondés, localement riches en matière organique et en sulfures. Dans les parties basses des polders, où les eaux piégées initialement se sont concentrées, des sols très alcalins, véritables salants noirs à carbonates de sodium, se sont formés à la partie supérieure des matériaux encore très humides, avec maintien des sulfures, dégradation de la structure et imperméabilisation quasi totale. À la périphérie, les sols, bien structurés, sont peu ou pas salés, neutres, avec une nappe assez profonde, utilisée pour l'irrigation des cultures.

La difficulté au départ était d'obtenir une bonne étanchéité des barrages pour garantir une sécurité suffisante aux polders. Un assèchement rapide était souhaitable pour limiter les effets de la concentration des eaux et le développement des sols carbonatés dans les zones les plus basses. Cet assèchement était sous la dépendance du bilan évaporatoire local et des infiltrations à travers les sables. Commencée à la fin des années soixante et poursuivie depuis, la période de sécheresse a abaissé le niveau du lac de plus de 2 m au milieu des années soixante-dix. La culture a pu continuer néanmoins, car les eaux infiltrées à la périphérie des polders étaient peu, ou pas, chargées en sels du fait de la régulation saline du lac. Les informations font malheureusement défaut pour connaître le comportement des sols et des cultures depuis que les eaux libres du lac ont sensiblement régressé au cours des dernières années. Seules les eaux de nappe, infiltrées à travers les sables, peuvent contribuer à maintenir les cultures. Il est vraisemblable que seule une salinité neutre continue de se développer dans ces polders sous ces conditions.

Sols alcalisés

Des manifestations de salure, autres que ces excès de sels solubles, affectent aussi certains sols des régions arides. Elles sont dues au sodium qui se fixe sur les argiles, lorsqu'il est abondant dans le milieu naturel par rapport au calcium, et aboutit à une sodisation ou alcalisation des sols. En saison humide, sous l'influence des eaux douces, ce sodium, dont les effets nocifs peuvent se conjuguer à ceux du magnésium, subit une hydrolyse qui provoque la défloculation des argiles, avec augmentation sensible du pH (de l'ordre de 9). Les terres affectées, très dispersées, boueuses, à consistance dite crémeuse, deviennent vite asphyxiantes, peu perméables à l'eau et à l'air, et ingrates à cultiver. En saison sèche, prises en masse, elles atteignent des compacités élevées avec une très faible porosité interne.

Le sodium responsable de cette dégradation peut avoir une origine pétrographique, car certaines roches libèrent par altération des quantités relativement importantes de cet élément. C'est le cas dans le moyen bassin du fleuve Sénégal, aux environs de Bakel, où les schistes sériciteux de la Falémé, qui affleurent de part et d'autre de la frontière sénégalo-malienne, sont responsables de la sodisation des sols de piémont. C'est aussi le cas à l'extrême nord du Burkina Faso, dans l'Oudalan, et au Niger, au nord de Niamey dans la région de Tillabéry, sur les deux rives du fleuve Niger, où des affleurements de granites calco-alcalins et alcalins produisent les mêmes phénomènes. Des paysages très particuliers se façonnent avec des terres à morphologie souvent plane, nues ou occupées par une maigre végétation arbustive adaptée, de type *Balanites aegyptiaca*, ou *Acacia seyal* et *A. senegal*. Les vastes surfaces de piémont, érodées en nappe et imperméables, ainsi formées, sont des zones d'accélération du ruissellement responsables du ravinement des sols situés plus en aval.

Dans d'autres cas l'alcalisation peut résulter d'une fixation progressive du sodium sur le complexe échangeable des sols à partir d'une nappe temporaire actuelle ou ancienne à fort coefficient d'adsorption du sodium par rapport au calcium. Ceci se produit en zones alluviales basses comme dans l'est du Tchad, dans la région d'Abéché, où des sols alcalisés, formés à partir de sédiments fluvio-lacustres affleurant, occupent de larges espaces pavés d'éléments grossiers, incultes, peu ou pas salés, mais à fort rapport Na/Ca échangeables. Les alluvions du Chari et du Logone portent des sols analogues, en position intermédiaire entre les sols sains des levées de berges et les sols salés et hydromorphes des dépressions.

En Tunisie centrale, au Sénégal, au Mali, au Niger, etc., une alcalisation secondaire induite par l'irrigation se manifeste également dans les sols :

- soit directement, par utilisation d'une eau d'irrigation alcalisante, souvent issue de forages (eaux de la plaine de Kairouan et nappes du Maestrichien sénégalo-mauritanienne) ;
- soit indirectement, par remontée de la nappe phréatique elle-même de médiocre qualité (delta du fleuve Sénégal et moyen Niger).

Les manifestations de cette alcalinité sodique sont diverses selon le climat : effet physique sur la structure, la dispersion des agrégats et sur la perméabilité, et/ou effet chimique avec augmentation du pH et apparition de salants noirs en surface par dispersion de la matière organique (Kouroumari, périmètre de l'Office du Niger, Mali).

En Israël, AMIEL *et al.* (1986) signalent une alcalisation par adsorption de sodium et de magnésium dans les couches profondes du sol, après des apports de longue durée d'amendements gypseux en surface. On observe une dégradation des propriétés physiques ainsi qu'une baisse du rendement des cultures irriguées.

Sous climats arides, le sodium, peu mobilisé naturellement dans les sols, sature plus ou moins le complexe adsorbant des différents horizons des profils ; au contraire, sous des climats plus humides, il est partiellement entraîné en profondeur et différencie d'autres termes de cette évolution alcalisante que sont les sols très particuliers appelés *solonetz* et *solods*. C'est donc le stade «à alcalis» seulement, au cours duquel le sodium ne migre pas, qui caractérise les sols des régions les plus sèches, tropicales sahéliennes et méditerranéennes arides.

CONCLUSION, CONSÉQUENCES POUR L'AGRICULTURE

Lorsqu'elles atteignent les zones d'évaporation, les eaux des zones arides acquièrent des faciès de salinité marqués par leur composition chimique initiale et par des contaminations ou par des pertes en sels qui ont précipité à mesure de leur concentration.

Les sols, salinisés au contact de ces eaux diversement concentrées, ont des faciès chimiques analogues, avec les mêmes pôles sulfatés, chlorurés, carbonatés, sodiques, magnésiens, calciques. Le sodium fixé sur le complexe adsorbant a une action alcalisante particulièrement nocive sur l'ambiance chimique des sols et, en l'absence de sels solubles, sur leurs propriétés physiques.

La pratique de l'irrigation reproduit ces phénomènes et les étend à des sols qui ne seraient pas concernés naturellement. En conséquence, la qualité des eaux d'irrigation doit être appréciée en tenant compte de la nature des sols et de l'aridité du climat.

En climats arides, les besoins des cultures nécessitent des quantités d'eaux très importantes, dont l'apport en sels est le plus souvent loin d'être négligeable. En fin de saison culturale, il en résulte presque toujours des augmentations de salinité dans les sols. Dans les pays méditerranéens et tropicaux, les pluies supérieures à 500 à 600 mm représentent une possibilité de lessivage naturel des sols, très intéressante même sous saison pluvieuse chaude. Cette possibilité existe encore avec des précipitations de l'ordre de 300 à 350 mm par an pour des sols de texture moyenne à légère. Elle n'existe plus au-dessous, c'est-à-dire dans la plupart des pays en zone subdésertique : Sahel, sud du Maghreb et Moyen-Orient. Cette situation explique la très grande importance des phénomènes de salinité dans ces régions dont l'agriculture, plus que toute autre, est en danger.

Sans entrer dans les aspects techniques de l'agriculture irriguée en zones arides, il n'est pas inutile d'en rappeler les principaux impératifs. Les propriétés physiques des sols et leur conservation constituent la base principale de ce système de production.

L'alcalisation des sols est donc tout particulièrement redoutée (*cf. supra*). S'il est possible de l'identifier et d'éviter alors l'installation de périmètres irrigués, il est difficile de l'empêcher et d'y remédier lorsqu'elle se développe sous l'influence d'une eau d'irrigation et réduit les qualités d'infiltration et de percolation des sols.

La salinité de l'eau d'irrigation détermine une *salinité limite* dans le sol, en fonction du système d'irrigation, du bilan évaporatoire et des propriétés hydrodynamiques des sols. Cette salinité limite conditionne le choix des cultures et conduit à écarter les moins tolérantes, car leur croissance et leurs rendements seraient très mauvais, sinon nuls.

Le choix du système d'irrigation joue également un grand rôle. Le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation par aspersion ou à l'irrigation localisée permet de réduire les apports d'eau de 15 à 25 %, ce qui influence le mouvement des sels dans le sol. Cette réduction est considérable aussi bien lorsque la ressource est limitée, que lorsque les équipements sont onéreux.

Un drainage artificiel est nécessaire partout où la nappe ne peut pas évacuer seule les eaux de percolation qui y parviennent dans les conditions d'un périmètre irrigué. De plus cette nappe doit être contenue au-dessous d'une *profondeur critique* susceptible de réduire les remontées salines dans la zone des racines. Sous climat aride, il est possible de mettre en culture des sols très riches en sels solubles par un lessivage intensif préalable ou, lorsque l'aridité n'est pas excessive, par un lessivage progressif. L'aptitude des sols à être lessivés dépend davantage de leurs propriétés physiques que de leur salinité initiale.

En conclusion, l'agriculture irriguée est possible et durable en zones arides, même avec des eaux de qualité médiocre, sous réserve que les projets soient correctement étudiés et mis en œuvre avec des moyens techniques suffisants. Un contrôle permanent doit être exercé sur les moyens de production et une formation complète doit être assurée aux agriculteurs.

G. Bouteyre* et J.-Y. Loyer : *pédologues*,
ORSTOM, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1
*G. Bouteyre a été en service détaché jusqu'en 1987 au Gersar
(Groupement d'études et de réalisation des sociétés d'aménagement régional)

Bibliographie

AMIEL (A.J.), NAMERI (M.) et MAGARITZ (M.), 1986. - Influence of intensive cultivation and irrigation on echangeable cations and soils properties : A case study in Jordan Valley, *Israel-Soil Science*, vol. 142, N° 4 : 223-228.

AUBERT (G.), 1977. - Map of salty soils of Africa, in 1976 International salinity Conference. Lubbock, Texas, USA : 598-604.

BELKHODJA (K.), 1970. - Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan. Thèse doct. ing., Toulouse. *Bull. Division des Sols* n° 4 DRES Tunis.

BOULAINE (J.), 1954. - La Sebkha Ben Ziane et sa lunette ou bourrelet, exemple morphologique formé par la dégradation éolienne des sols salés. *Rev. Geomorph. Dyn.* 5e année n° 3 : 102-123.

CHEVERRY (C.), 1974. - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse, Strasbourg, 275 p. *multigr.*

DUTIL (P.), 1971. - Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse, Strasbourg, 346 p. *multigr.*

FLORET (Ch.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement. *Trav. et Doc. ORSTOM* n° 150, Paris, 544 p.

GERSAR, 1983. - Géochimie des eaux d'irrigation en pays arabes. Ministère des Relations extérieures Paris - ACSAD (The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands), Damas. Avec la collaboration du Centre de Sédimentation et de Géochimie de la Surface-CNRS-Strasbourg, 177 p.

GERSAR, SCET, 1976. - Development of the Lower Euphrates Valley. General Preliminary Projet. Volume A. Present situation and basic improvement data, 194 p. + cartes au 1/50 000 + annexes.

GERSAR, 1987. - Development of the Lower Euphrates Valley. Irrigation and drainage. Projet Zone 1. Detailed Soil Survey R2A. Text'R2B Land Reclamation. General Organisation for Land Development. Ministry of Irrigation. Syrian Arab Republic, 145 p. + 55 p. + cartes au 1/5 000 + Annexes.

GERSAR, 1987. - Étude des possibilités d'utilisation de l'eau salée pour l'irrigation en vue de la création de fermes pilotes dans les pays arabes - ACTIM (Agence pour la Coopération technique industrielle et économique) Paris - ACSAD (The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands) Damas. 101 p.

LE BRUSQ (J.-Y.), LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et CARN (M.), 1987. - Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Sc. du sol* 1987, n° 3, Plaisir , France : 173-184.

LOYER (J.-Y.), 1989. - Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine sahélien. *In* «Le Risque en Agriculture», *à travers champs* : 531-539, ORSTOM, Paris.

LOYER (J.-Y.), 1989. - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. *Études et thèses,* ORSTOM, Paris, 137 p.

LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. - Changements récents induits par l'intervention humaine sur les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal. Symposium International INQUA - Dakar, Avril 1986 Ed. ORSTOM, Paris : 273-277.

LOYER (J.-Y.), BOIVIN (P.), LE BRUSQ (J.-Y.) et ZANTE (P.), 1986. - Les sols du domaine fluviomarin de Casamance : Évolution récente et réévaluation des contraintes majeures par leur mise en valeur. 3e Symposium international «Sols sulfatés acides», Dakar 6-11 Jv. 1986, *ILRI* pub. 44 : 16-23.

ROCHE (M. A.), 1973. - Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse Univ., Paris VI, ORSTOM, Paris, 318 p. *multigr.*

SIRCOULON (J.), 1987. - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du XXe siècle. *Proceedings of the Vancouver Symposium IAHS Publ.* n° 168 : 13-25.

SOGREAH. - Un exemple d'évolution des sols après une trentaine d'années d'irrigation. (Office du Niger, Mali). 4e Conférence régionale afro-asiatique de la CIID., Lagos, Nigéria vol. II, n° 08 : 103-108.

Bernard SEGUIN

Approche de l'évapotranspiration par télédétection :

utilisation des satellites météorologiques Meteosat et Noaa en Afrique sahélienne

INTRODUCTION

En zone aride, l'importance du phénomène d'évapotranspiration est encore accrue par l'effet prépondérant de la disponibilité de l'eau sur la production végétale.

C'est naturellement le cas pour l'Afrique sahélienne, où les travaux d'agroclimatologie, développés depuis une vingtaine d'années, ont mis l'accent surtout sur la quantification du bilan hydrique des cultures.

En ce qui concerne l'évapotranspiration, cette dernière nécessite :

- d'une part la mesure ou, plus généralement, l'estimation de la référence climatique fournie par l'évapotranspiration potentielle (ETP) ;
- d'autre part la mesure ou le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) des cultures considérées.

L'ÉVAPOTRANSPIRATION EN ZONE SAHÉLIENNE

L'étude de COCHEMÉ et FRANQUIN (1967) a permis une première approche globale des variations spatio-temporelles d'ETP de la zone sahélienne. La thèse de RIOU (1972), qui s'appuie sur des mesures effectuées en Afrique centrale, présente une analyse exhaustive du déterminisme de cette ETP en relation avec les paramètres climatiques et les caractéristiques de milieu de la parcelle de mesure ; par ailleurs, les travaux de DANCETTE (1976, 1983) ont conduit à une connaissance approfondie de ses variations spatiales, dans le cas particulier du Sénégal. La thèse de POUYAUD (1985), sur l'évaporation des surfaces d'eau libre, vint compléter ces travaux. À l'heure actuelle et à travers cet ensemble, il est permis d'estimer - à condition évidemment de disposer des données climatiques adéquates - que la connaissance de l'ETP est suffisamment précise (de l'ordre de 10 %) pour la caractérisation du bilan hydrique des cultures.

En ce qui concerne l'ETR, le constat (SEGUIN et *al.*, 1982) est un peu différent bien qu'il ne soit pas spécifique à l'Afrique sahélienne. Peu de mesures sont disponibles à partir des dispositifs micrométéorologiques ; ce sont essentiellement les suivis de bilan hydrique, à partir de mesures neutroniques (DANCETTE, 1983), qui ont permis de quantifier l'ETR de différentes cultures en parcelles d'expérimentation. Depuis quelques années, les modèles de bilan hydrique, en particulier celui de FRANQUIN et FOREST (1977) développé ensuite à l'Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (Irat) par FOREST, fournissent des estimations d'ETR par périodes de cinq

à dix jours, à partir d'hypothèses sur les réserves utiles des types de sols considérés. Les calages effectués permettent d'obtenir le plus souvent une bonne concordance entre mesures et estimations d'ETR ; en général, les écarts se situent dans la fourchette ± 20 % pour des valeurs décadaires. Ces estimations, qu'on peut juger satisfaisantes dans l'état actuel des choses, permettent d'effectuer un suivi agroclimatique de l'année en cours, de porter des diagnostics sur les évolutions climatiques à long terme (FOREST, 1982) et de comparer des stratégies d'utilisation de l'eau dans l'optique de son optimisation. Un des problèmes soulevés par la plus large utilisation de ces modèles vient de ce qu'ils caractérisent essentiellement une situation «locale», conditionnée par les données météorologiques et par les caractéristiques du sol adopté ; ils ne peuvent donc traduire la forte variabilité des situations effectives, en particulier des épisodes pluvieux.

APPORTS POSSIBLES DE LA TÉLÉDÉTECTION

À ce niveau, le seul moyen d'introduire une description spatiale des échanges hydriques réside dans l'utilisation de la télédétection. Si certaines possibilités apparaissent au niveau des micro-ondes, passives ou actives (radar), les systèmes satellitaires demeurent encore peu, ou insuffisamment, opérationnels dans ces domaines de longueur d'onde. Disponible à partir des satellites météorologiques Meteosat ou Noaa-AVHRR, l'infrarouge thermique, en revanche, permet d'accéder à l'estimation de l'ETR, par l'intermédiaire de la mesure de la température de surface, et surtout à sa cartographie (avec une résolution de 5 km pour Meteosat, et de 1 km pour Noaa).

Les travaux développés dans notre laboratoire sur ce sujet (SEGUIN *et al.*, 1982 ; SEGUIN, 1984) sont apparus comme porteurs d'éventuelles applications intéressantes au niveau de l'Afrique sahélienne ; ils ont suscité un programme d'étude sur le suivi du bilan hydrique par télédétection au Sahel. Celui-ci, parallèlement aux données d'IR thermique, a utilisé les indices de végétation déduits des canaux du visible et du proche infrarouge des satellites Noaa, lesquels se sont révélés très complémentaires des températures de surface pour la caractérisation de l'évapotranspiration.

Dans sa première phase (1984-1987), ce programme a rassemblé :

- l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) d'Avignon (bioclimatologie), l'Irat de Montpellier et le LERTS de Toulouse, au niveau français ;
- l'Institut sénégalais de recherches agricoles (Isra) et la Météorologie nationale, au Sénégal, avec l'appui d'Agrhymet pour l'extension à la zone sahélienne.

Il a bénéficié d'un financement conjoint du CCR, à Ispra, de la CEE-DGXII, dans le cadre du projet *Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie du Sahara*, et du ministère des Relations extérieures (MRE), en France.

Les travaux ont mis en évidence l'apport essentiel de l'imagerie satellitaire pour la cartographie spatiale du facteur hydrique ; en particulier, ils ont établi la possibilité de quantifier la répartition spatiale des pluviométries (par le biais de l'évapotranspiration et de son influence sur la température de surface) sur une échelle mensuelle, à partir des sommes de température de surface obtenues par Meteosat. Cette approche se révèle très complémentaire de celle élaborée au Centre de météorologie spatiale (CMS) de Lannion qui s'appuie sur le suivi des épisodes nuageux à sommet froid (CARN *et al.*, 1987). Elle laisse espérer, à partir d'un approfondissement des bases théoriques des relations obtenues (essentiellement empiriques, dans les 2 cas, à l'heure actuelle), la possibilité d'améliorer, dans un proche avenir, la connaissance de la répartition spatiale des épisodes pluvieux.

L'ensemble des résultats obtenus a fait l'objet d'un certain nombre de publications (ASSAD, 1984 ; ASSAD *et al.*, 1986 ; ASSAD, 1987 ; IMBERNON *et al.*, 1987 ; KERR *et al.*, 1987 ; NÈGRE *et al.*, 1987 ; SEGUIN *et al.*, 1987 ; SEGUIN *et al.*, 1989 ; KERR *et al.*, 1989) qu'il n'est pas dans notre propos de reproduire ici. En revanche, il nous a paru intéressant de reprendre les principales conclusions de ces études dans l'optique spécifique de l'évapotranspiration, en montrant comment ce facteur peut être quantifié, surtout dans ses variations spatiales, à partir de mesures satellitaires, par une double approche : estimation à partir de la température de surface d'une part, mise en relation avec l'indice de végétation normalisé d'autre part.

Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'IR thermique

Le principe de base de cette estimation repose sur l'analyse du bilan d'énergie au niveau de l'interface sol-atmosphère, et s'exprime par l'équation instantanée en conditions diurnes :

$$Rn = S + H + LE \qquad (1)$$

où l'énergie admise sous forme de rayonnement net Rn se répartit entre flux de chaleur par conduction dans le sol S, flux de chaleur sensible dans l'air H et flux de chaleur latente LE (flux de vapeur d'eau E qui correspond à l'ETR convertie en énergie par le biais de la chaleur latente de vaporisation L).

Les lois des échanges turbulents au niveau de l'interface permettent d'écrire :

$$H = \rho\ Cp\ h\ (Ts - Ta) \qquad (2)$$

en exprimant H en fonction de l'écart Ts - Ta de température entre la surface et l'air par le biais du coefficient d'échange h, les constantes ρ et Cp étant la masse spécifique et la chaleur spécifique de l'air. Il s'ensuit que la relation déduite de (1) et (2) :

$$LE = Rn - S - \rho\ Cp\ h\ (Ts - Ta) \qquad (3)$$

établit la liaison entre le niveau instantané de l'évapotranspiration LE et l'écart Ts - Ta, qui est la base des différentes méthodes utilisables pour passer de Ts à LE.

Nous renvoyons à un article de synthèse récent (SEGUIN, 1984) pour l'analyse détaillée de celles-ci. Depuis quelques années, à partir de cette équation, nous avons développé pour notre part une approche simplifiée qui permet de passer de la mesure thermographique en milieu de journée à l'estimation de l'évapotranspiration journalière (ETRj) en s'appuyant sur l'adoption d'une valeur moyenne calculée pour le coefficient d'échange (SEGUIN et ITIER, 1983). L'application de cette relation simplifiée, combinée à l'utilisation d'un modèle agrométéorologique, permet d'effectuer, à partir des données de Meteosat (SEGUIN *et al.*, 1986) et de Noaa (VIDAL *et al.*, 1986) une cartographie de l'ETRj qui constitue une première approche satisfaisante du problème, en particulier lorsque sont considérées des périodes de temps d'au moins quelques jours ; la figure 1 a été obtenue d'après des paramètres de sortie du modèle agrométéorologique Earth (CHOISNEL, 1985) à partir des données météorologiques d'Avignon.

Cette approche permet donc d'établir :

$$ETRj = Rnj + a - b\ (Ts - Ta) \qquad (4)$$

où les coefficients a et b dépendent essentiellement de la rugosité de la surface considérée.

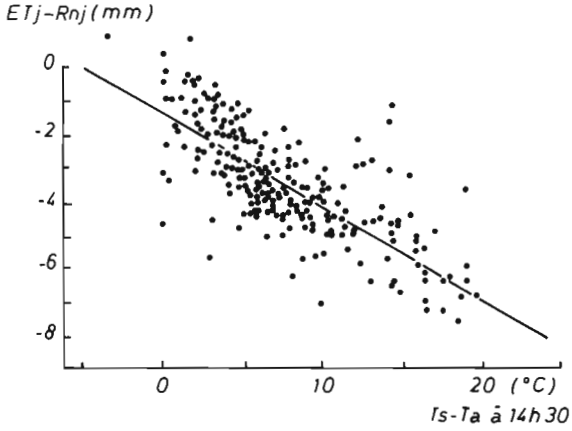


FIGURE.1 - *Relation entre ET-R_n journalière (en mm) et T_s - T_a à 14h 30 TU obtenue à partir du modèle Earth pour les données climatiques d'Avignon.*

$$\sum ETR = \sum Rn + na + b \sum(Ts - Ta) \quad (5)$$

où l'on retrouve le concept de «*stress-degree day*» [$\sum$(Ts - Ta)] introduit par JACKSON *et al.* (1977).

L'évapotranspiration et la production de biomasse : relation avec l'indice de végétation normalisé

La production de biomasse correspond à la quantité de matière sèche (MS) élaborée par l'assimilation nette (An : différence entre photosynthèse et respiration) à l'échelle de temps élémentaire (dt) :

$$(dMS)/(dt) = An = Phot. - Resp. \quad (6)$$

elle devient, pour une période donnée :

$$MS = \sum An \quad (7)$$

Les mécanismes de photosynthèse (et de respiration) comme ceux de transpiration sont la résultante d'un flux de diffusion entre la cavité stomatique (à l'intérieur de la feuille) et les composants de l'air : gaz carbonique dans le premier cas, eau dans le second. Cette analogie, qui existe à l'échelle fine, entre les 2 mécanismes a conduit depuis très longtemps, à les considérer comme fortement liés entre eux.

Si le «coefficient de transpiration» (An/ETR) (de l'ordre de 1/360 ; BUDYKO, 1974) peut varier très largement, suivant le type de couvert végétal et les conditions climatiques considérées, à grande échelle, la production de biomasse (MS) est bien reliée à l'évapotranspiration réelle cumulée sur la période considérée par des relations de type linéaire :

$$MS = c \sum ETR \quad (8)$$

Or, des travaux récents, qui utilisent essentiellement Noaa-AVHRR et l'indice normalisé NDVI = (C2 - C1)/(C2 + C1) calculé à partir de la luminance C1 et C2 dans les

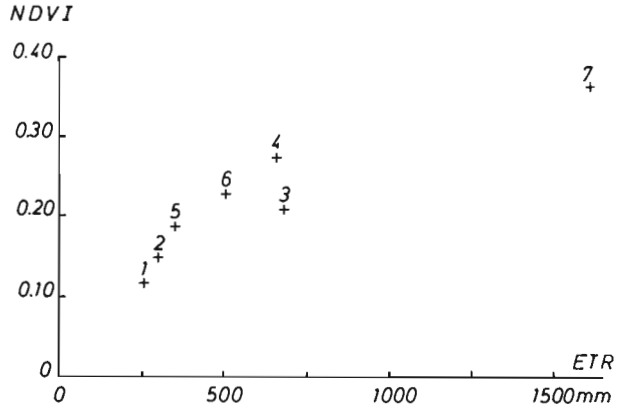


FIGURE.2 - *Relation entre l'indice annuel intégré NDVI et le cumul d'ETR annuelle pour 7 stations d'Asie (1. Quetta, 2. Kaboul, 3. Delhi, 4. Darjeeling, 5. Chang Chun, 6. Lahore, 7. Pontaniak) à partir des données publiées par* JUSTICE et al. *(1985).*

canaux 1 et 2 (rouge et proche infrarouge), ont mis en évidence certaines relations entre la valeur moyenne intégrée de cet indice NDVI au cours de la saison de végétation et la production de biomasse correspondante.

En effet, si les recherches effectuées à l'échelle de la parcelle ont surtout mis en évidence les relations qui existent entre NDVI et biomasse sur pied à un instant donné (notamment : AASE et SIDDOWAY, 1981 ; KIMES *et al.*, 1981 ; TUCKER *et al.*, 1981 ; KOLLENKARK *et al.*, 1982), l'analyse de l'évolution temporelle du NDVI à partir de la base des données *Global Vegetation Index* du satellite Noaa (échelle hebdomadaire etrésolution de l'ordre de 20 km x 20 km) a permis de mettre en évidence, au moins qualitativement, une relation à grande échelle entre l'indice intégré annuel et la production primaire annuelle de matière sèche (sur l'Afrique : TUCKER *et al.*, 1985 ; sur l'ensemble du globe : JUSTICE *et al.*, 1985).

Dans ce dernier article, la publication de l'analyse de résultats sur 7 sites d'Asie nous a permis, à partir des données climatiques jointes (SEGUIN, 1986), d'établir une relation quantitative satisfaisante avec l'ETR annuelle calculée par la formule hydrologique de TURC (1954) (fig. 2).

La correspondance entre cette relation et celle qui existe entre productivité globale annuelle et ET (LIETH, 1975) permet d'établir une correspondance approchée :

$$MS = d\ NDVI \qquad (9)$$

(avec $d \approx 40$ pour MS exprimé en $t.ha^{-1}$).

Comme suggéré par TUCKER *et al.* (1985), cette relation entre indice intégré et biomasse produite peut s'expliquer par l'analyse du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) absorbé par la végétation suivant le formalisme défini par MONTEITH (1977) et repris par KUMAR et MONTEITH (1982), HATFIELD *et al.* (1984), WIEGAND et RICHARDSON (1984), GOSSE *et al.* (1986), etc. :

$$MS = \sum IPAR\ .Eb \sum dt \qquad (10)$$

où le PAR intercepté (IPAR) est converti en matière sèche avec un coefficient Eb relativement constant pour une culture donnée.

En écrivant IPAR = Ei . PAR, Ei étant l'efficience d'interception du PAR, et en sachant que le rapport du PAR au rayonnement solaire global (Rg), (PAR)/(Rg) = Ec, est de l'ordre de 0,5, on peut obtenir :

$$MS = Eb \,.\, Ec \sum Rg \,.\, Ei\, dt \qquad (11)$$

Or, des travaux comme ceux de ASRAR *et al.* (1984) montrent une relation quasiment linéaire, dans certaines limites, entre Ei et l'indice NDVI :

$NDVI \approx n\ Ei$

n étant un coefficient dépendant du type de couvert végétal.

Il s'ensuit :

$$MS = (\,Eb \,.\, Ec\,/n\,) \sum Rg \,.\, NDVI\, dt \qquad (12)$$

ce qui justifie, de façon approximative, la relation entre MS et NDVI - en bon accord avec l'analyse détaillée de SELLERS (1985) qui repose sur la modélisation des réflectances spectrales du couvert végétal et qui montre une telle relation à l'échelle instantanée.

Il apparaît donc, tant à partir de l'IR thermique que de l'indice de végétation normalisé, la possibilité d'approcher l'ETR sur des périodes de quelques jours, et donc celle de la cartographier en utilisant l'information sur les variations spatiales contenues dans les données de télédétection.

APPLICATION À L'AFRIQUE SAHÉLIENNE : COMPLÉMENTARITÉ ENTRE ÉVAPOTRANSPIRATION, IR THERMIQUE ET INDICES DE VÉGÉTATION

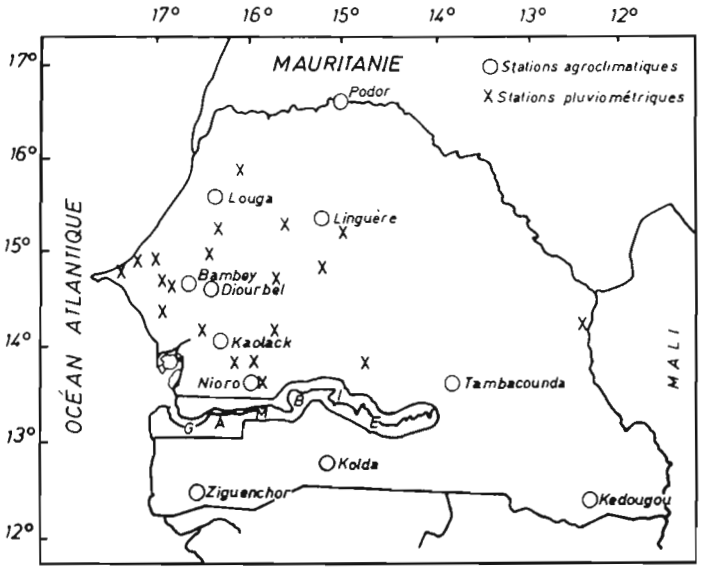


FIGURE. 3 - *Le réseau agrométéorologique du Sénégal utilisé pour l'étude.*

Cette possibilité a été testée dans le cadre du programme *supra*, principalement au Sénégal, en utilisant d'une part :

- le réseau agrométéorologique de la Météorologie nationale et de l'Isra (fig. 3) ;
- le modèle* de bilan hydrique de l'Irat ;

et d'autre part :

- les données de l'IR thermique de Meteosat, reçues à Darmstadt et traitées au LERTS de Toulouse** ;
- les données d'indice normalisé NDVI mesurées par Noaa-AVHRR***.

Estimation de l'ETR à partir de l'IR thermique

En dépit de l'incertitude notable (de l'ordre de 1 à 5 °C) sur la température de surface déduite de Meteosat, l'analyse des relations simplifiées entre ETRj - Rnj, à l'échelle journalière, et Ts - Ta (Ts : Meteosat à 13 h 30 min TU, et Ta : température maximale sous abri) se révèle globalement satisfaisante, comme le montre la figure 4.

L'utilisation de la relation :

$$ETRj - Rnj = 1,0 - 0,25\ (Ts - Ta)$$

obtenue dans le Sud-Est de la France permet d'estimer l'ETRj avec une précision de l'ordre de ± 1,0 $mm.j^{-1}$ en valeur journalière ; cette erreur est notablement réduite par l'utilisation des valeurs cumulées sur plusieurs jours.

Il est ainsi possible de proposer des cartographies d'ETRj pour les journées claires sur la partie nord du Sénégal (en gros au-dessus de la latitude de Dakar), comme le montre la figure 5 qui illustre ces cartographies pour 2 journées particulières.

Les estimations d'ETR ainsi effectuées ont pu être utilisées pour en déduire la cartographie des rapports (ETR/ETM), qui traduisent la satisfaction des besoins en eau sur les principales cultures, et à partir des relations entre rendement et ETR/ETM, pour proposer, à titre exploratoire, des cartographies de rendement basées sur des séries historiques décennales.

Relations entre ETR et indices de végétation

Parallèlement, l'analyse simultanée de l'ETR et des données d'indice normalisé NDVI déduites de 10 dates Noaa acquises à Mas Palomas au cours de la saison des pluies (en introduisant un décalage de 20 jours sur l'ETR pour tenir compte du temps de réponse sur la production de biomasse traduite par l'indice NDVI), fait apparaître une très bonne concordance, que traduisent des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,99, entre l'évolution temporelle des ETR et des NDVI cumulés (fig. 6).

---

* (version BIP 4 de Forest), simulé pour 4 cultures (mil, niébé, arachide et jachère d'herbe) ; l'ETR qui correspond à chaque station est obtenue par la pondération de l'ETR de chaque culture par sa surface relative donnée dans les statistiques agricoles.

** pour les détails sur l'étalonnage et la correction atmosphérique voir SEGUIN *et al.* (1988).

*** soit :

- à 20 km (résolution dégradée en couverture totale du globe à l'échelle hebdomadaire),
- à 1 km, à partir de 1986 (données journalières reçues à la station de l'ESA de Mas Palomas, aux Canaries).

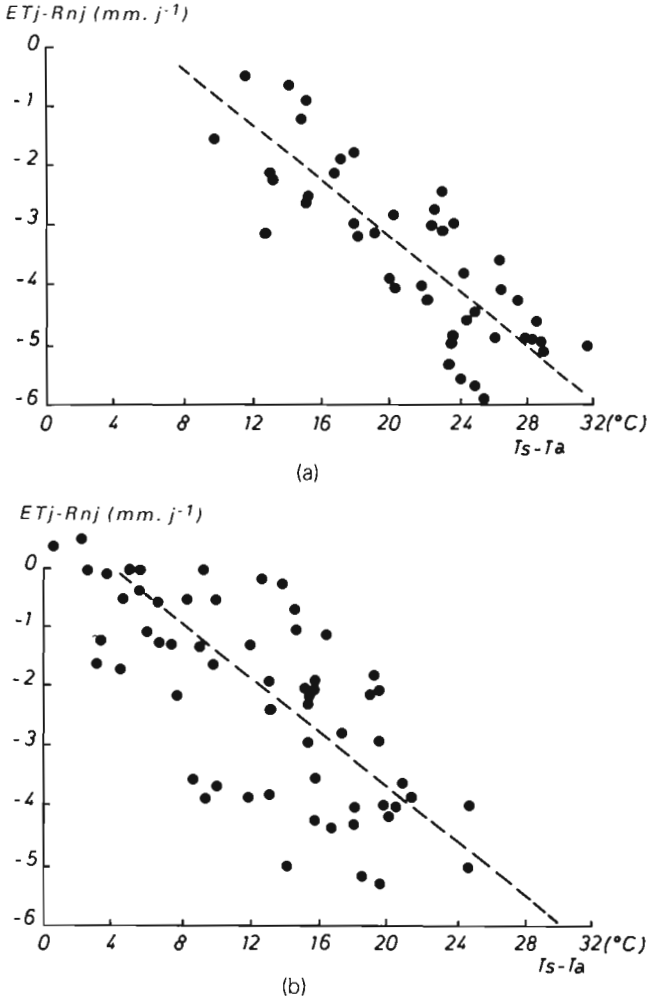


FIGURE. 4 - *Relation entre ETR - R_n journalière et T_s - T_a (T_s Meteosat à 13 h 30 TU et T_a température maximale sous abri) au Sénégal en 1984 (a) et 1985 (b). Le trait pointillé correspond à la relation ETR - Rn = 1.0 - 0.25 (T_s - T_a).*

Complémentarité entre IR thermique et indices de végétation

Il apparaît ainsi, à l'échelle de la décade et des échelles de temps supérieures (mois, saison des pluies), une forte complémentarité de l'IR thermique et des indices de végétation au niveau de l'ETR (et plus globalement de la pluviométrie) :

$$\sum ETR = \sum Rn + a - b (\sum Ts - Ta) \quad (13)$$

$$\sum ETR = d \sum Rg \,.\, NDVI \quad (14)$$

avec d = Eb . Ec / n.c

Cette complémentarité, traduite par les relations respectives de $\sum$ Ts et de $\sum$ NDVI avec la pluviométrie annuelle (et non plus avec ETR, dont nous ne disposions pas

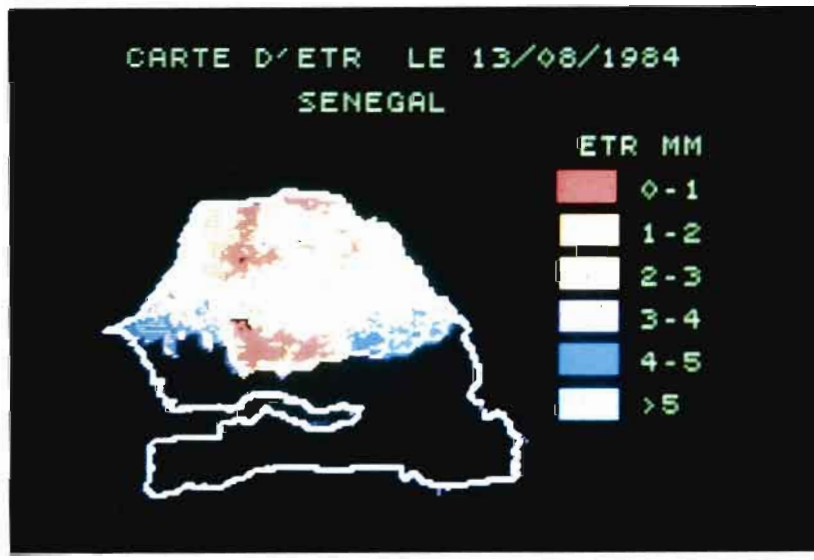


FIGURE. 5 - *Cartographie d'ETR obtenue à partir des données Meteosat et de la relation simplifiée ETR - Rn = 1.0 - 0.25 (T_s - T_a) pour deux journées particulières (a. 17-07-1984, b. 13-08-1988).*

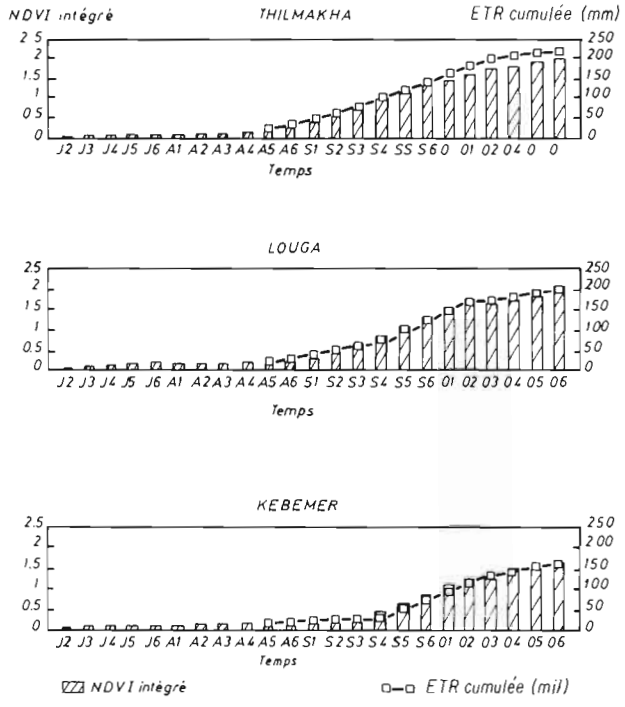


FIGURE. 6 - *Évolution simultanée des ETR (avec un retard de 20 jours) et NDVI cumulés au cours de la saison des pluies 1986 pour 3 sites au Sénégal (Thilmakha, Louga et Kebemer). L'abscisse représente le temps (la lettre étant l'initiale du mois, et le chiffre l'identification de la pentade).*

d'estimation au niveau du réseau Agrhymet), se retrouve au niveau du Sénégal (fig. 7 et 8), mais également dans l'ensemble de l'Afrique sahélienne (fig. 9 et 10) pour l'année 1984.

CONCLUSION

L'analyse effectuée à partir des données satellitaires Meteosat et Noaa-AVHRR sur l'Afrique sahélienne a montré les possibilités d'accéder à une estimation de l'ETR et de ses variations spatiales en utilisant conjointement la température de surface et l'indice de végétation normalisé.

Les résultats présentés ici représentent une première contribution exploratoire dans ce domaine nouveau. Ils confirment les potentialités des données satellitaires pour le suivi agrométéorologique des cultures dans cette zone géographique, mais ils doivent être précisés par des travaux ultérieurs (actuellement en cours) qui visent à améliorer la précision des estimations ainsi obtenues et à valider celles-ci par des dispositifs de mesure d'ETR sur des zones homogènes de dimensions compatibles avec l'échelle de résolution satellitaire (en particulier le kilomètre carré accessible à partir de Noaa-AVHRR).

B. SEGUIN : *bioclimatologue*, station de bioclimatologie, Inra, centre d'Avignon, BP 91, 84140 Montfavet

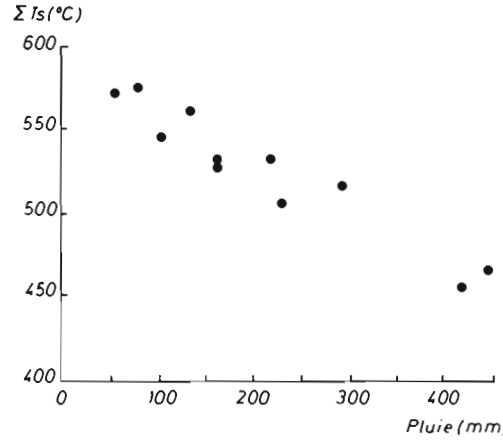


FIGURE. 7 - *Relation entre Σ T_S sur 15 dates et la pluie cumulée pour 11 stations du Sénégal au cours de la saison des pluies*

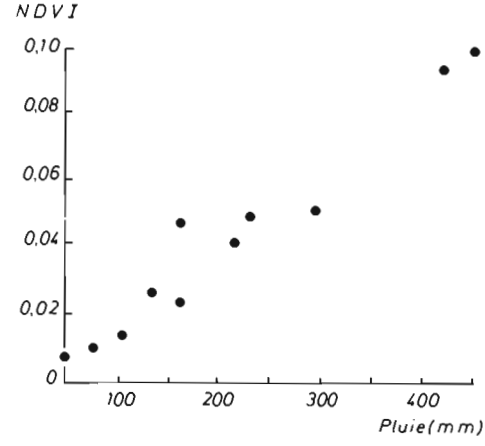


FIGURE. 8 - *Relation entre NDVI intégré et la pluie cumulée pour 11 stations du Sénégal au cours de la saison des pluies 1984.*

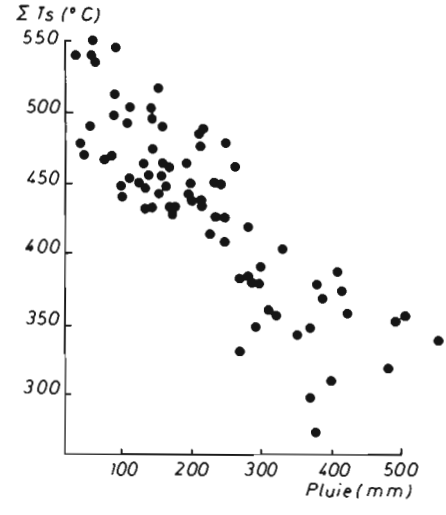


FIGURE. 9 - *Relation entre Σ T_S et la pluie cumulée pour 80 stations du réseau Agrhymet au cours de la saison des pluies 1984.*

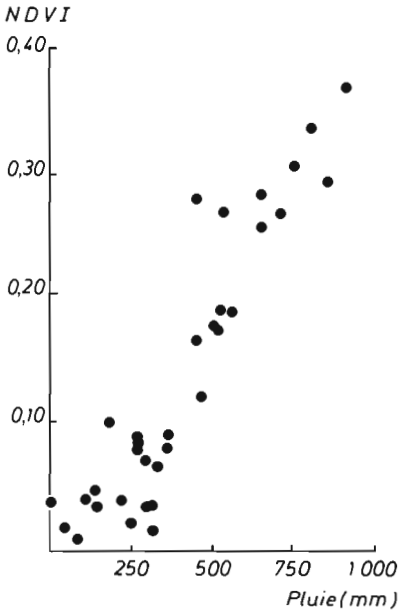


FIGURE. 10 - *Relation entre NDVI intégré et la pluie cumulée pour 80 stations du réseau Agrhymet au cours de la saison des pluies 1984.*

BIBLIOGRAHIE

AASE (J. K.) et SIDDOWAY (F. H.), 1981. - Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. *Rem. Sens.Env.*, 11 : 267-277.

ASRAR (G.), FUCHS (M.), KANEMASU (E. T.) et HATFIELD (J. L.), 1984. - Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index fromspectral reflectance in wheat. *Agron. Journ.*, 76 : 300-307.

ASSAD (E.), 1984. - Télédétection et bilan hydrique : application à l'évapotranspiration régionale. Mémoire DEA. Science de l'Eau et Aménagement. USTL Montpellier, 57 p., *multigr.*

ASSAD (E.), 1987. - Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne : cas du Sénégal.Thèse de doctorat, USTL Montpellier, 258 p., *multigr.*

ASSAD (E.), SEGUIN (B.), KERR (Y.), FRETEAUD (J.-P.) et LAGOUARDE (J.-P.), 1986. - Approche quantitative de la pluviométrie au Sénégal àl'aide d'images infrarouge thermique du satellite Meteosat. *Veille Clim. Sat.*, 13 : 21-30.

BUDYKO (M. I.), 1974. - Atlas du bilan thermique de la terre. Gidrometeoizdat, Leningrad.

CARN (M.), DAGORNE (B.), GUILLOT (B.) et LAHUEC (J.-P.), 1987. - Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période de mai à septembre 1987. *Veille Clim. Sat.*, 20 : 26-31.

CHOISNEL (E.), 1985. - Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. *In* : «Les besoins en eau des cultures». Conf. CCID Paris, Sept. 1984. INRA, Versailles.

COCHEMÉ (J.) et FRANQUIN (P.), 1967. - An agroclimatology survey of a semi-arid area in Africa South of Sahara. OMM, Genève, *Note technique* n° 86, 136 p.

DANCETTE (C.), 1976. - Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. *Agron. trop.*, 31 : 281-338.

DANCETTE (C.), 1983. - Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. trop.*, 38 : 281-294.

FOREST (F.), 1982. - Évolution, de la pluviométrie en zone soudano-sahélienne au cours de la période 1940-1979. Conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales au Sénégal. *Agron. trop.*, 37 : 17-23.

FRANQUIN (C.) et FOREST (F.), 1977. - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. trop.*, 32 : 7-11.

GOSSE (G.), VARLET-GRANCHER (C.), BONHOMME (R.), CHARTIER (M.), ALLIRAND (J.-M.) et LEMAIRE (G.), 1986. - Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 : 47-57.

HATFIELD (J. L.), KANEMASU (E. T.), ASRAR (G.), JACKSON (R. D.), PINTER (P. J.), REGINATO (R. J.) et IDSO (S. B.), 1984. - Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. Int. *Journ. Rem. Sens.*, 6 : 167-177.

IMBERNON (J.), ASSAD (E.), GUINOT (B.) et DAGORNE (D.), 1987. - Évaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique Meteosat (Sénégal) en 1986. *Veille Clim. Sat.*, 16 : 49-59.

JACKSON (R. D.), REGINATO (R. J.) et IDSO (S. B.), 1977. - Wheat canopy temperatures : a practical tool for evaluating water requirements. *Water Res. Res.*, 13 : 651-656.

JUSTICE (C. I.), TOWNSHEND (J. R. G.), HOLBEN (B. N.) et TUCKER (C. J.), 1985. - Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 6 : 1271-1318.

KERR (Y.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J.-P.), LAGOUARDE (J.-P.) et SEGUIN (B.), 1987. - Estimation of evapotranspiration in the Sahelian zone by use of Meteosat and Noaa/AVHRR data, communication présentée au xxvie COSPAR, Toulouse, juillet 1986, Symposium n° 3, *Adv. Space Res.*, 7 : 161-164.

KERR (Y.), IMBERNON (J.), DEDIEU (G.), HAUTECOEUR (D.), LAGOUARDE (J.-P.) et SEGUIN (B.), 1989. - Noaa-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *Int. Journ. Rem. Sens.* vol. X, n° 4-5 : 847-854.

KIMES (D. S.), MARKHAM (B. L.), TUCKER (J. C.) et MC MURTREY III (E.) Jr, 1981. - Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. *Rem. Sens. Env.*, 11 : 401-411.

KOLLENKARK (J. C.), DAUGHTRY (C. S. T.), BAUER (M. E.) et HOUSLEY (T. L.), 1982. - Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. *Agron. Journ.*, 74 : 751-758 .

KUMAR (M.) et MONTEITH (J. L.), 1982. - Remote sensing of crop growth. *In* : «Plant and the daylight spectrum», Academic Press, London : 133-147.

LIETH (H.), 1975. - Primary productivity of the major vegetation units of the world, in Primary productivity of the biosphere. *Springer Verg.*, Berlin : 203-217.

MONTEITH (J. L.), 1977. - Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, B, 281 : 277-294.

NÈGRE (T.), IMBERNON (J.), GUINOT (J.-P.) et CARN (M.), 1987. - Estimation de la pluviométrie 1984, 1985, 1986 par cumul des synthèses thermiques Meteosat. *Veille Clim. Sat.*, 20 : 62-70.

POUYAUD (B.), 1985. - Contribution à l'évaluation de l'évaporation des nappes d'eau libre en climat tropical sec. Thèse Doctorat d'État, Université de Paris-Sud, 254 p., *multigr.*

RIOU (Ch.), 1972. - Étude de l'évaporation en Afrique Centrale. Contribution à la connaissance des climats. Thèse Doctorat d'État, Paris, 211 p.

SEGUIN (B.), 1984. - Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'IR thermique. *In* C.R. du 2e Coll. int. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, Sept. 1983, Inra, Versailles : 427-447.

SEGUIN (B.), 1986. - On the relationship between NDVI and global productivity. *In* Proc. ISLSCP Conference, Rome, Dec. 1985, ESA, Paris : 299.

SEGUIN (B.), BRUNET (Y.) et PERRIER (A.), 1982a. - Estimation of evaporation : a review of existing methods and recent developments. EGS Symposium on Evaporation, Leads (Gr. Br.). Août 1982.

SEGUIN (B.), BAELZ (S.), MONGET (J.-M.) et PETIT (V.), 1982b. - Utilisation de la thermographie infrarouge pour l'estimation de l'évaporation régionale. *Agronomie*, 2 : 7-16.

SEGUIN (B.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J.-P.), KERR (Y.) et LAGOUARDE (J.P.), 1987. - Water balance monitoring in sahelian regions with thermal IR and vegetation index data from meteorological satellites. *In* : Proceedings of the 20th Symposium on the environment, édités par ERIM. Ann. Arbor., Michigan. : 993-1003.

SEGUIN (B.), ASSAD (E.), FRETEAUD (J. - P.), IMBERNON (J.), KERR (Y.) et LAGOUARDE (J.-P.), 1989.- Use of meteorological satellites for water balance monitoring in sahelian regions. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 10 : 1101-1117.

SEGUIN (B.) et ITIER (B.), 1983. - Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int.Journ. Rem. Sens.*, 5 : 371-383.

SEGUIN (G.), MANDEVILLE (J.-C.), KERR (Y.) et GUINOT (J.-P.), 1986. - A proposed methodology for daily ET mapping using IR satellite imagery. *In* Proc. ASAE Coll. Advances in evapotranspiration. Chicago, dec. 1985 : 385-392.

SELLERS (P. J.), 1985. - Canopy reflectance photosynthesis and transpiration. *Int. Journ. Rem. Sens.*, 6 : 1335-1372.

TUCKER (C. J.), HOLBEN (B. H.), ELGIN (J. H.), et MC MURTREY III (J. E.),1981. - Remote sensing of total dry matter accumulation in winther wheat. *Rem. Sens. Env.*, 11 : 171-190.

TUCKER (C. J.), TOWNSHEND (J. R. G.) et GOFF (T. E.), 1985. - African land-cover classification using satellite data. Science, 227 : 369-375.

TURC (L.), 1954. - Calcul du bilan de l'eau, évaluation en fonction des précipitations et des températures. *In* : Publ. n° 38, Assemblée deRome, t. III, AIHS, Paris : 188-202.

VIDAL (A.), KERR (Y.), LAGOUARDE (J.- P.) et SEGUIN (B.), 1986. - Télédétection et bilan hydrique : utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite Noaa-AVHRR. *Agric. For. Meteorol.*, 29 : 155-175.

WIEGAND (C. L.) et RICHARDSON (A. J.), 1984. - Leaf area, light interception and yield estimation from spectral component analysis. *Agron. Journ.*, 76 : 543-549.

Marie-Françoise COUREL

Albédo et pluviométrie dans le Sahel

INTRODUCTION

L'albédo de surface, qui correspond à la réflectance sur l'ensemble du domaine spectral du rayonnement solaire, permet de caractériser les surfaces en fonction de l'énergie qu'elles réfléchissent. Ce paramètre climatique, lié aux propriétés physiques et à l'état des surfaces, est mesurable par télédétection satellitaire. L'utilisation de différents satellites, qui enregistrent à des échelles diverses les signaux électromagnétiques émis par les objets terrestres, permet, après traitement et normalisation des données, de mesurer et de surveiller les modifications de réflectance des sols.

À partir des données enregistrées par les satellites Landsat ou Meteosat, les mesures de l'albédo de surface des régions sahéliennes ont permis de mettre en évidence les changements survenus sur l'ensemble de la région entre 1972 et 1982 (COUREL, 1985).

RELATION ENTRE ALBÉDO ET PLUVIOMÉTRIE : L'HYPOTHÈSE DE CHARNEY

Dans les régions semi-arides, l'accroissement de la réflectivité des surfaces, la plupart du temps, est la marque de l'érosion et de la dégradation du milieu.

Le physicien CHARNEY (1975 ; *et al.*, 1975, 1977) a voulu expliquer l'apparition et le maintien de la sécheresse dans le Sahel par l'altération de l'albédo de surface. D'après lui, les activités agricoles et pastorales dans le Sahel ont entraîné la destruction de la végétation et elles ont provoqué ainsi un accroissement de la réflectivité des sols.

L'augmentation de l'albédo de surface entraîne une perte radiative nette, qui est compensée par un accroissement de la subsidence de l'air. Cette forte subsidence réduit d'autant les phénomènes convectifs susceptibles d'engendrer les pluies. La diminution, la rareté, voire l'absence de pluie, qui résultent de ce processus, conduisent à l'appauvrissement de la végétation restante, qui favorise et entretient alors l'effet positif de rétroaction. Ce mécanisme a été mis en évidence à partir de simulations réalisées dans le modèle de circulation générale de l'atmosphère du *Goddard Institute for Space Studies* (Giss) (CHARNEY, 1975 ; CHARNEY *et al.* 1977). La valeur initiale de l'albédo, fixée à 14 %, a été portée à 35 % sur la région sahélienne. Cette augmentation arbitraire de 20 % entraîne dans le modèle une réduction significative des précipitations de l'ordre de 45 % sur le Sahel. Les expériences de simulation, menées par la suite par différentes équipes (CHERVIN, 1979 ; SUD et FENESSY, 1982 ; PICON, 1983), confirment les résultats qualitatifs obtenus par CHARNEY.

À partir de ces résultats théoriques, l'auteur n'hésite pas à désigner les activités humaines comme le facteur déterminant de la sécheresse au Sahel.

Plusieurs questions se posent alors :

- l'albédo du Sahel est-il réellement de 14 % et celui des régions sahariennes de 35 % ?
- la dénudation des sols qui résulte des pratiques culturales a-t-elle effectivement provoqué une augmentation de 20 % de la réflectance des sols dans le Sahel ?
- la modification arbitraire d'un seul paramètre, tel que l'albédo, sans faire varier parallèlement d'autres paramètres comme le bilan hydrique au sol, est-elle réaliste ?

Les travaux présentés dans cet article ont pour but de répondre à tout ou partie de ces questions, en s'appuyant sur des données qui portent sur une période de dix années.

LES MESURES D'ALBÉDO À PARTIR DES DONNÉES SATELLITAIRES

Elles portent sur la période qui s'étend de 1967 à 1984.

Nous avons utilisé pour la période 1967-1974 les valeurs établies par NORTON *et al.* (1979), à partir des enregistrements du satellite météorologique ATS 3 sur le Sahel et sur le Sahara.

Nous avons traité et analysé les données Landsat 1, 2 et 3 entre 1972 et 1984 (COUREL, 1984), sur 4 régions caractéristiques du domaine sahélien : le Ferlo au Sénégal, le Gondo au Mali, l'Oudalan au Burkina Faso et la région du lac Faguibine au Mali (fig. 1).

Les données Meteosat traitées par KANDEL (1982) concernent la période qui va d'août 1978 à novembre 1979.

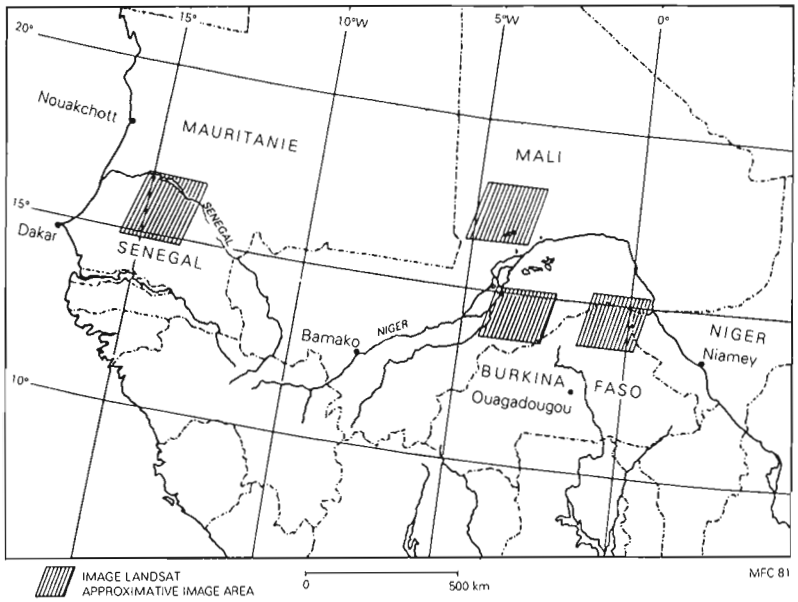


FIGURE. 1 - *Afrique de l'Ouest - Sahel.*

L'étalonnage des données des différents satellites a été vérifié sur le secteur stable que représente l'Aklé Awana au Mali, région constituée de sables blancs vifs (COUREL, 1984). Ces 3 séries de mesures nous ont permis de montrer que les valeurs d'albédo obtenues à partir de satellites différents étaient cohérentes, et de vérifier que l'albédo de l'Aklé Awana ne variait pas dans le temps (fig. 2).

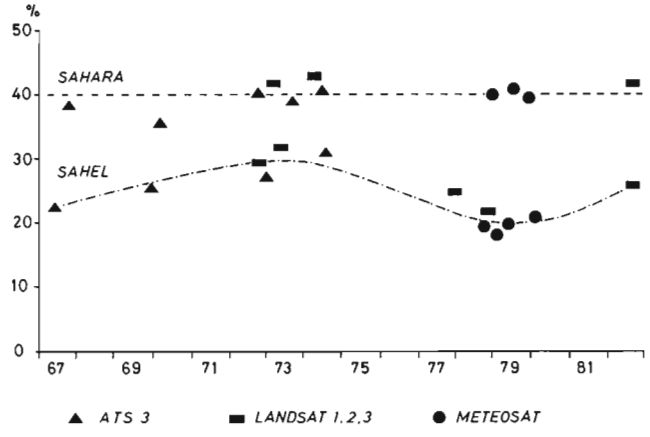


FIGURE. 2 - *Variations interannuelles de l'albédo.*

RÉSULTATS

Les principaux résultats de cette étude montrent que :

- l'albédo du Sahara avoisine les 50 % dans ses secteurs les plus brillants ;
- l'albédo moyen, pour la région située entre 18° et 23° de latitude nord et entre 0° et 10° de longitude ouest, est de 42 ± 4 % (COUREL *et al.*, 1984). Ces valeurs sont plus élevées que celles utilisées dans le modèle (35 %) et que celles attribuées aux secteurs désertiques (BUDYKO, 1969 ; HUMMEL et RECK, 1979).

Elles concordent avec celles qui ont été relevées sur d'autres secteurs désertiques, dans le Sinaï, au Mexique et en Arabie (OTTERMAN et FRASER, 1976 ; OTTERMAN, 1981 ; ROBINOVE *et al.*, 1981, SMITH et WONDER HAAR, 1983).

Pour ce qui est des régions sahéliennes, les travaux de Norton établissent que l'albédo passe de 20 %, en 1967, à 30 %, en 1974, valeurs confirmées par les mesures Landsat en 1974 sur les mêmes régions.

Les données Landsat et Meteosat indiquent, pour l'ensemble du Sahel occidental, une diminution de l'ordre de 10 %, entre 1974 et 1979, et une nette augmentation à partir de 1982 (fig. 2).

CAUSES DE VARIATION DE L'ALBÉDO DANS LE SAHEL

Dans le Sahel, les variations interannuelles de l'albédo sont conditionnées par les changements d'état de la steppe arbustive. Le tapis herbacé, élément caractéristique de cette formation végétale, est composé essentiellement d'espèces annuelles à cycle court : 70 à 90 jours. Leur production est optimale lorsque les pluies assurent les ressources hydriques journalières indispensables (BILLE et POUPON, 1974 ; HIERNAUX, 1984) :

- d'une part à la germination des graines et à l'installation des plantules (3 $mm.j^{-1}$) ;
- d'autre part à la croissance complète de la plante (5 $mm.j^{-1}$).

La régénération et la productivité du tapis herbacé dépendent donc davantage de la distribution que de l'abondance totale des pluies estivales. Citons le cas de la région de Linguère-Labgar dans le Ferlo méridional. En 1981, les valeurs mesurées de la biomasse et de l'albédo ont été respectivement de 1 100 kg.MS^{-1}.ha^{-1} et de 20 % ; en 1984, elles passaient à 150 kg.MS^{-1}.ha^{-1} et à plus de 30 %, alors que la station de Linguère a enregistré des hauteurs de pluies identiques ces années-là : 376,7 et 373,7 mm.

Si, en 1981, la distribution des pluies fut assez bonne, elle fut très mauvaise en 1984, comme le montrent le tableau I et la figure 3.

Tableau I - Distribution des pluies en 1981 et 1984 à Linguère (Sénégal)

Année	Durée moyenne des périodes sèches entre deux pluies*	Disponibilités hydriques journalières moyennes
1981	3,9 j	4,8 mm. j^{-1}
1984	6,6 j	2,9 mm. j^{-1}

* Pendant la saison des pluies

Les germinations avortées et la diminution de la taille des végétaux, induites par des interruptions prolongées des pluies en 1984, expliquent la très faible productivité de la strate herbacée pour le Ferlo.

En 1985, la situation est différente. La distribution correcte de la pluviométrie a permis la croissance des herbacées jusqu'en fin de cycle. On a pu observer des productions supérieures à 1 500 kg.MS^{-1}.ha^{-1} sur des secteurs restés totalement nus en 1984, d'après les observations que nous avons effectuées sur le terrain en octobre 1985 au Mali.

Il apparaît donc clairement qu'il ne peut y avoir de relation simple entre biomasse et total pluviométrique, ce qui implique également qu'il ne puisse y avoir une relation simple entre total pluviométrique et albédo (fig. 4).

Pour compléter ces observations globales, le suivi de l'évolution du couvert végétal du Sahel malien a été effectué, sur l'ensemble de la saison des pluies 1986, à partir des images Noaa-AVHRR et de l'estimation de l'indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) (FOREST, 1984) ; l'ISBE a été calculé à l'aide d'un modèle agrométéorologique qui fonctionne avec les précipitations quotidiennes relevées par les stations sahéliennes (COUREL *et al.*, 1988).

La figure 5 présente la relation entre l'indice de végétation, calculé à partir des images Noaa, et l'ISBE d'une jachère d'herbe. Les cas présentés concernent des secteurs proches des stations de Gossi, Hombori, Gao, Diré et Koro. On constate dans tous les cas, une relation étroite entre l'indice de végétation et l'ISBE.

Pour Gao, Diré et Gossi, la satisfaction des besoins en eau n'est assurée que sur de très courtes périodes. L'indice de végétation réagit avec un décalage de quelques jours, nécessaires à l'établissement et à la croissance de la végétation. Il n'atteint jamais la valeur de 0,1, ce qui est en bon accord avec les mesures de biomasse sur secteur dunaire dans la région de Gossi (entre 20 et 461 kg.ha^{-1}, d'après les données fournies par le Centre international pour l'élevage en Afrique (Cipea).

Pour la station de Koro, les besoins en eau sont satisfaits sur l'ensemble de la saison des pluies. La valeur de l'indice de végétation, déjà élevée au début du mois de juillet, en raison des fortes précipitations relevées en juin, augmente jusqu'à la fin juillet, puis se maintient à un niveau élevé (0,3) pendant près de trente jours. Après le 20 août, la décroissance de l'indice marque le début du dessèchement de la végétation herbacée.

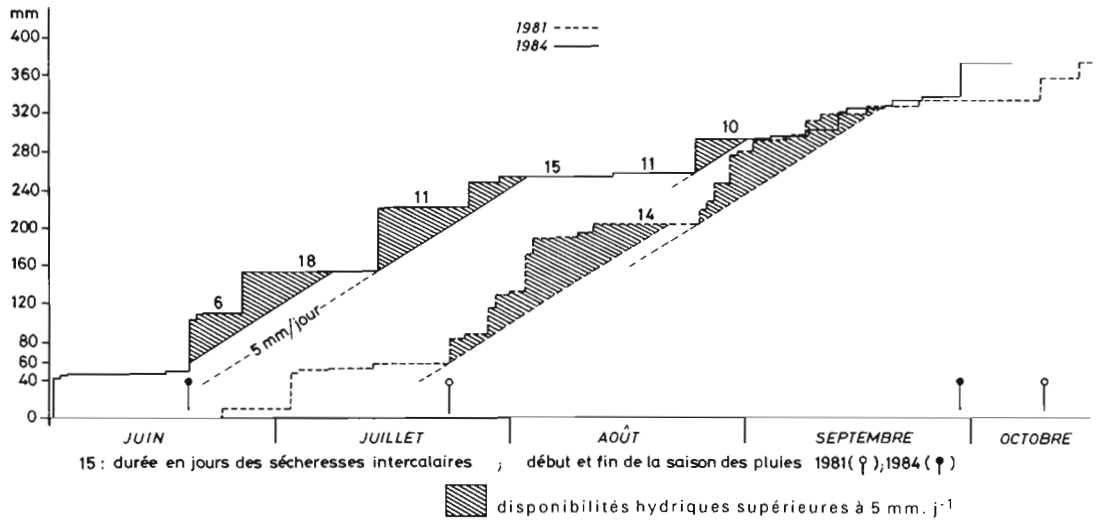
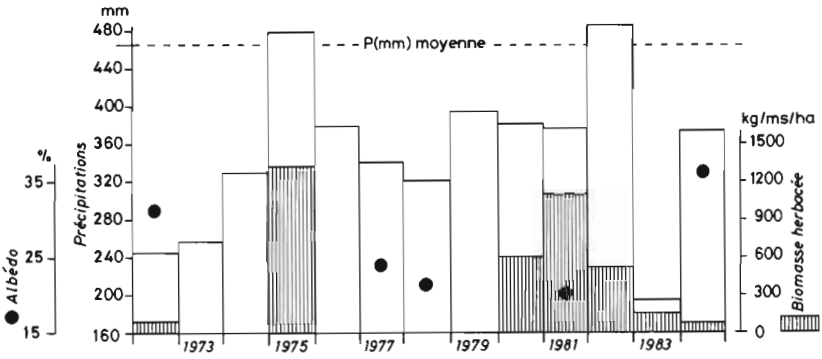


FIGURE. 3 - *Pluies journalières cumulées des saisons des pluies 1981 et 1984 - Station de Linguère (Ferlo) Sénégal.*



NB : seules les valeurs mesurées d'albédo et de biomasse sont ici portées.

FIGURE. 4 - *Variations interannuelles des précipitations, de la biomasse herbacée et de l'albédo dans le Ferlo (Sénégal). Station météorologique de référence : Linguère.*

Sur cette région, les données de terrain indiquent une productivité importante en juillet, qui va de 24 à 30 kg MS.ha^{-1}.j^{-1}. La biomasse herbacée disponible en fin de saison des pluies varie entre 1 892 et 2 563 kg MS.ha^{-1}.

Ainsi, à partir de ces différents résultats, il apparaît que l'établissement d'une relation entre albédo de surface et pluviométrie dans le Sahel doit nécessairement passer par l'analyse de la distribution de l'eau qui préside à l'installation et à la croissance de la végétation herbacée.

DISCUSSION

La diminution de l'albédo de surface sur l'ensemble du Sahel, constatée à la suite des très fortes valeurs atteintes en 1972 et en 1973, est en contradiction avec le mécanisme de rétroaction biogéophysique de CHARNEY. De même que les fortes valeurs de 1973 n'ont pas eu pour effet d'accentuer le déficit pluviométrique et la sécheresse, la diminution de l'albédo entre 1974 et 1979 n'a pas entraîné l'amélioration réelle de la pluviométrie, comme l'attestent les déficits très élevés et généralisés des années 1982 et 1983.

Toutes les modifications de l'albédo mesurées dépassent rarement 10 % et n'atteignent jamais 15 %. Ces valeurs sont très inférieures aux changements imposés dans les modèles ; elles sont insuffisantes pour sensibiliser le modèle au niveau de la circulation générale.

L'expérience menée par HENDERSON-SELLERS et GORNITZ (1984), sur les impacts climatiques éventuels des transformations du couvert végétal, a montré que le remplacement de la forêt tropicale humide brésilienne par un couvert herbacé et cultivé, sur une surface de 4,94 x 10 6 km^2, a entraîné une augmentation de l'albédo de surface de 6% et, localement, l'altération de plusieurs paramètres climatiques, mais aucun impact majeur sur la circulation régionale ou générale.

GORNITZ (1985), dans son étude sur les changements dus à des actions anthropiques sur la végétation en Afrique occidentale durant le siècle dernier, montre qu'elles ont entraîné une augmentation de l'albédo de surface de 0,4 % sur cent ans, sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. En supposant une désertification totale des régions

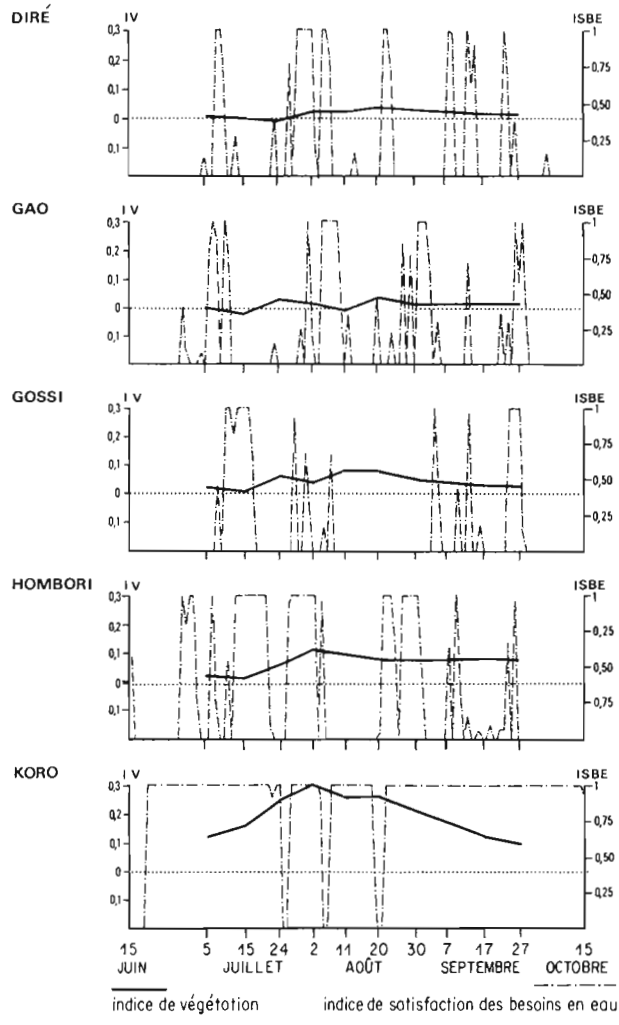


FIGURE. 5 - *Relation entre l'indice de végétation (IV) et l'indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) pour quelques stations sahéliennes.*

sahéliennes, les changements d'albédo atteindraient un maximum de 4,3 %. Ces résultats sont largement inférieurs aux variations interannuelles dues à des causes naturelles (COUREL, 1984). Par ailleurs, au cours de cette décennie, dans des secteurs totalement protégés des actions humaines et dans des secteurs où l'impact des populations est négligeable, on a pu observer une modification de l'organisation de la végétation qui montre une adaptation à des conditions hydriques caractéristiques d'une aridité accrue (COUREL, 1985b).

Il faut noter également que la paramétrisation de l'humidité du sol, dans l'expérience de CHARNEY, est loin de la réalité et simule une évaporation irréaliste sur l'ensemble du Sahel. ROWNTREE (1982) a mis en évidence la complexité du paramètre «sol» et il a

montré, lorsqu'on démarre l'expérience avec un sol sec (ce qui est la réalité sahélienne), que l'on termine avec un sol sec, quelles que soient les variations imposées à l'albédo de surface. D'où la nécessité de coupler l'albédo et l'humidité du sol dans ces simulations.

Un dernier point de discussion sur l'hypothèse de CHARNEY porte sur l'analyse historique. Le mécanisme de rétroaction suggéré devrait induire une évolution progressive vers une pluviométrie de plus en plus faible. Or, les régions sahélo-soudaniennes ont connu, depuis le début de notre ère, une alternance irrégulière de phases plus humides ou plus sèches que la phase actuelle. Les régions de forêts du littoral du golfe du Bénin, dont l'exploitation est plus récente, ont connu une évolution identique. Compte tenu de ce que l'on sait de la circulation au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, ces fluctuations ne peuvent être attribuées qu'à la circulation atmosphérique et aux caractères variables de certains de ses éléments (jets intertropicaux, notamment).

À l'échelle géologique, et même si on réduit celle-ci aux quinze derniers millénaires, on sait que l'évolution climatique de l'espace saharo-sahélien a été marquée par :

- un aride très important entre 18 000 et 10 000 BP ;
- un pluvial entre 10 000 et 3 000 BP ;
- des épisodes pluviaux et des épisodes secs, de durée et d'intensité variables, qui se sont succédé de 3 000 BP à nos jours (CHAMARD, 1970 ; CHAMARD et MORIN, 1973 ; PETIT-MAIRE, 1982 ; DURAND et LANG, 1986).

Au moment de l'aride, le Méga-Sahara incluait le Sahel et ses limites coïncidaient avec l'isohyète moyen actuel 700 mm (TALBOT, 1984). Cette extension considérable des déserts peut-elle être attribuée à l'action de l'homme ?

Le pluvial a débuté aux environs de 10 000 BP ; la zone sahélienne s'est translatée vers le nord de près de 10° de latitude (sinon plus). Pendant ce pluvial, dans le Sahara des lacs, des groupes humains sédentaires pratiquaient la chasse, la pêche, la cueillette, mais aussi une agriculture et un élevage très extensif. Il est donc peu probable que les groupes néolithiques aient été à l'origine du Sahara actuel par la dégradation de leur environnement.

CONCLUSION

Les variations de l'albédo dans le Sahel sont déterminées par les modifications de la couverture herbacée dont la production dépend de la distribution des ressources hydriques au cours de la saison des pluies. C'est la raison pour laquelle il n'y a qu'une très mauvaise relation entre un total pluviométrique et une valeur d'albédo.

Nous savons que l'humidité, dans le Sahel comme sur l'ensemble de l'Afrique occidentale, est le fait de pluies imputables à l'advection d'air humide d'origine allochtone. Ceci explique pourquoi des déficits pluviométriques plus ou moins importants ont été observés, tant dans les régions sahéliennes que dans les régions de savane et de forêt.

Il apparaît clairement que les causes de ces sécheresses relèvent davantage d'anomalies de la circulation générale de l'atmosphère que de modifications ponctuelles de l'état des surfaces attribuées de façon abusive à l'homme.

M. - F. COUREL : *géographe*, Imageo/CNRS, LP 30, 191 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

Bibliographie

BILLE (J.-C.) et POUPON (H.), 1974. - La régénération de la strate herbacée. Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. *Rev. Écol. Appl.*, t. 28, n° 1 : 21-48.

BUDYKO (M. I.), 1969. - The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 21 : 611-619.

CHAMARD (Ph. C.), 1970. - Le bassin versant de la sebkha de Chemchane. Adrar de Mauritanie. Étude de géomorphologie. Thèse de doctorat de 3e Cycle, université de Dakar, 202 p., 2 cartes h. t., Dakar, 1970.

CHAMARD (Ph. C.) et MORIN (S.), 1973. - Grès calcaires et grès ferrugineux de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. *Trav. et Doc. Géogr. tropicale*, n° 8 : 1-27, a pl. phot., Talence.

CHARNEY (J. G.), 1975. - Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Quat. J. Roy, Meteor. Soc., 101 : 193-202.

CHARNEY (J. G.), SONE (P. H.) et QUIRT (W. J.), 1975. - Drought in the Sahara : a biogeophysical feedback mechanism. *Science* 187 : 434-435.

CHARNEY (J. Gk.), QUIRT (W. J.), CHOW SHU HSIEN et KORNEFIELD (J.), 1977. - A comparative study of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atm. Sc.*, vol., 34 : 1366-1385.

CHERVIN (R. M.), 1979. - Response of the NCAR General Circulation Model to changed land surface albedo. Report of the JOC Study Conference on Climate Model, vol. 1, *GARP Publications*, Serie n° 22.

COUREL (M.-F.), 1985a. - Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'État, Université Paris I, publiée par le Centre scientifique IBM France. Paris.

COUREL (M.-F.), 1985b. - La contraction des ligneux, adaptation de la végétation à la sécheresse récente. *Revue Photo-Interprétation*, n° 1, fasc. 2.

COUREL (M.-F.), CUQ (F.) et TOUNSI (I.), 1988. - Suivi de l'évolution des pâturages du Sahel malien. *Revue Mappemonde* n° 88-2.

COUREL (M.-F.) et KANDEL (R. S.), 1985. - Le Sahel est-il responsable de sa sécheresse ? *La Recherche*, n° 158, septembre 1984. vol. 15 : 1152-1154.

COUREL (M.-F.), KANDEL (R. S.) et RASOOL (S. I.), 1984. - Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, vol. 307, n° 5951, 9-15 Feb.

DURAND (A.) et LANG (J.), 1986. - Approche critique des méthodes de reconstitution paléoclimatique : le Sahel nigéro-tchadien depuis 40 000 ans. *Bull. Soc. Géol.* France, (8), t. II, n° 2 : 267-278, Paris.

FOREST (F.), 1984. - Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Rapport Cirad, Montpellier, *multigr.*

GORNITZ (V.), 1985. - A survey of anthropogenic vegetation changes in West Africa during the last Century-Climatic implications. *Climatic Change* 7 (1985) : 285-325. 0165-0009/85/15.

HENDERSON-SELLERS (A.) et GORNITZ (V.), 1984. - Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic Change* 6 (1984), 231-257.

HIERNAUX (P.), 1984. - Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Premiers résultats acquis pour le Sahel malien. Doc du Programme n° AZ98, CIPEA, Bamako.

HUMMEL (J. R.) et RECK (R. A.), 1979. - A global surface albedo model. *J. Appl. Meteor.*, 18 : 239-253.

KANDEL (R.), 1982. - Satellite observation of the Earth radiation budjet. International Symposium of the Deutsche Meteorologische Gesellschaft.

NORTON (C. C.), MOSHER (F. R.) et HINTON (B.), 1979. - An investigation of surface albedo variations during the recent Sahel drought. *J. Appl. Meteor.*, vol., 18 : 1252-1262.

OTTERMAN (J.), 1981. - Satellite and field studies of man's impact on the surface in arid region. *Tellus*, 33 : 68-77

OTTERMAN (J.) et FRASER (R.S.), 1976. - Earth atmosphere system and surface reflectivities in arid regions from Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 5 : 247-266.

PETIT-MAIRE (N.), 1982. - Le Shati, lac pléistocène du Fezzan. Publ. CNRS, 118 p., Marseille.

PICON (L.), - 1983. Étude de l'influence de l'albédo du sol dans les phénomènes de désertification au Sahel à l'aide du modèle de circulation générale du LMD. Thèse de doctorat de 3e Cycle, université Paris-VII, 78 p., 67 fig., Paris.

ROBINOVE (C. J.), CHAVEZ (P. S) Jr, GERHING (D.) et HOLGREN (R.), 1981. - Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, vol. II : 133-156.

ROWNTREE (P. R.), 1982. - Numerical experiments relevant to the Sahel drought. Met. Off. 20, *Technical note* II/178.

SMITH (E. A.) et WONDER HAAR (T. H.), 1983. - Satellite measurements and analysis of the radiation budget, cloudiness, and precipitation over Monex. 1st year final Report, NSF Grant ATM-8200808 1/04/1982-31/03/1983, Dept. of Atm. Sci., Colorado State University, Fort Collins.

SUD (Y.C.) et FENESSY (M.), 1982. - A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM. *J. of Climat.*, 2 : 105-125.

TALBOT (M. R.), 1984. - Late pleistocene rainfall and dune building in the Sahel. *Palaeoecology of Africa*, 16 : 203-214.

Richard ESCADAFAL

Télédétection de la surface des sols arides

Concept et applications

INTRODUCTION

Au cours de ces dernières années, la surface des sols a attiré l'intérêt d'un nombre croissant de spécialistes des milieux arides : géomorphologues, écologues, pédologues, hydrologues mais aussi physiciens. Cette émergence s'est accélérée en passant des études descriptives, de type inventaire, à des recherches sur le fonctionnement de ces milieux.

Ces travaux on été basés sur des études de terrain qui restent indispensables, mais les satellites observent aussi la surface des sols, et ceci de façon exhaustive et répétitive. À partir d'une synthèse récente (ESCADAFAL, 1989a), cet article tente de montrer l'intérêt de la télédétection de la surface des sols pour la connaissance et la gestion des milieux arides.

Surface des sols et infiltration

Dès 1973, BOURGES *et al.* soulignaient l'importance de la nature des matériaux de surface dans la genèse du ruissellement sur les bassins versants expérimentaux du sud de la Tunisie, travaux repris et confirmés par FLORET et PONTANIER (1982). Au sud du Sahara, c'est avec le développement des techniques de simulation de pluie que les recherches consacrées à l'effet de la surface du sol sur l'infiltration ont démarré. À partir de 1975, pédologues et hydrologues ont réalisé un grand nombre de mesures dans différents milieux de l'Afrique de l'Ouest. ALBERGEL *et al.* donnent un exemple d'expérimentation de ce type réalisé au Burkina Faso (*cf.* cet ouvrage : 123-130). L'utilisation du minisimulateur de pluie en Tunisie a permis également de détailler et d'étendre les résultats obtenus sur bassin versants expérimentaux (ESCADAFAL *et al.*, 1986).

L'ensemble des travaux réalisés dans les pays du Sahel a été très récemment présenté par CASENAVE et VALENTIN (1988), sous la forme d'un catalogue des propriétés hydrodynamiques des différents types de «croûtes» recensés dans cette partie de l'Afrique.

Si les applications hydrologiques sont les plus évidentes comme en témoigne ce dernier ouvrage, d'autres disciplines se sont intéressées à la surface des sols.

Surface des sols et diagnostic des milieux

L'impact défavorable de la dégradation de la surface des sols cultivés sous l'action de la pluie est bien connu des agronomes, la battance est souvent un obstacle à la germination et une cause d'érosion. Les recherches phytoécologiques réalisées dans le

Sud tunisien ont souligné l'existence de phénomènes de même type dans les parcours naturels. Ainsi, l'évolution des friches postculturales est très différente selon que la surface est battante ou au contraire sableuse (TELAHIGUE *et al.*, 1987). Une expérimentation fine réalisée en station a permis de préciser les mécanismes physicohydriques en jeu (ESCADAFAL, 1989a). Les potentialités pastorales et, en particulier, les possibilités de régénération peuvent être ainsi assez bien estimées par l'observation de la surface des sols.

D'une façon plus générale, l'aspect de la surface du sol est un élément de diagnostic, pas nécessairement explicite, de l'état des milieux arides et des processus en cours ; la nature du sol y transparaît le plus souvent, les érosions hydrique et éolienne y laissent différents types d'empreintes et l'activité biologique s'y manifeste.

Approche globale

Pour se dégager du point de vue réducteur de l'une ou l'autre discipline intéressée par la surface des sols, nous proposons de l'aborder sous son aspect d'interface.

Dans les milieux suffisamment chauds et arrosés, l'interface entre le sol et l'atmosphère est composé d'un écran végétal naturel ou cultivé (et de la faune associée) qui régule les flux et joue un rôle tampon.

Lorsque la végétation est rare pour des raisons bioclimatiques, comme dans le cas des régions arides, qui nous intéresse ici, le sol est directement exposé à l'action de l'atmosphère. L'interface entre ces 2 compartiments des écosystèmes est alors réduit à la surface du sol. Sa composition et son organisation sont le résultat de l'interaction entre le sol et les flux d'énergie, d'eau, de solutés et de matières solides qui y circulent.

L'effet tampon est pratiquement nul et ces flux souvent concentrés dans le temps et dans l'espace, marquent profondément la surface. L'étude de ces flux nécessite la caractérisation de cet interface. Son observation est un excellent moyen d'obtenir des informations sur la nature et le fonctionnement de ces milieux.

OBSERVATION DE LA SURFACE

Tout comme ceux qui s'y rattachent, le terme «surface du sol» est assez trivial pour nourrir le sentiment que l'objet désigné est bien précisé. Depuis les premières recherches sur ce sujet (ESCADAFAL, 1981a et b), l'expérience acquise montre que ce n'est pas le cas ; cela nous amène à proposer un certain nombre de définitions.

Définitions

Au sens mathématique du terme, une surface est un objet bidimensionnel. Les surfaces qui nous préoccupent ici possèdent bel et bien une troisième dimension, leur épaisseur. Ce sont donc des volumes.

LA SURFACE DU SOL : UN VOLUME DE TRANSITION ENTRE L'ATMOSPHÈRE ET LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Ce volume, qui est constitué de composés minéraux et organiques et d'êtres vivants, comprend la partie superficielle de la couverture pédologique directement en contact avec l'atmosphère et dont l'organisation et/ou la composition diffèrent de celles du matériau sous-jacent.

Dans cette définition large, la surface du sol comprend également les végétaux supérieurs, peu abondants dans les régions arides ; la surface du sol est donc généralement une strate peu épaisse, voire réduite à une pellicule, qui peut être discontinue et où dominent les éléments du sol.

L'ÉTAT DE SURFACE : LA COMPOSITION ET L'ORGANISATION DE LA SURFACE DU SOL À UN INSTANT DONNÉ

L'ÉTAT DE SURFACE ÉLÉMENTAIRE (ESE) : PLAGE D'UN ÉTAT DE SURFACE QUI PEUT ETRE INDIVIDUALISÉE ET CARACTÉRISÉE AU NIVEAU MACROSCOPIQUE.

Exemples d'ESE : épandage de gravillons quartzeux, sol nu à fentes de dessication, butte sableuse à végétation annuelle, microdépression à croûte squameuse, etc. Dans le cas le plus simple, un état de surface peut n'être composé que d'un seul ESE.

Méthodologie

Pour concrétiser cette approche globale nous avons développé une méthode de description qui permet d'appréhender la surface du sol dans sa totalité et d'en caractériser l'état (ESCADAFAL, 1981a). La cartographie de l'aptitude des milieux au ruissellement, proposée par VALENTIN (1986), s'y apparente, en se limitant aux variables d'intérêt hydrologique.

Un échantillon de surface est décrit en inventoriant les différents ESE qui le composent (fig. 1). Si nécessaire, le plan de l'échantillon est levé pour caractériser la morphologie (microrelief), l'abondance et la distribution de chaque type d'ESE. Chacun d'eux est ensuite décrit séparément en examinant toutes les variables de sol et de végétation pertinentes, et en ayant recours aux glossaires de vocabulaire normalisé (ACCT, 1978 ; AUBERT et GIRARD, 1978 ; GODRON *et al.*, 1978).

L'objectif de cette technique est d'arriver à suffisamment d'objectivité et d'exhaustivité afin de permettre l'utilisation des données de surface pour des thématiques différentes. Cela nécessite une grande rigueur, une séparation sévère entre les informations brutes et les données d'une part, et les informations traitées par l'observateur ou les interprétations d'autre part. Ainsi, l'information brute «dimension, densité et orientation des ravines» sera opposée à l'information traitée «intensité de l'érosion». Cette approche globale est facilitée par la prise de photographies en visée nadirale à quelques mètres au-dessus de l'échantillon étudié (fig. 1).

Selon les objectifs de l'étude, certains points particuliers pourront être plus détaillés. Dans une étude des propriétés hydrodynamiques, par exemple, la description des microhorizons, observables dans de nombreux types d'ESE, se révèle indispensable. L'observation macroscopique de ces différenciations verticales devra être souvent complétée d'une étude micromorphologique (VALENTIN, 1985 ; ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987).

Comme dans toute étude de terrain, la taille et le nombre des échantillons doivent être adaptés à la complexité du milieu. Si l'estimation de la taille des «motifs» qui forment la surface du sol (assemblages répétitifs d'ESE) est possible visuellement, elle peut cependant être précisée par des critères statistiques. La méthode des lignes-intercepts permet de suivre la fluctuation du nombre et de la proportion relative des ESE d'un échantillon de surface en fonction du nombre de mesures. Une fois ces paramètres stabilisés, on peut estimer détenir un échantillon représentatif (ESCADAFAL, 1989a).

ISA07

Dans une étude au niveau d'un paysage, bien entendu, l'échantillonnage sera stratifié suivant les grands types d'états de surface (facilement différenciables sur les photographies aériennes et en circulant sur le terrain), mais aussi en relation avec l'organisation de la couverture pédologique.

Cette méthode, d'abord développée à partir de recherches menées en Tunisie (ESCADAFAL, 1981b), a été étendue depuis à la caractérisation de la surface de sols d'autres milieux, au sein du groupe de travail «télédétection de la surface des sols» dont POUGET et MULDERS (1988) ont rapporté les travaux.

CARACTÉRISATION PAR TÉLÉDÉTECTION

Grâce au développement de la télédétection civile, les satellites d'observation de la Terre fournissent régulièrement aux utilisateurs des mesures du rayonnement réfléchi ou émis par la surface des sols. Nous n'envisagerons ici que le cas des données à haute résolution spatiale, obtenues par les satellites Landsat et Spot, les seules qui permettent d'envisager une cartographie détaillée des états de surface.

Équipés de capteurs à balayage, ces satellites fournissent leurs mesures sous forme digitale, organisées en matrices géoréférencées (les images). Elles peuvent être facilement traitées par les moyens informatiques actuels et intégrées à d'autres données localisées : modèles de bassin versants, systèmes d'informations géographiques, etc.

Depuis 1972, date du lancement du premier satellite Landsat, ces images sont disponibles en nombre important, surtout sur les régions arides grâce à la faible fréquence de l'ennuagement. Facteur également favorable, le coût de ces données est de l'ordre de 1 franc par kilomètre carré et par image.

Principe

LES SATELLITES UTILISÉS

Les caractéristiques des satellites cités et des images qu'ils produisent sont largement détaillées dans la littérature (CASSANET, 1985 ; JOLY, 1985). Placés en orbite héliosynchrone, ils observent la même portion de la surface de la Terre, à la même heure solaire et selon le même angle de visée, tous les dix-huit jours, pour Landsat, et tous les vingt-six jours, pour Spot. Pour les latitudes non nulles, l'élévation solaire au moment de l'enregistrement de l'image varie donc avec les saisons.

LA NATURE DES DONNÉES

Les capteurs embarqués sur ces satellites réalisent un échantillonnage spatial, déterminé par leur champ de vision instantané. La taille de l'élément de surface, sur lequel la mesure est réalisée, détermine la résolution de l'image. Les capteurs fonctionnent

←

FIGURE.1 - *Exemple d'état de surface photographié en visée nadirale (le panonceau portant les références mesure 50 cm, le champ couvert est donc d'environ 5 x 7 m).*
À la surface de ce sol sableux profond du Sud tunisien, on reconnaît différents états de surface élémentaires (ESE) :
- ESE à sables fins : voile éolien au pied des touffes de végétation ;
- ESE à sables grossiers : ESE dominant ;
*- ESE végétation : les touffes d'*Arthrophytum schmittianum.

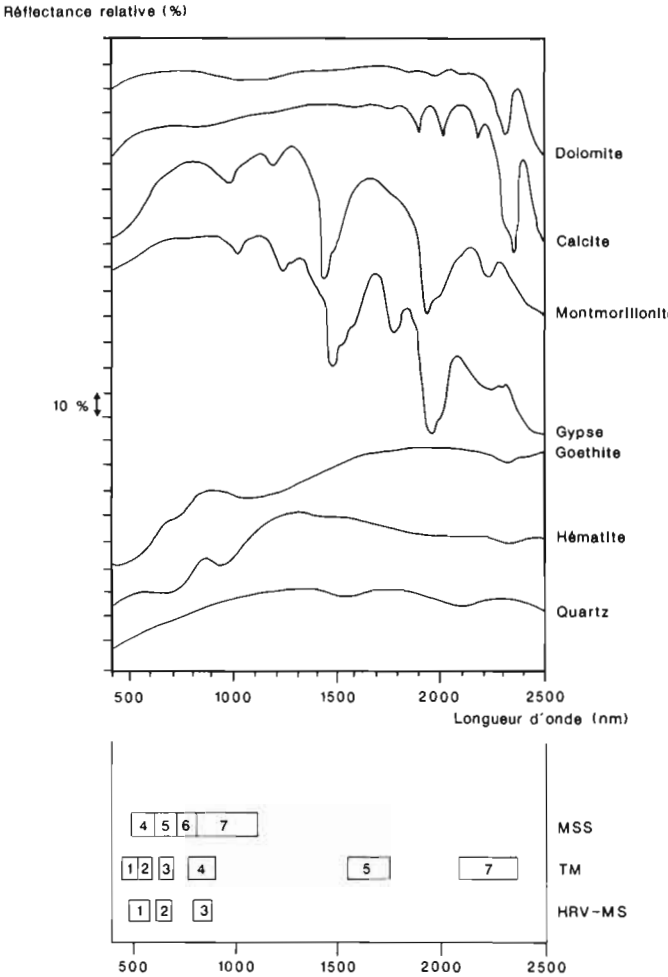


FIGURE 2 - *Propriétés spectrales de quelques minéraux fréquents dans les sols des régions arides et bandes spectrales des capteurs des satellites Landsat et spot.*
Les minéraux carbonatés et hydratés ont des propriétés spectrales remarquables dans l'infrarouge. Les canaux 5 et 7 du Thematic Mapper *(TM) sont donc particulièrement adaptés pour les discriminer. Inversement, l'hématite et la goethite se distinguent dans le domaine visible (la première colore les matériaux pédologiques en rouge, la seconde en jaune). Le HRV de Spot et le MSS ont des canaux dans ce domaine. Le* Thematic Mapper *en a trois et permet de télédétecter ces nuances de couleur avec précision (*ESCADAFAL, *1989b).*

simultanément dans différentes bandes spectrales, ou canaux, dont la largeur et le nombre conditionnent le champ d'utilisation de ces données (fig. 2). Dans le cas des capteurs de Landsat et de Spot, le domaine spectral couvert s'étend du visible à l'infrarouge de courte longueur d'onde ; ils ne mesurent donc que le rayonnement solaire réfléchi.

À chaque tache au sol, correspond une mesure de luminance par canal, représentée par un pixel dans l'image. Pour en permettre le traitement informatique, cette donnée est codée en comptes numériques sur 256 niveaux (8 bits). L'ensemble de ces valeurs est fourni à l'utilisateur sous la forme de fichiers sur bande magnétique. Si nécessaire cependant, il est possible de recalculer les valeurs absolues de luminance (en $W.m^{-2}.sr^{-1}$) à partir des comptes numériques, en utilisant les données de calibration et de gain de chaque canal du capteur.

En première approximation 2 facteurs principaux conditionnent les valeurs de luminance mesurées par le satellite :

- l'intensité et la composition du rayonnement réfléchi, et/ou diffusé, vers le capteur dépend de l'interaction du rayonnement solaire incident avec l'élément de la surface

terrestre visé. Tous les composants de la surface des sols interagissent avec le rayonnement, de façon variée selon leur nature et leur organisation. L'approche globale et le concept d'état de surface que nous avons développé, prennent ici toute leur puissance ; c'est le même objet que nous observons à la fois sur le terrain et par satellite ;

- au cours de son trajet vers la surface puis vers le capteur, le rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère dont la composition varie beaucoup au cours du temps. Si cette modification du signal est une source d'information pour les physiciens de l'atmosphère, en revanche elle est un bruit fluctuant qui gêne pour nos applications terrestres. Il faudra donc corriger ou minimiser ces effets atmosphériques pour obtenir l'information radiométrique sur les surfaces.

Utilisation des données

Les mesures fournies par les satellites ne peuvent être interprétées valablement qu'après avoir bien cerné leur nature. Dans notre approche, l'utilisation des données satellitaires est basée sur l'analyse et la modélisation de l'interaction rayonnement-surface.

La modélisation

Elle a pour objet d'établir les relations entre la réalité du terrain et les mesures satellitaires. Ce terme très général regroupe des concepts différents (Strahler *et al.*, 1986 ; Ferencz et Escadafal, 1989) :

- dans les modèles déterministes, les lois de la physique sont appliquées pour tenter de mettre en équations toutes les interactions produites entre le rayonnement et la matière qui compose la surface. Ces modèles très complets sont aussi très complexes, car basés sur des systèmes d'équations difficiles à résoudre qui nécessitent le recours à des techniques d'analyse numérique laborieuses. S'ils ont une vocation universelle, leurs possibilités d'applications pratiques demeurent très limitées ;

- les modèles empiriques les plus simples sont basés sur des relations statistiques, comme la corrélation linéaire entre une variable de terrain et les valeurs de luminance dans un canal ou une combinaison de canaux. La relation entre la densité de végétation verte et le rapport des données du canal infrarouge sur celles du canal visible en est un exemple très classique. Une relation simple de ce type est très intéressante pour le thématicien, car elle peut être utilisée dans l'autre sens, pour estimer la variable de terrain à partir des données satellitaires. On parle alors d'inversion du modèle. Cependant, mises en évidence sur une ou sur quelques images, ces relations peuvent n'être que conjoncturelles, et difficiles à généraliser.

Une catégorie intermédiaire est en plein développement, qui tente de concilier les avantages - rigueur et orientation thématique - des deux précédentes. Il s'agit des modèles heuristiques ou opérationnels, basés sur un certain nombre de lois physiques qui rendent compte des phénomènes essentiels, mais également sur un certain nombre d'approximations raisonnables dans les limites des objectifs assignés. Ces simplifications permettent l'inversion de ces modèles qui sont validés par l'expérimentation.

Les propriétés spectrales de la surface des sols

Les propriétés spectrales des sols ont été récemment revues par plusieurs auteurs (Mulders, 1987 ; Guyot, 1989 ; Escadafal, 1989c). À travers un bref aperçu, nous allons voir quelles connaissances sont utilisables pour la modélisation de l'interaction rayonnement-surface des sols.

Des mesures de laboratoire ont été réalisées sur de nombreux échantillons de minéraux et de roches par HUNT *et al.* (1971a et b). Seules, quelques équipes ont étudié des matériaux pédologiques (CONDIT, 1970 ; STONER *et al.*, 1980 ; COURAULT et GIRARD, 1988a). Les courbes de réflectance spectrale sont mesurées au spectrophotomètre sur de petits échantillons de sol tamisé. Elles expriment le pourcentage de rayonnement réfléchi (dans toutes les directions) en fonction de la longueur d'onde (le plus souvent dans la gamme 400 à 2 300 nm).

Tous les types de sols n'ont malheureusement pas encore été étudiés ; cependant, l'analyse statistique de ces courbes a montré que des teneurs croissantes en eau et en matière organique diminuent la réflectance, alors que c'est l'inverse pour le calcaire (BAUER *et al.*, 1980 ; GIRARD, 1983 ; COURAULT *et al.*, 1988). La présence d'oxyhydroxydes de fer se manifeste dans le domaine visible (fig. 2). Dans l'infrarouge de courte longueur d'onde, on observe des bandes d'absorption, plus ou moins larges suivant la densité et le type des groupements -OH, qui permettent de reconnaître les minéraux hydratés (gypse, par exemple) et les carbonates (KAHLE, 1984) (fig. 2).

Par ailleurs, en appliquant un ensemble de concepts colorimétriques à une série de 84 échantillons de sols très diversifiés, nous venons de modéliser la relation entre la couleur des sols et la réflectance spectrale dans le domaine visible (ESCADAFAL *et al.*, 1988a et b). Ce résultat permet d'envisager la télédétection de la couleur des sols (ESCADAFAL, 1989b) mais aussi de clarifier sensiblement l'interprétation de l'influence de la composition des sols sur la couleur.

Dans plusieurs cas particuliers, des modèles empiriques entre la réflectance et la teneur en certains composants ont été proposés. Dans un cas plus général, COURAULT et GIRARD (1988b) viennent de montrer que l'on peut estimer les classes de teneur en matière organique, en fer et en carbonates d'un échantillon de sol en utilisant des critères statistiques de distance par rapport à des références. Si un modèle déterministe de la réflectance de matériaux particulaires hétérogènes a été développé pour les météorites (EGAN et HILGEMAN, 1978), en revanche il reste encore à construire le modèle opérationnel applicable aux sols, qui prendrait en compte la texture et surtout l'organisation de matériaux pédologiques.

Les mesures de terrain permettent d'aborder les propriétés spectrales des autres composants de la surface (végétaux, en particulier). Les appareils les plus utilisés sont les radiomètres portables qui travaillent dans les bandes spectrales d'un capteur de satellite ; ils sont couramment utilisés pour l'étude des sols tempérés (KING, 1985 ; COURAULT et GIRARD, 1988a) ou tropicaux (MOUGENOT et ZANTE, 1986). Les spectroradiomètres, plus onéreux, réalisent un enregistrement continu le long du spectre. La grandeur mesurée est la réflectance bidirectionnelle, caractéristique d'un angle d'éclairement par le soleil et d'un angle de visée du capteur. Il faut remarquer que ces 2 directions peuvent également varier en fonction de l'orientation de la surface elle-même (effet de la topographie). Afin de pouvoir mettre en rapport ces mesures avec celles en provenance des satellites, il est important de se placer dans des conditions géométriques et météorologiques comparables à celles qui prévalent au moment de l'enregistrement de l'image.

Pour passer des valeurs de réflectance des différents composants à la réflectance d'une surface réelle, il faut connaître la contribution relative de chacun d'eux au recouvrement total (GRAETZ et GENTLE, 1982). Notre méthode de cartographie et de caractérisation des états de surface élémentaires répond parfaitement à cet objectif. Seule une description exhaustive et non interprétée de ce type est utilisable pour la modélisation.

Dans le cas des surfaces réelles, un autre facteur intervient de façon très importante : l'ombre créée par le microrelief, par la végétation, ou par les éléments grossiers, qui forment la rugosité.

Ainsi, le principal effet de la végétation des zones arides est de diminuer la réflectance des surfaces. L'augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge n'est observé que pour des peuplements de végétaux verts dont le taux de couverture dépasse 30 % environ (valeur variable suivant les conditions de visée).

Cet effet de la rugosité varie énormément en fonction de l'orientation de la surface, de l'azimut, de l'élévation solaire et de l'angle de visée. C'est l'origine de la différence fondamentale entre réflectances mesurées au laboratoire et sur le terrain. Comme il s'agit d'un phénomène purement géométrique, il est assez bien cerné par différents modèles de surfaces théoriques composées de parallélépipèdes droits (NORMAN *et al.*, 1985), de sphères qui simulent les agrégats (Cierniewski, 1987), d'ondulations qui simulent les sillons (COOPER et SMITH, 1985) ou de cylindres verticaux espacés qui simulent une végétation éparse (OTTERMANN *et al.*, 1987).

CONCLUSION : LES BASES DU TRAITEMENT DES DONNÉES-IMAGES

Traiter une image revient à utiliser une relation avec les données de terrain et donc à établir un modèle empirique qui lui est propre. Compte tenu de ce que nous venons de voir, la recherche de ce modèle peut s'appuyer sur des acquis sérieux et des modèles déterministes partiels pour la formulation des hypothèses sur l'interaction rayonnement-surface.

Pour tester ces hypothèses, il faut pouvoir prendre en compte l'ensemble des éléments du terrain qui jouent un rôle connu dans cette interaction. La méthode développée, qui décrit les états de surface élémentaires puis leur assemblage, permet de quantifier la composition moyenne de la surface visée par le radiomètre du satellite. Ces données de terrain collectées sur des zones test sont mises en relation avec les données images pour établir le modèle. Ce dernier est validé sur d'autres zones où sont contrôlés les résultats de son inversion.

Dans ce traitement applicable à une image, le bruit dû à l'atmosphère, qui est considéré comme constant et peu élevé, n'est pas pris en compte. Ceci n'est vrai que dans des conditions météorologiques favorables dont il faut bien s'assurer de l'existence avant de réaliser de telles approximations. En particulier, la présence d'aérosols désertiques dans l'atmosphère des régions arides est très fréquente. Cela se traduit par une perte de contraste de l'image, dont la mesure est précisément une méthode d'évaluation de la teneur en aérosols (TANRE *et al.*, 1987). Le choix des images les plus contrastées permet d'estimer que celles-ci sont peu altérées par la diffusion du rayonnement.

Pour aborder l'évolution temporelle de la réflectance des surfaces, par exemple pour suivre les variations de rugosité dues au développement de la végétation steppique, on ne peut plus considérer les effets atmosphériques comme constants, car ils fluctuent d'une date à l'autre. Pour réaliser des corrections absolues, il faut disposer de données sur l'état de l'atmosphère, au moment de l'enregistrement de l'image par le satellite. C'est rarement le cas et on doit alors se contenter d'estimations de ces paramètres (DESCHAMPS *et al.*, 1983). Dans la majorité de nos applications aux régions arides, la méthode la plus efficace est l'intercalibration relative des images par calage sur des surfaces invariantes d'une date à l'autre.

UN CAS CONCRET (Sud tunisien)

Le programme de cartographie mené par la Direction des sols de Tunisie, en vue de constituer un atlas des ressources en sols au 1/200 000, a été l'occasion de nos pre-

mières recherches sur la caractérisation de la surface des sols par télédétection. Dans la partie méridionale du pays, dont les sols étaient jusqu'alors peu connus, les images MSS Landsat sont apparues bien adaptées à ces objectifs (POUGET *et al.*, 1984).

La zone étudiée couvre 540 000 ha dans la région de Tataouine. Les précipitations y sont faibles (moyenne annuelle : 130 mm) et irrégulières ; la végétation, formée surtout de petits buissons ligneux bas, est très éparse.

Les paysages présentent un modelé, typique des régions arides, façonné dans des alternances de roches dures (calcaires et dolomies) et de roches plus tendres (calcaires marneux, marnes gypseuses, grès). Les reliefs tabulaires dominent les collines des piémonts, auxquelles succède un emboîtement de glacis polyphasés, de cônes de déjection et de formations alluviales. Les parties les plus basses sont occupées par des dépressions endoréiques souvent salées, les sebkhas.

Très marqués par la nature des matériaux et les pédogenèses anciennes, les sols sont en relation étroite avec les unités géomorphologiques (sols à croûte et dalle calcaire des collines et des glacis, sol gypseux sur marnes et dans les dépressions, sols profonds sur les terrasses, sols salés dans les sebkhas, etc.).

À l'exception de petites zones de collecte des eaux de ruissellement (jessours, dayas), l'homme exploite faiblement ces paysages ; leur aspect ne se modifie nettement qu'après de fortes pluies qui provoquent le développement rapide et éphémère de la végétation annuelle.

Sur le terrain, parallèlement à l'étude des fosses pédologiques, les principaux types de surface de sols ont été échantillonnés sur des zones test parfaitement repérées, et caractérisés suivant la méthode détaillée plus haut.

Les principaux types d'états de surfaces rencontrés sont les suivants : surfaces à blocs de roches calcaires, à fragments de croûte calcaire, limoneuses battantes, limoneuses à gravillons, sableuses à sables grossiers, sableuses à sables fins fixés, sableuses à dunes vives, calcaires à voile éolien sableux, à cailloux et blocs de roche gypseuse, gypseuses à croûte affleurante, gypseuses à voile éolien sableux, sableuses à végétation dense.

2 images MSS Landsat ont été choisies pour leur qualité (absence de nuages ou d'aérosols, fort contraste) ; la première a été prise à l'automne, le 29 septembre 1978, et la seconde, au printemps, le 4 avril 1981. Les 2 images ont été recalées entre elles, géométriquement et radiométriquement.

L'analyse statistique des données extraites des images dans chacun des canaux pour chaque zone test a montré que la corrélation entre les canaux 5 et 7 est très forte, supérieure à celle observée entre les canaux 4 et 5. Ce résultat, exactement à l'opposé de ce que l'on observe habituellement, peut être considéré comme une caractéristique des données MSS sur les régions arides. La végétation verte y est insuffisamment dense pour réfléchir le rayonnement proche infrarouge, à l'exception des jessours (*cf.* cet ouvrage, MTIMET : 387-400 ; BONVALLOT : 507-517) et des dayas sur l'image de printemps. Cette analyse des données images a montré que la somme des valeurs de luminance dans ces 2 canaux du domaine visible exprime la brillance (liée à la clarté de la couleur et à la rugosité), alors que leur quotient est corrélé avec la pureté (ou saturation) de la couleur de la surface. Il est à noter que ce modèle empirique de l'effet de la couleur a été depuis confirmé sur le plan théorique (ESCADAFAL, 1989b ; ESCADAFAL *et al.*, 1989). À partir de ces résultats, l'image de printemps a été classée en 16 états de surface en fonction de leur brillance et de leur couleur (ESCADAFAL et POUGET, 1986).

Depuis, nous avons étudié une image acquise par le *Thematic Mapper* (TM) de Landsat sur la même région. La meilleure définition géométrique et radiométrique, qui facilite considérablement le repérage, permet une bien meilleure caractérisation de la couleur grâce aux 3 canaux du domaine visible et surtout une discrimination des sur-

faces d'après leur dominante minéralogique dans les canaux de l'infrarouge moyen (ESCADAFAL et POUGET, 1987, 1989). Ceci est illustré (fig. 3) par une composition colorée d'un extrait de l'image *Thematic Mapper* qui couvre les environs de Tataouine.

APPLICATIONS

Dans l'exemple précédent, la télédétection des états de surface a été conçue comme une aide à la reconnaissance des sols et de leur sensiblilité à l'érosion.

De fait, les 16 types de surfaces discriminés sur l'image MSS Landsat ont été confrontés aux observations des sols sur le terrain et à la connaissance acquise sur leur distribution dans le paysage en fonction des principales unités géomorphologiques. Ainsi établie, la carte des unités morpho-pédologiques au 1/200 000 a été complétée ensuite sur le thème de la sensibilité aux érosions hydrique et éolienne, en utilisant les critères de pente et texture de l'horizon de surface (ESCADAFAL, 1987a).

Les images TM Landsat permettent maintenant une caractérisation beaucoup plus précise de la nature de la surface des sols, tandis que Spot apporte la vision stéréoscopique et une excellente résolution spatiale comparable à celle des photographies aériennes. En zone aride, aujourd'hui, la télédétection peut donc fournir une véritable cartographie détaillée des matériaux de surface, dont beaucoup sont des horizons pédologiques à l'affleurement.

Le pédologue étudie l'organisation tridimensionnelle des sols sur des zones nécessairement très limitées. Mais, en se basant sur les connaissances qu'il y acquiert, il peut utiliser l'information bidimensionnelle sur les matériaux de surface et sur leurs relations avec la morphologie fine du paysage, pour inférer la structure de la couverture pédologique sur des étendues beaucoup plus vastes. La télédétection est conçue ici comme un outil d'interpolation spatiale d'observations ponctuelles (ESCADAFAL, 1987b).

En se référant à notre introduction, les applications *hydrologiques* sont évidentes. En Afrique sahélienne, tous les travaux les plus récents montrent que la carte des états de surface est une donnée essentielle pour la modélisation des écoulements.

Dans le cas de la mare d'Oursi, un simple classement empirique d'une image MSS Landsat, calée sur des données de terrain, a donné une approximation satisfaisante de cette carte (CHEVALLIER *et al.*, 1986). Nul doute, donc, qu'une approche plus rigoureuse, telle que nous la développons, pourra donner des résultats plus généraux et extrapolables.

Ainsi, la télédétection des états de surface peut-elle fournir de façon rapidement opérationnelle des données actualisées sur l'infiltrabilité des sols arides, sous une forme maillée adaptée aux modèles hydrologiques à discrétisation spatiale.

Dans le domaine de la *phytoécologie*, de nombreuses relations entre l'aspect de la surface et la nature et l'état du peuplement végétal associé ont été observées sur le terrain. En les formalisant, il est tout à fait concevable de tirer d'une image satellitaire des informations sur la végétation, même si, en fait, son effet n'y est pas directement décelable.

En *géomorphologie*, la nature des formations superficielles transparaît bien à la surface et surtout les traces de processus actuels (érosion linéaire, ensablement, etc.).

De fait, les applications thématiques les plus importantes sont probablement le diagnostic et le suivi des phénomènes, de dégradation du milieu qui affectent la végétation et/ou le sol et que l'on regroupe souvent sous le terme générique de *désertification*. La caractérisation de la surface du sol par télédétection est certainement la technique qui permet de mettre en évidence et de suivre au moindre coût ces phénomènes, dont l'extension constitue une grave menace pour l'avenir des régions arides.

En généralisant un peu, on peut considérer que la carte des états de surface est une approche globale des milieux qui permet de distinguer des biotopes ; elle est donc applicable à différents types d'études écologiques.

1km
N

CONCLUSION - PERSPECTIVES

En résumé, nous avons développé une méthode de caractérisation objective et détaillée de l'interface sol-atmosphère, adaptée aux régions arides. La modélisation de l'interaction du rayonnement solaire avec cet interface permet d'établir des relations entre les mesures de luminance enregistrées par les satellites et les observations de terrain. En appliquant ces modèles aux images de télédétection, on peut alors en extraire des informations sur la rugosité, la couleur et la composition minéralogique des surfaces. Comme lorsqu'elles sont collectées directement sur le terrain, ces informations permettent un diagnostic sur la nature et l'état des sols et de la végétation du milieu observé.

Détaillée par ailleurs (ESCADAFAL, 1989a), cette approche originale, qui permet de concilier à la fois les points de vue de différentes thématiques et celui des satellites, est amenée à connaître de nombreux développements. Les perspectives qui se dessinent sont liées d'une part à l'élargissement du champ d'application évoqué plus haut, d'autre part à l'amélioration du traitement des données.

À ce propos, remarquons que l'application aux données Landsat, ou Spot, des modèles évoqués ici, caractérise les pixels individuellement. Dans de nombreux cas, il peut être intéressant de préciser les relations entre pixels par des méthodes aussi variées que l'analyse de la texture de l'image, la géostatistique ou la mesure de formes par la morphologie mathématique.

Combinés à la topographie par un modèle numérique de terrain, les pixels peuvent être orientés dans les 3 directions de l'espace. Ceci permet le calcul de corrections d'effets angulaires, mais également des classes de pentes ou de formes de relief qui définissent un autre aspect du contexte de ces pixels.

Par ailleurs, les premières recherches sur les images radar en zone aride indiquent qu'elles fournissent une mesure de la rugosité de la surface indépendante de l'albédo (REBILLARD et BALLAIS, 1983). Leur croisement avec des donnés Landsat permet donc une meilleure caractérisation de la végétation steppique (GREEN, 1986). Ce type de combinaison de mesures très différentes permet également de suivre l'humidité des sols et va certainement se développer avec les satellites à radar imageur, en particulier ERS-1 de l'Agence spatiale européenne (ASE), lancé en 1991.

Les satellites de type météorologique ou océanographique fournissent des données à faible résolution mais avec une fréquence très élevée. Un exemple d'utilisation de ce type de données pour la cartographie régionale des types de surface au Sahara a été récemment présenté (ESCADAFAL, 1989d). Mais ces satellites permettent surtout de

←

FIG. 3 - *Composition colorée d'une image* Thematic Mapper *couvrant la région de Tataouine (l'échelle est indiquée graphiquement sur l'image).*
Elle est formée par synthèse additive des couleurs primaires, où le bleu est attribué au canal 1, le vert au canal 3 et le rouge au canal 7 (voir les bandes spectrales de ces canaux sur la figure 2).
Cette combinaison permet de distinguer des états de surface de composition minéralogique différentes :
- en gris verdâtre : les affleurements de roches calcaires et dolomitiques ;
- en bordeaux : les placages de lœss péridésertiques (limons carbonatés et rubéfiés) ;
- en jaune : les sables fins éoliens (quartz ferruginisés) ;
- en cyan : les affleurements de gypse (collines de roches gypseuses disséquées à l'est et terrasses gypseuses à l'ouest) ;
- en bleu violacé : les constructions en ciment blanchi à la chaux (ville de Tataouine, T, et village de Ghoumrassène, G),
- en rose pâle : les alluvions (sables quartzeux et galets roulés).
Dans toutes ces teintes on observe une diminution de la clarté lorsque la rugosité croît (pour une même exposition). Par exemple, dans le quart nord-est de l'image, les surfaces sableuses à steppe assez dense apparaissent ainsi en jaune foncé (ocre).

suivre en temps réel les flux d'eau et de chaleur. Des modèles de circulation de ces flux ont été élaborés par les physiciens de l'atmosphère. Leur couplage avec une caractérisation des surfaces par les satellites à haute résolution devrait permettre de proposer des modèles de fonctionnement de ces milieux et de prévoir leur évolution (cycle de l'eau, alimentation de l'atmosphère en poussières sahariennes, dynamique de populations végétales et relation avec les pullulations d'acridiens, etc.).

Enfin, les projets d'imagerie spatiale à base de spectroradiomètres, dont on vient de voir les premières simulations sur des paysages arides (THOMAS et HUSTIN, 1987), vont très certainement stimuler le développement des recherches sur les propriétés spectrales des sols et de leur surface, et permettre à l'avenir une caractérisation encore plus précise des milieux arides.

R. ESCADAFAL : *pédologue*,
LIA, unité de télédétection, ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex

BIBLIOGRAPHIE*

ACCT, 1978. - Normalisation et échange de données pédologiques par ordinateur. Agence culturelle de coopération scientifique et technique, Paris, 192 p.

AUBERT (G.) et GIRARD (M. C.), 1978. - Vocabulaire de l'environnement pédologique tropical. Agence culturelle de coopération scientifique et technique, Paris, 81 p.

BAUER (M. E.), VANDETBILT (V. C.), ROBINSON (B. F.) et DAUGHTRY (C. S. T.), 1980. - Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors (review). *Proc. 14th ISPRS Congress*, Hamburg (F.R.G.), 23(B-7) : 56-73.

BOURGES (J.), FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1973. - Etude d'une toposéquence typique du Sud tunisien. Djebel Dissa, résultats de la saison 1973-74. Direction des sols, Tunis, E. S. n° 89, 43 p.

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1988. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Rapport* CEE-ORSTOM, 202 p. + annexes.

CASSANET (J.), 1985. - Satellites et capteurs. Série Télédétection satellitaire, Paradigme, Caen, 172 p.

CHEVALLIER (P.), LOINTIER (M.) et LORTIC (B.), 1986. - Water levels of a sahelian lake (Mare d'Oursi, Burkina-Faso). *Hydrologic application of space technology, IAHS publ.* n° 160 : 99-107.

CIERNIEWSKI (J.), 1987. - A model of soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 97-115.

CONDIT (H. R.), 1970. - The spectral reflectance of American soils. *Photogramm. Eng.*, 36 : 955-966.

COOPER (K. D.) et SMITH (J. A.), 1985. - A Montecarlo reflectance model for soil surfaces with three dimensional structure. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23, 5 : 668-673.

COURAULT (D.) et GIRARD (M. C.), 1988a. - Analyse des hétérogénéités intraparcellaires des sols par télédétection. *Science du sol*, 26(1) : 1-12.

COURAULT (D.) et GIRARD (M. C.), 1988b. - Relationships between the soils composition and their spectral signature. 5th ISSS Symposium of the Working Group Remote Sensing, Budapest,11-15-04-1988.

* Bibliographie à jour à la date de rédaction du manuscrit (1989)

COURAULT (D.), GIRARD (M. C.) et ESCADAFAL (R.), 1988. - Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Actes du 4e Coll. int. «Signatures spectrales d'objets en télédétection», Aussois, janvier 1988 : 357-362.

DESCHAMPS (P. Y.), DUHAUT (P.), ROUQUET (M. C.) et TANRE (D.), 1983. - Mise en évidence, analyse et correction des effets atmosphériques sur les données multispectrales de Landsat ou Spot. IIe Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en Télédétection. Inra-CNES, Bordeaux : 709-722.

EGAN (W. G.) et HILGEMAN (T.), 1978. - Spectral reflectance of particulate materials : a Monte Carlo model including asperity scattering. *Applied optics*, 17(2) : 245-252.

ESCADAFAL (R.), 1981a. - Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du colloque «Informatique et traitement des données de sols», Paris, 1981. *Sols*, n° 5 : 21-27.

ESCADAFAL (R.), 1981b. - L'étude de la surface du sol dans les régions arides (Sud tunisien). Recherches méthodologiques. E. S. n° 187, Direction des Sols, Tunis, 64 p.

ESCADAFAL (R.), 1987a. - Carte des ressources en sols de la Tunisie au 1/200 000. Feuille de Tataouine. Direction des sols, Tunis, E. S. n° 222. Notice 37 p., 1 carte couleur h. t.

ESCADAFAL (R.), 1987b. - The use of earth observation satellites for soil mapping in arid and tropical regions. EARSEL News, 33/34 : 16-18.

ESCADAFAL (R.), 1989a. - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tatatouine (Tunisie). Thèse de doctorat, université, Paris-VI, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 317 p.

ESCADAFAL (R.), 1989b. - Remote sensing of arid soil surface color with Landsat Thematic Mapper. *Adv. Space Res.*, 9(1) : (1)159-(1)163.

ESCADAFAL (R.), 1989c. - Propriétés spectrales des sols. Actes des «Journées de télédétection», *à paraître in Colloques et séminaires*, ORSTOM, Paris.

ESCADAFAL (R.), 1989d. - Télédétection des zones potentiellement sources d'aérosols désertiques en zone péri-saharienne. ATP CNRS/PIREN «Aérosols désertiques», *rapport final multigr.*, ORSTOM, Bondy, 39 p.

ESCADAFAL (R.) et FEDOROFF (N.), 1987. - Apport de la micromorphologie à une étude multiscalaire de la surface des sols en région aride (Tunisie méridionale). «Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology», Fedoroff N., Bresson L.M. et Courty M.A. (Edts), AFES, Plaisir, France : 409-413.

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et COURAULT (D.), 1988a. - La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2) : 147-154.

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et COURAULT (D.), 1988b. - Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 4(3) : 249-261.

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et COURAULT (D.), 1989. - Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat data (MSS and TM). *Remote Sensing of Environment*, 27: 37-46.

ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.) et ASSELINE (J.), 1986. - Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar, Sud Tunisien). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Direction des Sols, Tunis, ORSTOM, Bondy, 63 p. *multigr.*

ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1986. - Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *I. T. C. Journal* : 19-23.

ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1987. - Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale) avec Landsat TM. *Photo-interprétation*, 4(2) : 9-12 .

ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1989. - Comparaison des données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride. *Monitoring the Earth Environment, European Space Agency publication*, SP-1102 : 301-307.

FERENCZ (A.) et ESCADAFAL (R.), 1989. - A review of the actual modeling problems in remote sensing of soils. *Annales Univ. Sc.* Budapest, sous presse.

FLORET (C.) et PONTANIER (R), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et doc. ORSTOM*, n° 150, 544 p.

GIRARD (M. C.), 1983. - Télédétection de la surface du sol. *In* : «Application de la télédétection à l'agriculture», *Colloques Inra*, n° 32 : 177-193.

GODRON (M.), DAGET (Ph.), EMBERGER (L.), *et al.*, 1978. - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. CNRS, Paris, 292 p.

GRAETZ (R. D.) et GENTLE (M. R.), 1982. - The relationships between reflectance characteristics in the Landsat wawebands and the composition and structure of an Australian semi-arid shrub rangeland. *Photogramm. Engin. Rem. Sens.*, 48 (11) : 1721-1730.

GREEN (G.M.), 1986. - Use of SIR-A and Landsat MSS data in mapping shrub and intershrub vegetation at Koonamore, South Australia. *Photogram. Eng. Rem. sens.*, 52(5) : 659-670.

GUYOT (G.), 1989. - Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Collection Paradygme. Télédétection satellitaire* n° 5, 178 p.

HUNT (G.R.) et SALISBURY (G.W.), 1970. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : I. Silicates minerals. *Modern Geology*, 1 : 283-300.

HUNT (G. R.) et SALISBURY (G. W.), 1971a. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : II. Carbonates. *Modern Geology*, 2 : 23-30.

HUNT (G. R.), SALISBURY (G. W.) et LENHOFF (C. J.), 1971b. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2 : 195-205.

HUNT (G. R.), SALISBURY (G. W.) et LENHOFF (C. J.), 1973. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : VI. Additional silicates. *Modern Geology*, 4 : 85-106.

JOLY (G.), 1985. - Les données-images. Série *Télédétection satellitaire, Paradigme*, Caen, 129 p.

KAHLE (A. B.), 1984. - Measuring spectra of arid lands. Desert and arid lands : 195-217.

KING (Ch.), 1985. - Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. *Documents du BRGM* n° 96, Orléans, 174 p. + annexes.

MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. - Study of factors acting on reflectance of salt affected and acid soils surfaces in Casamance (Senegal) : first results. *Int. Symp. Rem. Sens. Res. Dev. Env. Manag.*, 22-29-9-1986, Enschede, The Netherlands, 8 p.

MULDERS (M. A.), 1987. - Remote sensing in soil science. *Developments in soil science*, 15, Elsevier, Amsterdam, 379 p.

NORMAN (J. M.), WELLES (J. M.) et WALTER (E. A.), 1985. - Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies, and soils. *IEEE trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23 : 659-667.

OTTERMANN (J.), DEEREING (D.), Eck (T.) et RINGROSE (S.), 1987. - Techniques of ground truth measurements of desert-scrub structures. *Adv. Space Res.*, 7(11) : 153-158.

POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.) et MTIMET (A.), 1984. - Apport des données MSS Landsat pour la cartographie des ressources en sols des régions arides (Tunisie). Actes du 18e Symposium sur l'Observation de la Terre, CNES-ERIM, Paris, 1-15-10-1984, 14 p.

POUGET (M.) et MULDERS (M. A.), 1988. - Report of the ISSS working group «Remote sensing of the soil surface». Description of the landsurface for correlation with remote sensing data. 5th ISSS Symposium of the Working Group Remote Sensing, Budapest, 11-15/04/88.

REBILLARD (Ph.) et BALLAIS (J. L.), 1983. - Interprétation d'enregistrements digitaux de données SIR-a, Seasat et Landsat sur les chotts algériens. *C.R. Acad. Sc. sér.* II, 296 : 103-106.

STONER (E. R.), BAUMGARNER (M. F.), BIEHL (L. L.) et ROBINSON (B. F.), 1980. - Atlas of soil reflectance properties. LARS, Purdue University, 75 p.

STRAHLER (A. H.), WOODCOCK (C. E.) and JAMES (A. S.), 1986. - On the nature of models in remote sensing. *Rem. Sens. Env.*, 20 : 121-139.

TANRE (D.), DESCHAMPS (P. Y.), DUHAUX (C.) et HERMAN (M.), 1987. - Adjacency effects produced by atmospheric scattering in Thematic Mapper data. *J. Geophys. Res.*, 92(D10) : 12 000-12 006.

TELAHIGUE (T.), FLORET (C.) et LE FLOC'H (E.), 1987. - Succession post-culturale en zone aride de Tunisie. *Oecol. Plant.*, 8(22) : 45-58.

THOMAS (R. W.) et USTIN (S. L.), 1987. - Discriminating semiarid vegetation using airborne imaging spectrometer data : a preliminary assessment. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 273-290.

VALENTIN (C.), 1985. - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3e cycle, univ., Paris-VII, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 259 p.

VALENTIN (C.), 1986. - Différencier les milieux suivant leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. *Colloques et Séminaires*, ORSTOM, Paris : 50-74.

Jean ALBERGEL, Alain CASENAVE,
Pierre RIBSTEIN, Christian VALENTIN

Aridité climatique, aridité édaphique :

étude des conditions de l'infiltrabilité en Afrique tropicale sèche

INTRODUCTION

Lorsque l'on parle de l'aridité croissante des régions soudano-sahéliennes depuis les premières années sèches de la décennie soixante-dix, on pense à la baisse généralisée des totaux pluviométriques. De nombreuses études ont mis en évidence le caractère singulier du déficit pluviométrique de ces vingt-cinq dernières années au Burkina Faso (ALBERGEL *et al.*, 1984 ; CARBONNEL et HUBERT, 1985 ; SNIDJERS, 1986 ; MUSY et MEYLAN 1987).

Les conséquences de cet aléa climatique sur les productions végétales, sur les paysages et sur l'écologie des grands ensembles du pays ont été abordés dans plusieurs ouvrages (COUREL, 1984 ; GROUZIS, 1987).

Cet article, issu d'un travail mené sur 8 bassins versants expérimentaux et sur 50 parcelles de simulation de pluie (1 m²) représentatifs de la diversité des conditions écologiques du pays (ALBERGEL, 1987), cherche à attirer l'attention sur la diminution de l'infiltrabilité des sols en période de sécheresse et donc sur l'accentuation des caractères d'aridité des paysages.

MÉTHODES ET DONNÉES

La simulation de pluie

Sur chaque parcelle expérimentale de 1 m² le protocole de pluies simulées permet de déterminer les valeurs des principaux paramètres de l'hydrodynamique du sol.

Le simulateur de pluie utilisé (modèle ORSTOM, ASSELINE et VALENTIN, 1978) reproduit fidèlement une séquence d'averses dont les hauteurs et les intensités sont établies en fonction de la connaissance des courbes intensité-durée-fréquence des pluies de la région.

Ces averses sont séparées de temps de ressuyage variables qui donnent au sol différents états d'humectation avant la pluie. La mesure en continu du ruissellement et la caractérisation de l'humidité pondérale du sol avant la pluie par des mesures neutroniques, ou par un indice pluviométrique, ont permis de déterminer la hauteur totale infiltrée, les intensités de ruissellement et d'infiltration en fonction du temps, et les réserves en eau du sol.

On a utilisé le modèle d'infiltration de MOREL SEYTOUX (1981) pour calculer le temps de submersion, la conductivité à saturation en milieu naturel et la succion capillaire sur le front d'humectation.

La surface et les horizons pédologiques superficiels de chaque parcelle testée ont été décrit finement en utilisant une méthode normalisée (VALENTIN, 1986). On a obtenu ainsi un fichier des variables caractéristiques de la dynamique de l'infiltration et de variables descriptives du milieu naturel sur 50 parcelles.

Le bassin versant expérimental

Dans la période 1980-1985, des observations de pluies et de débits ont été réalisées pendant une saison des pluies au moins sur des bassins versants expérimentaux choisis pour leur représentativité d'un grand domaine climatique. Ces bassins avaient déjà fait l'objet d'un suivi dans des années plus humides, de 1956 à 1963. Pour ces 2 périodes, il a été établi un fichier des événements averses-crues.

À partir des chroniques de pluies et de lames ruisselées, il a été défini, sur chaque bassin, un comportement moyen au ruissellement et, par conséquent, à l'infiltration, pour la période humide et pour la période sèche.

Ce comportement moyen est représenté par l'ajustement d'une branche d'hyperbole dont l'expression est la suivante :

$$Lr = (P^2 + a^2)^{1/2} - a \qquad \text{avec } a > 0$$

Lr = lame ruisselée (mm)
P = pluie moyenne (mm)
a = constante (mm)
pour $P = 0$ $Lr = 0$
pour $P = +\infty$ $Lr = P - a$

a est la quantité de pluie maximale perdue pour le ruissellement dans l'hypothèse d'une pluie «infinie» à forte intensité : c'est une caractéristique du bassin.

L'étude théorique de cette fonction montre que le calcul de a par optimisation sur les observations est d'autant plus fiable que l'on possède davantage de couples (P, Lr) de valeur importante (ALBERGEL, 1987).

La figure 1 montre l'ajustement de cette branche d'hyperbole aux observations réalisées en période sèche 1982-83 sur le bassin versant de Binnde.

LES RÉSULTATS

Les facteurs explicatifs de l'infiltrabilité

L'analyse de la matrice des valeurs des paramètres hydrodynamiques et physiographiques des parcelles aboutit aux résultats illustrés par l'analyse factorielle des correspondances (fig. 2) (ALBERGEL *et al.*, 1985) :

- sur les parcelles avec végétation naturelle, le pourcentage de couverture végétale à laquelle est liée l'activité de la mésofaune est la donnée prédominante pour expliquer l'infiltration ;
- sur les sols nus, les variations de l'infiltration peuvent s'expliquer par la nature des organisations pelliculaires de surface et par la couverture gravillonnaire. Dans tous les cas, les valeurs de l'infiltration restent faibles pour ce type d'occupation du sol ;

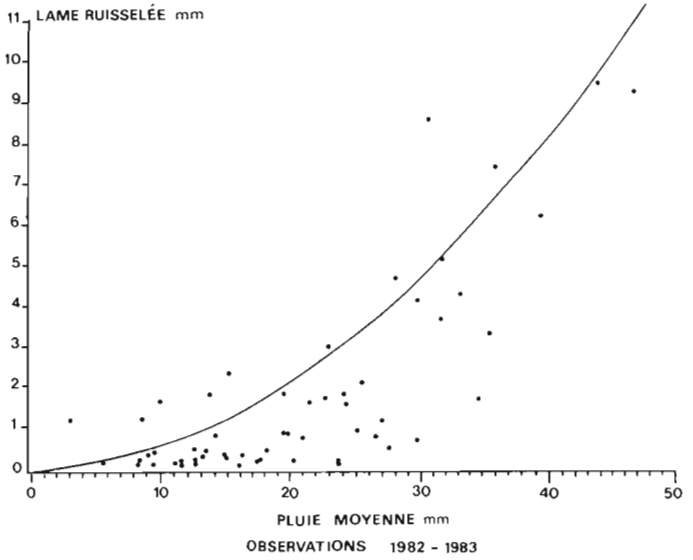


FIGURE 1 - *Ajustement d'une hyperbole aux données du bassin de Binnde.*

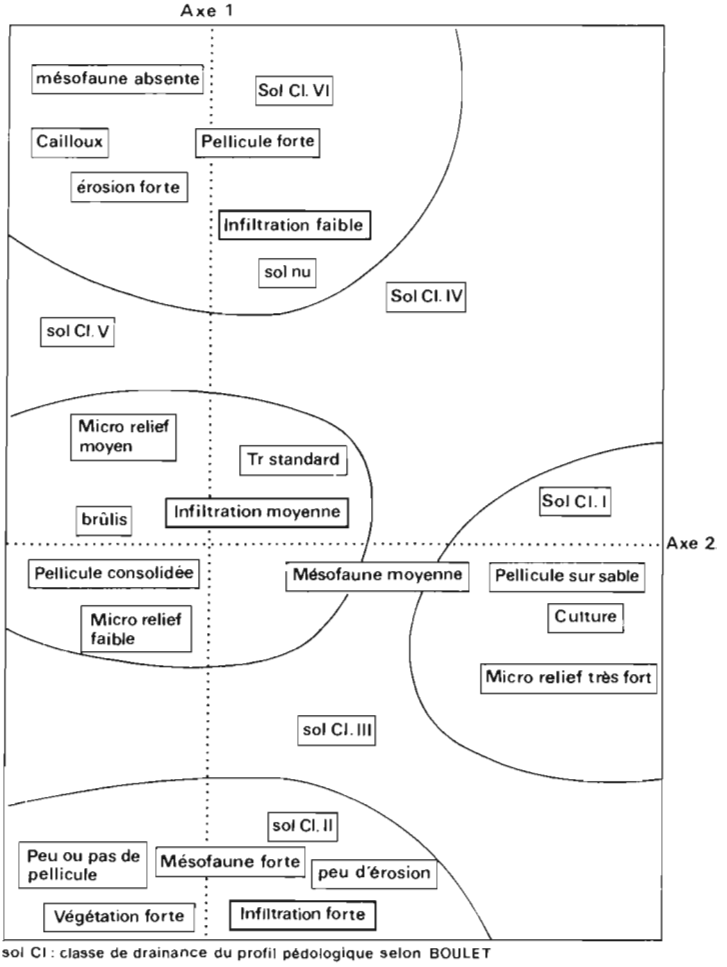


FIGURE 2 - *Variables de l'hydrodynamique du sol, variables physiographiques des parcelles.*

- sur les sols cultivés, la lame infiltrée est la résultante de 2 variables dont les poids sont équivalents ; d'une part le temps de submersion, dont les variations sont liées au microrelief et aux organisations pelliculaires de surface ; d'autre part la conductivité hydraulique, dont les valeurs s'expliquent surtout par l'abondance de la litière favorable au développement de la mésofaune et à la macroporosité de surface.

La figure 3, où sont représentés les profils hydriques mesurés avant et après une pluie de 96,7 mm, sur 2 parcelles, donne une autre illustration de l'influence de la végétation sur l'infiltrabilité du sol. Implantées à 20 m l'une de l'autre sur un même type de sol, ces 2 parcelles ne diffèrent que par l'état de leur surface. Pour la première, il s'agit d'un sol nu couvert de croûtes superficielles alors que la seconde présente un couvert graminéen de 90 %.

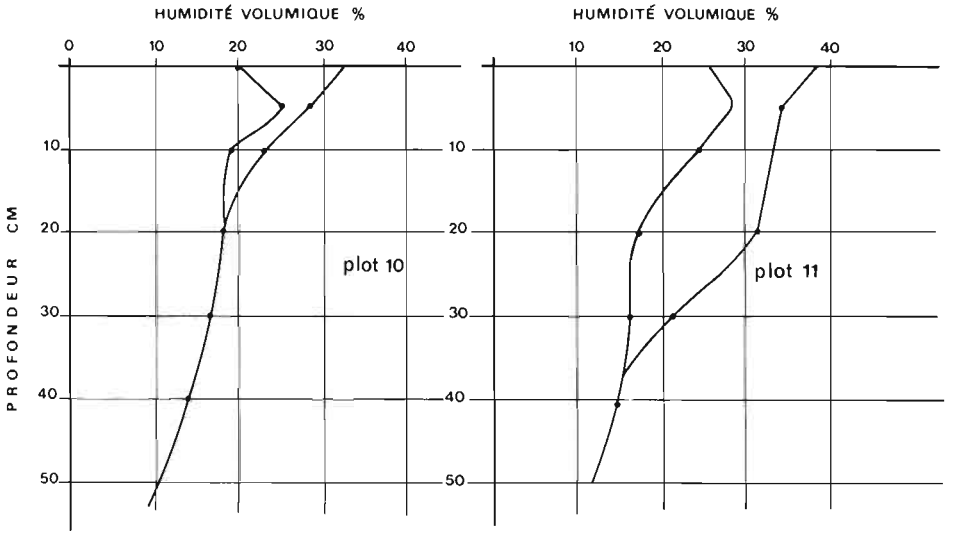


FIGURE 3 - *Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles 10 et 11 du bassin de Kognere.*

Tableau I - Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm (bassin versant de Kognere ; parcelles 10 et 11)

PARCELLES	HAUTEUR DE PLUIE - HAUTEUR RUISSELÉE	LAME INFILTRÉE	DIFFÉRENCE
Kognere 10 Sol nu	14,9 mm	9 mm	5,9 mm
Kognere 11 Graminée	59,3 mm	56 mm	3,3 mm

Cet exemple montre que :

- à la précision de la mesure neutronique près, la lame infiltrée mesurée est égale à celle calculée par différence entre «pluie et lame ruisselée» (tabl. I). La quantité d'eau interceptée par la végétation est donc trop faible pour être mesurable ;
- la lame infiltrée peut varier du simple au quintuple sur un même type de sol du fait de la macroporosité induite en surface par la végétation et par l'activité mésofaunique qui lui est associée. Ces 2 facteurs interdisent le développement d'organisations pelliculaires de surface.

Cette mise en évidence, à l'échelle de la parcelle, de l'importance de la couverture végétale sur l'infiltrabilité, nous a incités à chercher si l'effet en était également sensible à l'échelle des petits bassins versants. Cela était rendu possible par l'existence, sur 5 des 8 bassins étudiés, de mesures effectuées pendant la période humide, 1956-1963, et pendant la période de sécheresse, 1980-1985.

Variabilité du comportement des bassins versants

Pour 5 bassins, Gagara-Est et Gagara-Ouest en zone sahélienne, Kognere en zone sahélo-soudanienne, Binnde et Kazanga en zone soudanienne, nous avons établi la courbe de comportement moyen en période sèche et en période humide :

$Lr = (P^2 + a^2)^{1/2} - a$

Puisque le paramètre a est une caractéristique du bassin, il nous a paru raisonnable d'émettre l'hypothèse suivante :

- le comportement d'un bassin s'est modifié si l'estimation de a sur les 2 périodes diffère d'au moins 2 fois la valeur de l'écart-type.

Le tableau II donne les valeurs du paramètre a pour les 2 périodes, récente et ancienne. Ces valeurs sont obtenues par optimisation, sur les couples pluies-lames ruisselées pour lesquels le coefficient de ruissellement est supérieur à 10 %.

Les bassins versants les plus septentrionaux, Gagara-Est et Gagara-Ouest, semblent avoir évolué vers une augmentation du ruissellement entre les 2 périodes d'observation 1956-1957 et 1980-1985. Le bassin de Kognere, situé dans la zone sahélo-soudanienne, présente une réduction moins nette de sa perméabilité. En revanche, les bassins plus arrosés de Binnde et de Kazanga présentent des comportements très voisins pour les 2 périodes d'observations.

Tableau II - Estimation du paramètre «a» sur les deux périodes d'observation

	Période humide			Période sèche		
Bassin	Nb. obs.	a mm	Écart-type	Nb. obs.	a mm	Écart-type
Kognere	16	147	10,8	1	115	-
Kagara E	10	93	9,6	11	26	3,8
Gagara O	11	60	7,9	13	23	2,8
Binnde	32	84	6,0	16	94	9,7
Kazanga	33	109	8,9	7	105	11,2

DISCUSSION

Les résultats obtenus sous pluies simulées ont montré que la capacité d'infiltration, dans la zone sahélienne, paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique, croûtes superficielles) qu'à la nature des organisations internes de la couverture pédologique.

L'étude comparative des photographies aériennes, prises en 1956 et en 1981, de 5 bassins versants (VALENTIN, 1986 ; ALBERGEL, 1987) montre que l'une des conséquences de la période de sécheresse, qui affecte le Sahel depuis 1969, est une transformation profonde des états de surface, pour certains de ces bassins.

Sur les bassins de Gagara, du fait de la disparition de la strate arbustive et surtout herbacée, on assiste à une extension des zones fortement encroûtées. À l'heure actuelle, celles-ci occupent la majeure partie des surfaces sableuses cultivées situées sur les dunes de l'amont et de l'aval du bassin, la totalité des versants argilo-limoneux et une fraction importante des bas-fonds.

Cette modification des états de surface se traduit dans le comportement hydrologique des bassins par une très nette augmentation des coefficients de ruissellement.

Sur le bassin de Kognere, un effet induit, l'extension des zones cultivées se surimpose à celui, direct, de la sécheresse. En effet, l'extension des cultures est une des réponses adoptées par les agriculteurs locaux face à la faiblesse des rendements. En 1956, les surfaces cultivées représentaient 16 % de la superficie du bassin, alors qu'elles en occupent 36 % à l'heure actuelle. Cette mise en culture favorise les tassements de la surface du sol et le développement des organisations pelliculaires superficielles. Cela se traduit par une augmentation des zones érodées dont la superficie a été multipliée par 20 entre 1956 et 1981 (fig. 4). Là aussi, la conséquence directe de ces modifications des états de surface est un accroissement du ruissellement.

Sur les bassins de Binnde et de Kazanga, au contraire des 2 exemples précédents, on ne peut mettre en évidence de modifications sensibles des états de surface dont les limites cartographiques ne varient pas entre périodes sèche et humide. Seule, la séparation entre zones cultivées et jachères évolue quelque peu. Cette stabilité des états de surface se traduit par une constance du comportement hydrologique des bassins.

CONCLUSION

Par des mesures sous pluies simulées, on a montré que l'infiltrabilité, en zone sahélienne et soudano-sahélienne, était sous la dépendance quasi exclusive des états de surface. Ceux-ci peuvent évoluer considérablement sous l'effet de la sécheresse : diminution de la strate herbacée et arbustive, d'où une disparition de l'activité faunique et une augmentation des surfaces encroûtées et des zones érodées. Cette modification qu'on ne retrouve, en général, qu'au nord de l'isohyète interannuelle 800 mm, entraîne une augmentation du ruissellement et de l'érosion ; cette augmentation accentue les effets de la sécheresse et aboutit à une dégradation très marquée et parfois irréversible du milieu. Cette évolution dans le sens d'une aridité croissante du milieu a pu être qualifiée, de «sahélisation» des bassins (ALBERGEL et VALENTIN, 1986).

J. ALBERGEL : *hydrologue*, ORSTOM BP 1386, Dakar, Sénégal
A. CASENAVE : *hydrologue*, représentant de l'ORSTOM au Niger, ORSTOM, BP 1146 Niamey, Niger
P. RIBSTEIN : *hydrologue*, ORSTOM, CP 8714, La Paz, Bolivie
C. VALENTIN : *pédologue*, ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France

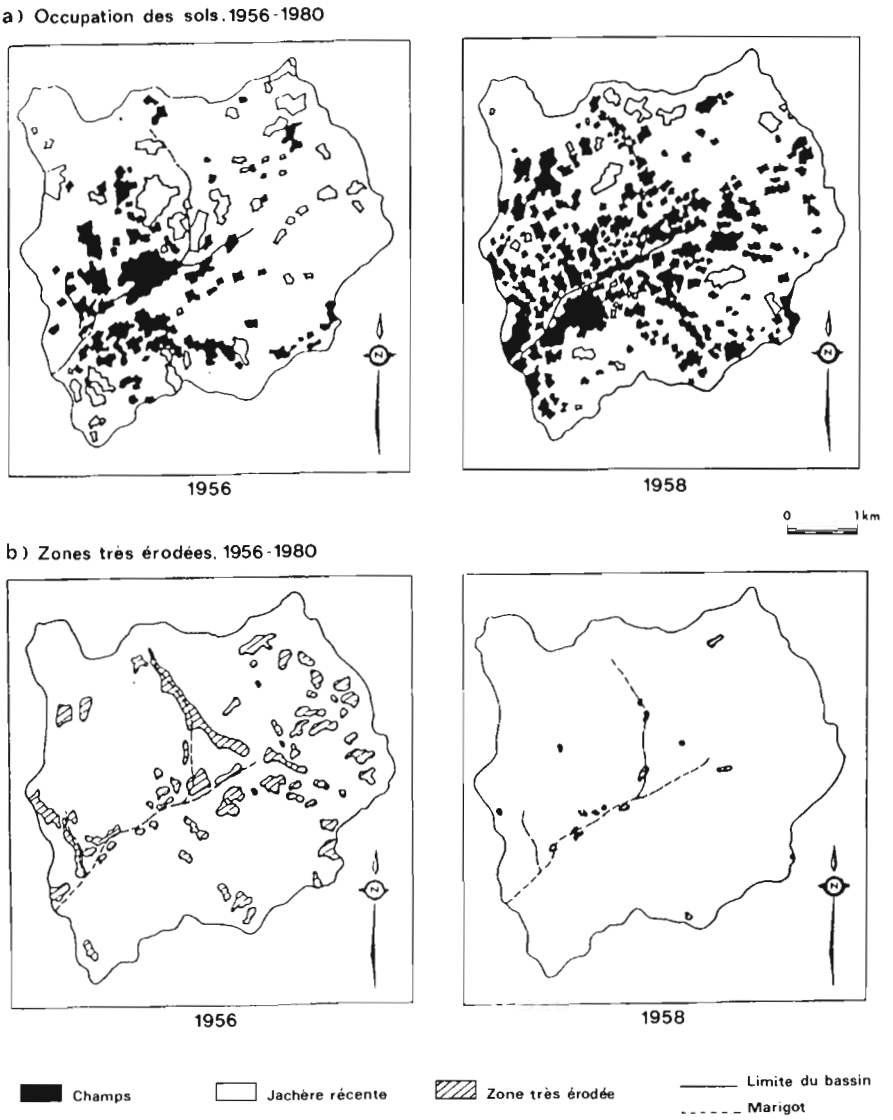


Figure 4 - Bassin de Kognere. Évolution de l'occupation des sols et des zones érodées entre 1956 et 1980 (d'après VALENTIN, *1986).*

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987. - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat sc. nat., université Paris-VI, 341 p.

ALBERGEL (J.), CARBONNEL (J. - P.) et GROUZIS (M.), 1984. - Péjoration climatique au Burkina Faso. Incidences sur les ressources en eau et sur les productions végétales. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n°1 : 3-19

ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.) et VALENTIN (C.), 1985. - L'infiltration, quels facteurs explicatifs ? Analyses sur 48 parcelles du Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (17-18 sept. 1985). *Colloques et séminaires,* ORSTOM : 26-48

ALBERGEL (J.) et VALENTIN (C.), 1986 - «Sahélisation» d'un petit bassin versant : Boulsa Kognere au centre nord du Burkina Faso. Colloque Nordest Sahel IHEAL Paris.

ASSELINE (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. XV, n° 4 : 321-349.

CARBONNEL (J.-P.) et HUBERT (P.), 1985. - Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex-Haute-Volta). *C.R. Acad. sc.*, t. 301, n° 13 : 41-944

COUREL (M.-F.), 1984. - Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par satellites. Thèse de doctorat d'État ès lettres et sc. hum., université Paris I, 407 p.

GROUZIS (M.), 1987. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse de doctorat d'État sc. nat., université Paris-Sud, 336 p.

MOREL SEYTOUX (H. J.), 1981. - Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph. *Water resources bull.* : 1012-1022

MUSY (A.) et MEYLAN (P.), 1987. - Modélisation d'un processus non stationnaire. Application à la pluviométrie en zone semi-aride. The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (*Proceedings of the Vancouver Symposium,* AUG. 1987) *IAHS publ.*, 168, 1987 : 287-299

SNIDJERS (T. A. B.), 1986. - Interstation corrélations and non stationarity of Burkina Faso rainfall. *Journ. of climate and applied meteorology,* vol. 25 : 524-531

VALENTIN (C.), 1986. - Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement. Une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (17-18 sept. 1985) . *Colloques et séminaires,* ORSTOM : 50-74

Jean-Claude LEPRUN,
Clotario OLIVIER DA SILVEIRA

Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides :

le Sahel de l' Afrique de l'Ouest et le Nordeste brésilien

INTRODUCTION

Le Sahel africain et le sertâo du Nordeste brésilien sont 2 régions semi-arides qui présentent de nombreuses analogies. Le climat, de type tropical contrasté, sec et chaud, y accuse d'importantes variations pluviométriques interannuelles et des sécheresses périodiques calamiteuses. Les formations géologiques dominantes, de même origine magmatique, ont un âge ancien égal. La végétation xérophyte arbustive ou arborée basse, plus ou moins continue, souvent épineuse, est adaptée à la sécheresse. Le réseau hydrographique est constitué de cours d'eau à écoulement temporaire violent de type oued. La pluviométrie, faible et extrêmement variable, ne permet pas aux cultures de plantes vivrières annuelles d'assurer une récolte suffisante et régulière. Dans les 2 cas, la population rurale, pauvre, est assujettie à une agriculture de subsistance de bas niveau technologique, à l' élevage extensif et aux exodes vers les villes. En dépit de tous ces points communs, les sols et les eaux de ces deux régions sèches accusent des différences telles qu'il convient d'en étudier le pourquoi et le comment, les causes et les conséquences.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel

Le matériel utilisé pour cette comparaison provient des données pédologiques et hydrologiques accumulées au cours de dix années de prospection et de recherche dans la marge sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest et de celles obtenues par la Superintendance pour le développement du Nordeste (Sudene) et l'Entreprise brésilienne de recherches agropastorales (Embrapa), organismes brésiliens d'accueil de l'un des auteurs, depuis 1980. En particulier, pour le Sahel, il s'agit des données consignées dans les rapports de prospection et cartographie pédologiques au 1/500 000 du Burkina Faso (BOULET, 1968 ; BOULET et LEPRUN, 1970) et des études agrostologiques du Gourma malien (LEPRUN, 1978). Pour 7 États du Nordeste (Alagoas, Ceará, Bahia, Paraíba, Pernambouc, Rio Grande do Norte, Sergipe), les données sur les sols sont issues des travaux cartographiques, à des échelles variant du 1/500 000 au 1/1 000 000, réalisés entre 1971 et 1977 par le Service des sols de l'Embrapa, grâce

aux conventions avec divers organismes (ministère de l'Agriculture, United States Agency for International Development [Usaid], Sudene, etc.).

Les données hydrologiques et de qualité de l'eau du Nordeste ont été puisées dans divers rapports de la Division de l'hydrologie de la Sudene qui seront cités au moment voulu, des travaux d'une ATP Piren réalisée par une équipe de l'ORSTOM et divers chercheurs brésiliens (AUDRY *et al.*, 1987) et de rapports de synthèse (LEPRUN, 1981, 1983 et 1985). Celles du Sahel proviennent des travaux de l'ORSTOM au Sénégal et au Burkina Faso (COLLINET et LAFFORGUE, 1979) et en particulier de ceux du projet de la mare d'Oursi (CHEVALLIER, 1982).

Méthodes

Pour pouvoir comparer convenablement les sols et les eaux des 2 régions nous allons analyser, dans chacun des cas, les facteurs de pédogenèse et de l'hydrologie.

FACTEURS DE PÉDOGENÈSE

Situation géographique

La zone semi-aride de l'Afrique occidentale, intéressée par l'étude, se situe grosso modo entre 10° et 18° de latitude nord et entre 4° et 15° de longitude ouest. La zone semi-aride du Nordeste brésilien est comprise entre 3° et 15° de latitude sud et entre 34° et 45° de longitude ouest. Situées de part et d'autre de l'équateur, les 2 régions ont une même extension en longitude, mais le Nordeste sec est plus étendu en latitude. La continentalité des principales zones étudiées au Nordeste est bien moindre que celles du Sahel du Mali ou du Burkina Faso. Si environ 400 km séparent l'Océan du sertâo de la Paraíba, il y a 1 200 km entre Dakar et le nord du Burkina Faso (fig. 1).

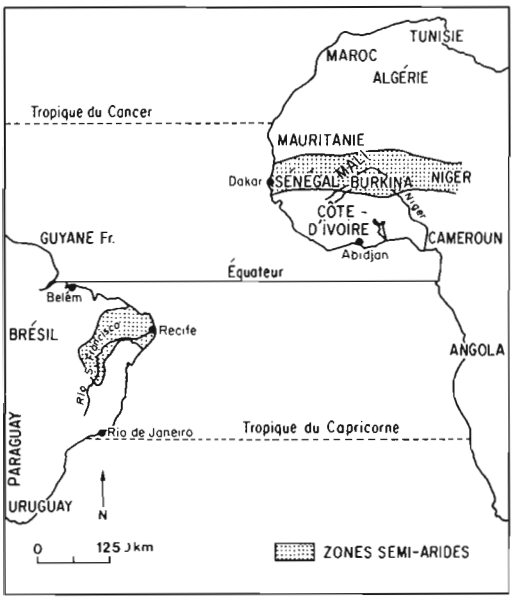


FIGURE 1 - *Localisation des zones étudiées.*

Climat

Les zones semi-arides traitées ici seront arbitrairement limitées par les isohyètes 200 et 600 mm.

Dans le Sahel, le régime des précipitations est soumis à la rencontre de 2 masses d'air - l'une continentale sèche, l'autre maritime humide -, qui détermine le front intertropical (FIT). Le FIT, par son déplacement vers le nord entre janvier et juillet, détermine le début de la saison des pluies ; ces dernières tombent exclusivement durant la saison chaude. La saison des pluies - courte, de un à trois mois, et estivale - et la saison sèche présentent une alternance stricte. Les variations de la pluviosité sont importantes et la température moyenne annuelle se maintient entre 27,5 et 30 °C.

La zone semi-aride du sertâo présente 2 régimes pluviaux différents, celui des régions Nord et Centre - qui dépend, comme dans le cas du Sahel, du déplacement du FIT - et celui de la région Sud, influencé par des fronts froids en provenance du sud. Ces 2 régimes déterminent des dates différentes de saisons des pluies ; la première, au nord, se situe principalement en mars alors que la seconde, au sud, se concentre en novembre, décembre et/ou janvier. Les coefficients de variation de la pluviométrie, plus élevés que ceux du Sahel, atteignent 50 % et figurent parmi les plus importants connus au monde (NIMER, 1979). En revanche, l'alternance des 2 saisons, sèche et humide, n'est pas stricte et, à l'examen de 10 années consécutives de relevés, on remarque qu'il peut pleuvoir à n'importe quel moment de l'année. Pour des stations comparables des 2 zones et pour les mêmes périodes de retour, les valeurs d'intensité-durée des pluies conduisent à des déterminations d'érosivité des pluies sahéliennes qui, selon le concept de WISCHMEIER et SMITH (1958), sont bien supérieures à celles du sertâo (LEPRUN, 1985) (tabl. I). L'insolation moyenne, tout en étant élevée - elle se situe entre 2 000 et 2 500 h.an^{-1} -, demeure cependant inférieure à celle de l'Afrique, qui

Tableau I - Pluviométrie et valeurs du facteur d'érosivité des pluies pour des stations comparables du Sahel et du sertâo.

STATIONS	PLUVIOMÉTRIE MOYENNE ANNUELLE (mm)	R É.-U.	NOMBRE de PLUIES ÉROSIVES ANNUELLES
Taperoá (NE)	515	168	16
Lages (NE)	500	160	15
Dori (B. F)	510	260	13
Ouricouri (NE)	607	185	17
Ouahigoya (B. F)	600	301	16
Pau de Ferros (NE)	751	266	29
Mogtedo (B. F)	753	378	20

NE : Nord-est brésilien ; B. F : Burkina Faso

Sources : Burkina Faso : ROOSE, 1977 ; Nordeste : Banque de données DHM/Sudene, Conventions Sudene/ORSTOM et Sudene/UFPB/CCA Areia.

dépasse généralement 2 500 h.an^{-1} pour atteindre quelquefois 3 000 h.an^{-1}. L'observation des images satellitaires de saison sèche laisse apparaître des nébulosités de plus de 50 % alors que dans le Sahel les mois secs sont souvent peu nuageux. Les moyennes thermiques annuelles oscillent entre 23 et 27°C avec une amplitude journalière moyenne assez constante de 10°C. De ce fait, l'humidité de l'air et l'évaporation sont moins élevées que dans le Sahel. Les vents sont peu puissants et continus contrairement à ce qui se passe dans le Sahel : la vitesse de 8 m.s^{-1} n'est atteinte que 20 j.an^{-1} dans un couloir entre Natal et le Rio São Francisco ; partout ailleurs, la moyenne annuelle est inférieure à 5 j.an^{-1} (PIOGER, 1964 ; MENDES, 1986). Au Sahel, et en particulier dans sa zone septentrionale, le vent souffle de 7 à 14 m.s^{-1}, pendant 20 à 30 j.an^{-1}, et à 5-6 m.s^{-1}, environ 10 j.an^{-1}.

Le tableau II regroupe les valeurs moyennes de quelques paramètres climatiques relevés pendant la même période, 1931-1960, pour les stations de Quixeramobim (Ceará), Matam (Sénégal) et Dori (Burkina Faso).

Tous les éléments qui précèdent conduisent à considérer le climat du sertão comme plus clément, moins altérant et moins agressif que celui du Sahel.

Tableau II - Valeurs moyennes annuelles de quelques paramètres climatiques de stations comparables des deux régions

	STATIONS	MOYENNE	MAXIMA	MINIMA
Température en °C	Quixeramobim	24,7	25,8	23,4
	Matam	37,0	42,6	33,0
	Dori	36,4	41,4	32,0
Humidité air en %	Quixeramobim	59,4	73,2	50,8
	Matam	47,0	71,0	26,0
	Dori	45,0	77,0	22,0
			MAXIMA MENSUELS	
Évaporation en mm	Quixeramobim	1 764,2	198,8	
	Matam	3 291,4	444,8	
	Dori	3 817,6	460,6	

Période : 1931-1960. *Sources* : LEPRUN, 1986.
(Cette période est considérée comme relativement «humide» en Afrique de l'Ouest).

Histoire géologique et roches

La partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest étudiée ici comprend une portion de la vieille plate-forme cristalline, ou socle précambrien, et 2 des principaux bassins sédimentaires, celui de Taoudéni, d'âge primaire, et le bassin sénégalo-mauritanien, d'âge secondaire et tertiaire. Les formations du continental terminal, mises en place à la fin du Tertiaire, recouvrent en partie les formations plus anciennes.

L'absence du socle, entre le 15e et le 20e degré de latitude nord, empêche l'observation de sols développés sur roches cristallines au-dessus de l'isoyète 500 mm, ce qui

n'est pas le cas pour le Nordeste brésilien. Sur le socle, les roches les plus fréquentes sont les migmatites , les granites et les roches basiques ; sur les formations sédimentaires, ce sont les grès et les grès argileux. Pour plus de la moitié de sa surface, le Nordeste sec est constitué par les mêmes roches cristallines issues du socle précambrien unique lorsque les deux continents se trouvaient encore réunis. Les bassins sédimentaires ourlent les parties littorale et occidentale du socle qui occupe toute la partie centrale de la région. Outre les grès, les roches sédimentaires comprennent une portion non négligeable de calcaires et de schistes.

Si les roches sont très semblables, voire identiques, comme nous venons de le voir, l'histoire géologique postjurassique, après la séparation des deux continents, est différente. Alors que le socle africain, qui semble être demeuré très stable durant tout son passé, a permis la formation d'un épais manteau d'altération météorique lequel peut atteindre, par endroit dans le Sahel, plusieurs centaines de mètres , tous les spécialistes s'accordent pour constater que depuis la fin du Précambrien le bouclier oriental brésilien n'a cessé de s'élever épirogénétiquement. De ce fait, le socle affleure fréquemment et les altérations sont très peu épaisses.

Végétation

Selon les données de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (1975), seulement 5,3 % de la superficie de 3 des pays du Sahel (Sénégal, Mali et Burkina Faso) possèdent une couverture arborée et arbustive contre plus de 90 % pour la zone semi-aride de 3 des États du Nordeste (Pernambouc, Paraíba et Alagoas) (DUQUE, 1980).

Alors que la *caatinga* brésilienne est une véritable forêt basse et sèche, continue et souvent dense, de 2 à 5 m de hauteur, à strate graminéenne rare et à espèces ligneuses à dominante de légumineuses, la savane arborée et arbustive ouverte et les brousses tigrées contractées du Sahel sont constituées en grande partie d'une strate herbacée qui sèche rapidement après la saison des pluies. Très différentes, les densités de ligneux et les biomasses sont respectivement de plus de 17 000 individus.ha^{-1} et de 23 t.ha^{-1} dans la caatinga (HAYASHI, 1981) alors que ces chiffres tombent à 133 individus.ha^{-1} et 1,8 t.ha^{-1} au Sénégal (LAMOTTE et BOURLIERE, 1978), pour des pluviométries comparables.

Milieu humain

Essentiellement rurales, les 2 régions ont une même densité moyenne de 16 habitants au kilomètre carré, mais les facteurs socio-économiques et les pratiques culturales y sont bien différents. En Afrique sèche, l'agriculture, extensive, manuelle, est menée de façon traditionnelle. Les villages de culture se déplacent après quelques années et laissent derrière eux les terrains en jachère. Le brûlis annuel avant culture et la monoculture sont généralisés. L'élevage transhumant est en particulier pratiqué par des pasteurs peul.

Dans le sertão, la population est métissée de portugais et d'indiens. L'agriculture et l'élevage, qui ne sont pas itinérants, se complètent au sein de propriétés délimitées et interdites d'accès. Les pratiques culturales les plus communes sont le labour à la main, ou à la traction animale légère, selon la ligne de plus grande pente, et les cultures associées (haricot, maïs et coton, par exemple). La pratique du brûlis, rare, n'est pas annuelle. Contrairement à l'Afrique, l'usage du charbon de bois n'est pas généralisé dans le Nordeste brésilien, bien qu'il y soit produit artisanalement car le gaz est distribué jusque dans les endroits les plus éloignés.

Au niveau agricole, comme au niveau de la géologie, l'histoire des 2 régions est très différente ; les premières cultures, notamment celle de la canne à sucre sur la côte du

Nordeste brésilien, ont commencé il y a 400 ans. Dans la zone semi-aride, elles sont apparues bien plus tard. Dans le Sahel en revanche, les activités humaines, agricoles et pastorales, ont près de 4 000 ans ; la pratique du défrichement par le feu et la métallurgie artisanale datent de plus de 2 000 ans. En Afrique occidentale sèche, 1 fosse pédologique sur 3 contient des charbons de bois et des débris de poteries ; cela n'arrive pratiquement jamais dans le sertâo.

FACTEURS DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE L'HYDROGÉOCHIMIE

Eaux de pluie

Alors que les valeurs d'intensité-durée des pluies pour les mêmes pluviométries sont proches dans les 2 régions, les très fortes pluies annuelles et les pluies exceptionnelles du Sahel fournissent des valeurs bien plus élevées que celles de leurs homologues brésiliennes. De fait, les pluies du Sahel sont plus agressives que celles du sertâo (LEPRUN, 1981). Le rapport du facteur de l'érosivité des pluies de WISCHMEIER et SMITH (1958) sur la pluviométrie moyenne annuelle, qui varie de 0,20 à 0,50 avec une moyenne de 0,33 au Brésil, se situe autour de 0,50 en Afrique sèche (ROOSE, 1977). Comme les sols africains sont bien moins perméables, nous le verrons plus loin, que ceux du Nordeste, les eaux de pluies sahéliennes, pour des intensités-durées semblables, ont tendance à ruisseler alors que celles du Nordeste s'infiltrent.

Eaux de ruissellement

Les taux de ruissellement des eaux de pluie sont considérablement plus élevés dans les zones sahéliennes que dans le sertâo. Dans cette zone, les études de la Sudene (CADIER *et al.*, 1982 ; CADIER et CAMPELLO, 1983 ; LEPRUN, 1983 ; VIERA *et al.*, 1983) ont mis en évidence des coefficients d'écoulement moyens inférieurs à 5 % de la pluviométrie, y compris pour des bassins à modelé accentué. Dans le Sahel, les données recueillies par les hydrologues de l'ORSTOM et, en particulier, celles de CHEVALLIER (1982) à Oursi sous une pluviométrie moyenne annuelle de 450 mm, indiquent des taux de ruissellement, en moyenne supérieurs à 25 %, qui pouvent atteindre 60 % pour des pentes de 1 à 3 % au maximum, donc bien plus forts que ceux du sertâo (LEPRUN, 1986).

Charges solides et sédiments

Pour des sols et des pentes semblables ou proches, si un examen de l'ensemble des données obtenues sur parcelles, nues ou cultivées, d'une superficie unitaire de l'ordre de la centaine de mètres carrés, ne fournit pas de différences fondamentales des masses érodées et entraînées, en revanche les petits bassins sahéliens sous végétation naturelle perdent plus de terre par érosion que leurs homologues nordestins. Quelques exemples sont cités par LEPRUN (1986).

Retenues d'eau superficielle

Ces retenues intéressent surtout la région Nordeste, car les réservoirs artificiels ou naturels sont rares dans les régions sahéliennes étudiées. Les réservoirs du sertâo - açudes ou barrages -, sont des retenues collinaires aménagées dans des dépressions et des vallées du modelé des zones de roches cristallines dont les fissures sont colmatées par le matériel fin sédimenté mais où persiste néanmoins, dans de nombreux cas, une certaine infiltration. Le barrage qui ferme un resserrement naturel de la vallée est généralement réalisé en terre compactée retirée des alluvions et altérations du lit ou des

berges. La roche saine est donc atteinte et l'eau qui s'accumule provient non seulement du ruissellement superficiel mais aussi de l'écoulement hypodermique des sols du bassin. On distingue 2 types d'açudes selon qu'ils sont publics ou privés. Si les premiers sont généralement de grande taille (plus de 100 millions de mètres cubes), les seconds, le plus souvent de l'ordre de 100 000 m³, peuvent n'atteindre que 20 000 m³. Au total, il en existe plusieurs milliers ; dans certaines régions leur densité dépasse 1 par 2 km² et leur nombre ne cesse de croître. En 1960, le DNOCS avait construit 987 açudes publics ou en coopération qui représentaient un volume stocké de 16 milliards et demi de mètres cubes d'eau. Aujourd'hui, ces chiffres sont probablement à multiplier par 3.

Fleuves et rivières

Les 2 régions possèdent chacune un réseau hydrographique constitué de 2 grands fleuves pérennes (Rio São Francisco et Rio Parnaíba au Brésil, Sénégal et Niger en Afrique de l'Ouest) qui recoivent des tributaires à écoulement temporaire. Plus long fleuve à régime temporaire du monde, le Rio Jaguariba, qui coule dans l'État du Ceará, possède un bassin de 74 000 km². De nombreux *riachos* et marigots ont des écoulements violents et brefs, de type oued ; quelquefois, ils ne coulent qu'à 1 ou 2 occasions par an et il arrive que leur écoulement se produise seulement sur une partie du cours. Dans le Nordeste, le chevelu hydrographique est plus dense que dans le Sahel. Les raisons principales en sont les conditions édaphiques :

- d'une part, en Afrique, présence d'une couverture sédimentaire généralement perméable et gréseuse, de sables dunaires fixés et d'un manteau épais d'altérations ;
- d'autre part, dans le Nordeste : sols peu épais sur cristallin.

Les zones endoréiques, qui se localisent dans la boucle du Niger et le Nord du Burkina Faso, ne sont pas présentes dans le sertão.

Nappes profondes

Les roches du socle oriental brésilien ne possèdent pas de nappes profondes importantes, d'où la nécessité et la profusion des açudes. Seules, quelques zones de failles et de diaclases denses localisées fournissent des nappes d'importance réduite. Dans le Sahel, les formations sédimentaires constituent des roches magasins pour des nappes phréatiques de grande capacité comme dans le Gourma malien (Reichelt, 1960). Les altérations profondes du socle occidental africain (Leprun, 1979 ; Pion, 1979 ; Blot, 1980) ne fournissent que des nappes perchées de volume réduit.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Principaux sols et leurs caractéristiques

Principales classes de sols du Sahel

La carte des sols, au 1/500 000, de *l'Atlas international de l'Ouest africain* (Boulet *et al.*, 1971) permet une visualisation rapide des grandes classes de sols réparties sous climat sahélien. Du nord vers le sud à la verticale du méridien international, on passe successivement :

- à un premier groupe constitué de sols minéraux bruts d'apport et d'ablation sur sables dunaires ou sur regs (lithosols), de sols peu évolués ou peu différenciés d'éro-

sion ou d'apport sur les mêmes matériaux et aussi sur cuirasses et carapaces ferrugineuses plus ou moins démantelées et de sols bruns subarides ;

- à un groupement de sols peu évolués et de lithosols associés à des sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés de solonetz solodisés ou non et de sols bruns eutrophes ;
- à des sols ferrugineux tropicaux lessivés, des vertisols, des sols bruns eutrophes vertiques ou non et des sols hydromorphes minéraux.

La pédogenèse développée sur les sables dunaires et sur le socle suit donc un certain gradient latitudinal climatique, et les sols deviennent de plus en plus différenciés et évolués du nord vers le sud. La succession de différenciation la plus nette concerne les sols ferrugineux et les sols bruns. On peut donc parler d'une certaine zonalité de la répartition des sols. Sur l'épais manteau d'altération kaolinique, hérité de périodes anciennes plus humides, la pédogenèse, oblitérée par la marque de cet héritage, ne parvient pas à se différencier en fonction de la pluviométrie.

LES PRINCIPALES CLASSES DE SOLS DU NORDESTE

Établie par le SNLCS de l'Embrapa en 1981, la carte des sols, au 1/5 000 000, du Brésil fournit la composition et la répartition des grandes classes de sols du Nordeste sec. Du nord vers le sud, de part et d'autre du 40e méridien ouest, on trouve, sans aucun gradient latitudinal de succession, la juxtaposition des classes suivantes de sol :

- sur les roches du socle, des planosols, des sols bruns eutrophes non calciques vertiques ou non, des lithosols et régosols, des sols podzoliques rouges et jaunes distrophes et eutrophes, des sables quartzeux, des brunizens, des vertisols lithomorphes, des solonetz solodisés, des cambisols ;
- sur les roches sédimentaires et sur les couvertures sableuses détritiques, des sols sableux quartzeux, des latosols jaunes et rouges jaunes distrophes et aluminiques, des sols hydromporphes minéraux ;
- sur les calcaires des rendzines, des cambisols et des latosols rouges sombres.

Á ce niveau des interprétations, une mise au point, qui concerne les sols de la classification brésilienne actuellement en cours d'élaboration (CAMARGO *et al.*,1987) devient nécessaire. En effet, lorsque l'on parcourt les noms des classes des sols brésiliens, on observe que certains sont identiques ou très proches de ceux de la classification française : il s'agit des sols bruns eutrophes, des vertisols et des solonetz. Ces sols des deux régions sont tout à fait comparables entre eux. Par ailleurs, d'autres ont des noms et des morphologies qui permettent de les rapprocher ; c'est le cas, par exemple, des latosols qui s'apparentent aux sols ferrallitiques africains. C'est également le cas avec les planosols ou les régossols et les lithosols, à la différence près que ces derniers, au Brésil, sont des sols peu évolués, développés à partir des roches désagrégées, et non des cuirasses et carapaces ferrugineuses, comme c'est le cas en Afrique. Certains, en revanche, ont des noms, des morphologies et des pédogenèses suffisamment différents pour empêcher tout rapprochement. En particulier, il s'agit des sols podzoliques qui n'ont rien de commun avec les sols du même nom dans la classification française et qui, en outre, sont absents de la zone semi-aride occidentale africaine ; de même, les sols ferrugineux n'ont-ils pratiquement jamais été reconnus dans le Nordeste. C'est également le cas des brunizens et des cambissols, issus de la classification américaine, qui n'ont pas d'homologues sahéliens.

Dans l'ordre décroissant des superficies couvertes par les diverses classes de sols du Nordeste, on trouve successivement les latosols (34 %), les sols podzoliques eutrophes

(11,7 %), les sols litholiques (11,3 %), les sols sableux quartzeux (11,1 %), les sols bruns non calciques (6,5 %), les sols podzoliques distrophes (4,8 %), les planosols (4,1 %), les cambisols (3,2 %), les solonetz (1,1 %), les vertisols (0,2 %) etc. Si l'on considére seulement la région semi-aride, cet ordre devient le suivant : latosols, sols litholiques, sols bruns non calciques, sols podzoliques eutrophes, planosols, cambisols, etc.

Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols

Les déterminations analytiques de 2 classes de sols semblables, développées sur les roches du même socle précambrien, seront juxtaposées de manière à pouvoir comparer les caractéristiques physico-chimiques des sols des 2 régions. Il s'agit des sols bruns vertiques (sols bruns eutrophes tropicaux vertiques de l'Afrique de l'Ouest et sols bruns non calciques vertiques du Nordeste brésilien) et des vertisols lithomorphes. Les déterminations concernant les sols bruns sont présentées dans le tableau III.

L'examen de ce tableau met en évidence l'analogie des 2 sols et confirme la validité du taxon. Il vérifie la plus grande richesse chimique des sols bruns du Nordeste. Les taux de matière organique de ces sols sont plus de 2 fois supérieurs ; les teneurs en potassium et la somme des cations échangeables de l'horizon A sont plus élevées que celles de leurs homologues africains, et ce, pour des taux d'argiles inférieurs. Les mêmes constatations peuvent être faites pour l'horizon B, à l'exception du taux de potassium et de la capacité d'échange liée au taux d'argile plus faible.

Les moyennes des déterminations relatives à l'horizon A des vertisols lithomorphes sont consignées dans le tableau IV. On vérifie que la totalité des caractéristiques chimiques de l'horizon supérieur des vertisols nordestins est plus favorable que celle des vertisols sahéliens. Les taux de matière organique, d'azote, de potassium, la somme des cations et la capacité d'échange, sont plus élevés, le taux de saturation et le pH restant du même ordre.

Si l'on compare les résultats analytiques de 2 sols bruns vertiques de texture semblable mais d'épaisseur différente (tabl. V), le premier, prélevé à Oursi, au Burkina Faso (pluviométrie annuelle de 450 mm, roche mère : migmatites et ortho-gneiss) (Leprun, 1979), le second, prélevé à Sumé, dans la Paraíba (pluviométrie annuelle de 550 mm, sur migmatites), on observe que la richesse chimique du sol brun de Sumé est bien plus élevée que celle du sol d'Oursi. Les teneurs en matière organique, en calcium, en cations échangeables (Ca+Mg+K+Na), le taux de saturation et la capacité d'échange du sol du sertâo sont supérieurs à ceux du sol sahélien. L'indice de stabilité structurale Is de Hénin et le test de perméabilité K fournissent des informations intéressantes sur les qualités physiques des 2 sols en présence. En fonction des normes établies à partir des données de nombreux sols, les valeurs de log 10Is et de log 10K attribuent au sol de Sumé une bonne structure et une bonne perméabilité, tandis que le sol d'Oursi se caractérise par une mauvaise stabilité structurale et une perméabilité médiocre à mauvaise. Les effets de ces différences de qualités physiques sur le comportement hydrodynamique seront analysés plus loin.

Dans le tableau VI, ont été relevées les moyennes des principaux paramètres analytiques d'un grand nombre de sols (plus de 300) qui appartiennent aux principales classes de sols du Nordeste et qui vont des épais latosols kaoliniques aux sols montmorillonitiques peu épais.

L'examen de ce tableau permet de mettre en évidence, une fois encore, la bonne fertilité chimique moyenne de l'ensemble des sols du Nordeste brésilien. Un même

Tableau III - Valeurs de quelques paramètres physicochimiques des sols bruns vertiques des deux régions étudiées

		HORIZON A		HORIZON B	
		Nordeste (N = 48)	Sahel (N = 23)	Nordeste (N = 46)	Sahel (N = 23)
Argile %	Maxima	50,0	37,3	69,0	43,0
	Minima	7,0	16,8	21,7	15,0
	Moyenne	*19,5*	*27,3*	*35,3*	*40,9*
Matière organique (%)	Maxima	5,8	1,3		
	Minima	0,3	0,7		
	Moyenne	*2,1*	*1,0*		
C/N	Maxima	14,3	12,4		
	Minima	9,4	10,6		
	Moyenne	*11,2*	*9,8*		
K20 (mé)	Maxima	1,38	0,53	0,23	1,22
	Minima	0,09	0,16	0,09	0,02
	Moyenne	*0,42*	*0,31*	*0,15*	*0,18*
S (mé)	Maxima	19,3	25,7	25,9	32,4
	Minima	10,0	1,7	11,8	4,0
	Moyenne	*13,8*	*10,5*	*22,4*	*19,1*
T (mé)	Maxima	19,8	25,7	24,5	33,6
	Minima	11,4	3,5	12,7	6,8
	Moyenne	*14,6*	*12,4*	*19,4*	*21,1*
S/T (%)	Maxima	98,2	100	100	100
	Minima	85,5	49,0	89,2	51,9
	Moyenne	*92,7*	*83,2*	*96,2*	*89,3*
pH	Maxima	7,8	8,1	8,6	8,4
	Minima	6,6	5,0	6,6	5,0
	Moyenne	*7,2*	*6,4*	*7,6*	*6,4*

Sources : données sahéliennes : BOULET, 1968 ; BOULET et LEPRUN, 1970 ; données brésiliennes : Brasil, 1971, 1972, 1973 et Embrapa/SNLCS, rapports pédologiques de 7 États du Nord-Est (1971, 1972, 1973, 1975, 1976, 1977).

examen des sols sahéliens à partir de l'ensemble des rapports pédologiques établis par l'ORSTOM dans cette zone fournit des fourchettes de valeurs dont la moyenne estimée n'est, pour ce qui concerne les taux de matière organique et la somme des cations échangeables que de la moitié environ de ceux du tableau VI.

Tableau IV - Valeurs de quelques paramètres physicochimiques de l'horizon A des vertisols des deux régions étudiées

		NORDESTE (N = 10)	SAHEL (N = 11)
Argile (%)	Maxima	68,0	50,8
	Minima	30,9	15,9
	Moyenne	*45,6*	*30,7*
Matière organique (%)	Maxima	9,90	1,63
	Minima	0,88	0,58
	Moyenne	*3,27*	*1,23*
N (%)	Maxima	0,36	0,30
	Minima	0,08	0,05
	Moyenne	*0,19*	*0,10*
C/N	Maxima	11,0	15,7
	Minima	8,0	11,7
	Moyenne	*9,7*	*13,2*
K20 (mé)	Maxima	1,80	0,35
	Minima	0,15	0,09
	Moyenne	*0,68*	*0,17*
S (mé)	Maxima	52,6	33,9
	Minima	18,2	7,1
	Moyenne	*33,7*	*17,2*
T (mé)	Maxima	47,0	32,5
	Minima	19,0	9,0
	Moyenne	*35,0*	*17,8*
S/T (%)	Maxima	100,0	100,0
	Minima	37,0	78,0
	Moyenne	*90,0*	*91,0*
pH	Maxima	8,4	8,8
	Minima	6,6	6,8
	Moyenne	*7,3*	*7,3*

Sources : les mêmes que pour le tableau III.

Les données du tableau VII, issues d'un travail antérieur (LEPRUN, 1986) permettent de comparer quelques caractéristiques moyennes des horizons supérieurs des sols des 2 régions et de confirmer la meilleure fertilité chimique et la meilleure qualité physique des sols du Nordeste semi-aride.

Tableau V - Comparaison des caractéristisques analytiques de l'horizon A des sols bruns vertiques de Oursi (Burkina Faso) et de Sumé (Paraíba)

	SUMÉ (Paraíba)	OURSI (Burkina)
Argile (%)	32,0	33,5
Sables grossiers (%)	21,0	18,8
Matière organique (%)	4,6	0,7
Carbone (%)	2,77	0,40
Azote (%)	0,23	0,24
C/N	12,0	15,9
pH eau	6,7	7,7
Ca (mé)	18,54	10,0
Na (mé)	0,49	0,69
S (mé)	29,21	18,06
T (mé)	31,99	18,24
S/T (%)	91	99
log 10 is	1,30	1,65
log 10 K	1,47	1,17
Profondeur du sol (cm)	70	190
Profondeur de l'horizon A (cm)	10	22

Sources : Oursi : LEPRUN (1977), SUMÉ : LEPRUN *in* CADIER *et al.* (1982).

Tableau VI - Moyennes des paramètres analytiques de sols sous *caatinga*

	HORIZON A (N = de 403 à 485)		HORIZON B (N = de 299 à 345)	
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Epaisseur (cm)	16,5	9,5	37,1	23,5
pH eau	6,0	0,9	5,8	1,1
Carbone (%)	1,05	1,5	0,34	0,20
Azote (%)	0,15	0,9	0,05	0,02
C/N	9,6	2,0	6,7	2,1
Matière organique (%)	1,8		-	-
Ca (mé)	5,6	7,1	5,1	5,2
Mg (mé)	2,0	2,4	4,2	4,1
K (mé)	0,4	0,5	0,2	0,2
Na (mé)	0,1	0,3	0,5	1,3
S (mé)	7,3	8,8	9,0	8,6
T (mé)	9,2	8,5	10,7	8,4
S/T (%)	67,2	26,2	70,0	28,1
Phosphore assimilable	7,1	12,8	2,3	5,2

Sources : ensemble des rapports des cartes pédologiques établis par le SNLCS de l'Embrapa dans les 7 États du Nordeste brésilien.

Tableau VII - Quelques caractéristiques moyennes des horizons supérieurs des sols du Nordeste brésilien et du Sahel occidental africain

	NORDESTE	SAHEL
Granulométrie	Argilo-sableux	Sablo-argileux
Matière organique (%)	0,5 - 4,0 (2,0)*	0,3 - 1,5 (0,7)*
Calcium échangeable (mé/100 g)	5,0 - 10,0	0,5 - 2,0
Perméabilité ($mm.h^{-1}$)	élevée 50 - 400	faible 15 - 25
Structure	fragmentaire	massive
État de surface	non pelliculaire	pélliculaire

* le chiffre entre parenthèses indique la valeur la plus communément rencontrée.

CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES COMPARÉS DES SOLS

Il a été montré plus haut que la moyenne des coefficients de ruissellement des bassins versants du Nordeste semi-aride atteint à peine 5 % de la pluviométrie, alors que ceux du Sahel dépassent le plus souvent 25 %. Les données de perméabilité et de taux d'infiltration des sols des 2 régions sont peu nombreuses ; aussi est-il intéressant de comparer les résultats des mesures obtenues sous pluies simulées à l'aide du même appareil, l'infiltromètre à aspersion conçu par l'ORSTOM (ASSELINE et VALENTIN, 1978 ; CASENAVE, 1982 ; CHEVALLIER, 1982) sur sols bruns vertiques, de part et d'autre de l'Atlantique. Les 2 stations semi-arides choisies sont celles de Sumé (Paraíba) et d'Oursi (Burkina Faso) dont les analyses (tabl. V) ont montré l'analogie des sols. Les résultats des pluies simulées d'Oursi sont tirés du travail de CHEVALLIER (1982) ; ceux de Sumé proviennent du rapport d'ATP CNRS (AUDRY *et al.*, 1987), dont les études ne sont pas encore terminées.

Ces résultats ont été regroupés dans le tableau VIII.

Pour des conditions expérimentales très semblables, on vérifie que la hauteur des pluies d'imbibition, qui représente la hauteur d'eau qui s'infiltre avant le premier ruissellement, sur sol nu et sous végétation, est considérablement plus élevée à Sumé (environ 8 fois plus). Alors que le taux de ruissellement, sur sol sec en fin de saison sèche, après la première pluie, est toujours nul à Sumé, il avoisine 30 % à Oursi, aussi bien sur parcelle nue que sous couvert végétal. À Sumé, sur une jachère de cinq ans, il a fallu appliquer 203 mm en deux jours, avec une intensité de 63 $mm.h^{-1}$, pour obtenir un ruissellement de 2 mm à peine tandis qu'à Oursi, avec la même intensité, une seule pluie de 40 mm a provoqué un ruissellement de 13 mm.

Ces chiffres prouvent les différences fondamentales de qualités physiques de surface des 2 sols bruns et sont précieux pour comprendre le processus de la minéralisation différente des eaux superficielles des deux régions sèches.

Tableau VIII - Résultats des ruissellements et infiltrations sous pluies simulées

	OURSI	SUMÉ
Conditions expérimentales		
Pente (%)	1 à 1,5	2 à 4
Pluie de récurrence annuelle (mm)	40	48
Intensité moyenne de la pluie ($mm.h^{-1}$)	60	48
Résultats		
Parcelle 1 m^2 nue		
Pluie d'imbibition (mm)	6,2 à 8,4	> 48*
Taux de ruissellement efficace (%) après la première pluie	30,0 à 32,0	0
Parcelle 1 m^2 sous végétation		
Pluie d'imbibition (mm)	11	96
Taux d'infiltration efficace (%) après une pluie de 1 h à 60 $mm.h^{-1}$	29,9	0

* pluie dont les intensités successives sont : 10 min à 45 $mm.h^{-1}$, 5 min à 110 $mm.h^{-1}$, 15 min à 60 $mm.h^{-1}$, 15 min à 40 $mm.h^{-1}$, 15 min à 25 $mm.h^{-1}$.

Tableau IX - Compositions des différentes eaux des deux régions

	pH	Ca	Mg	K	Na	C1	S04	C03H
		<----------mg.1^{-1}---------->						
Les eaux de ruissellement superficiel								
Sahélo-soudanien (N = 10) *	7,0	4,2	1,2	0,7	1,8	0,5	ND	24,8
Sertão (N = 6)**	7,1	6,2	1,5	4,3	0,7	1,2	2,5	24,4
Les eaux des rivières								
Sahélo-soudanien (N = 29) *	7,4	7,3	3,9	2,2	3,1	1,4	ND	50,5
Sertão (N = 27) **	7,2	23,8	19,2	5,5	79,7	157,5	8,9	81,3
Eaux de réservoirs								
Açudes du sertão (N = 364) **	7,7	25,9	12,7	9,6	53,7	80,9	7,1	117,9
Eaux des nappes profondes								
Afrique sahélienne (N = 11) ***	6,9	19,7	13,7	8,3	20,5	13,1	10,7	75,0
Sahélo-soudanien (N = 101) *	6,8	7,3	3,9	2,2	3,1	1,4	ND	50,5
Sertão (N = 32) **	7,6	79,0	41,8	9,2	103,0	96,6	37,3	270,0

Sources : * BLOT (1970 et 1980) ; ** LEPRUN (1983) ; *** LEPRUN (1979).

Tableau X - Variations de la composition des eaux en fonction de la percolation à Sumé (sertão de la Paraíba)

	pH	Ca	Mg	K	Na	CL	S04	C03H
		<----------mg.1^{-1}---------->						
pluie	7,3	1,1	0,3	0,8	0,5	2,0	0,0	3,0
pluie sous caatinga	8,3	3,2	0,8	0,7	1,3	3,0	4,3	11,0
ruissellement bassin	7,1	6,4	0,5	3,0	0,8	2,2	0,0	24,4
ruissellement nu	7,8	15,2	12,1	5,0	1,7	20,0	0,5	81,0
açude saison humide	7,0	20,8	16,0	6,6	37,0	60,0	8,6	144,0
açude saison sèche	7,5	19,2	28,2	9,2	75,0	120,0	10,7	202,5
puits profond	7,5	104,0	72,9	7,6	96,0	180,0	69,5	531,9

Eaux et caractéristiques des eaux

Caractéristiques physico-chimiques des eaux de pluie

Une analyse des rares données sur les caractères physico-chimiques des eaux de pluie des 2 régions indique :

- des minéralisations assez différentes pour diverses localisations du sertão. Ainsi, la moyenne des analyses fournit les valeurs suivantes :
  - * à Sumé dans le sertâo de la Paraíba, pour 8 pluies :
    - Ca = 1,70 ; Mg = 0,46 ; K = 0,64 ; Na = 0,93 ; Cl = 2,65 ; SO4 = 2,67 mg.l^{-1} (Leprun, *inédit*),
  - * à Pétrolina dans le sertâo du Pernambouc, pour 12 eaux de pluie :
    - Ca = 0,15 ; Mg = 0,11 ; K = 0,02 ; Na = 0,02 ; Cl = 0,09 ; SO4 = 0,04 mg.l^{-1} (Fotius *et al., inédit*) ;
- en Afrique, une moyenne de :
  - Ca = 1,24 ; Mg =0,18 ; K = 0,14 ; Na = 0,32 ; Cl = 0,40˜; SO4 = 1,55 mb.l^{-1} (Tardy, 1969 ; Roose, 1980 ; etc.).

La raison de la différence des compositions des eaux de pluies du sertâo pourrait être la continentalité différente des zones de prélèvement des études des teneurs en éléments majeurs des pluies nordestines (Buat-Menard *et al.*, 1974) qui montre une influence des aérosols marins et la décroissance graduelle de ces teneurs du littoral vers l'intérieur.

Faute de plus d'informations, la composition des eaux de pluies des 2 régions sera considérée comme identique.

Caractéristiques physico-chimiques des eaux des 2 régions

Les compositions successives des eaux des 2 régions depuis l'arrivée au sol des eaux de pluies, leur premier ruissellement superficiel, leur écoulement dans les

rivières, leur stockage dans les réservoirs et leur infiltration et accumulation dans les nappes profondes des roches, sont consignées dans le tableau XI.

Tableau XI - Quelques caractéristiques des eaux de ruisseaux à écoulement temporaire d'une même région à sols différents dans le sertão de l'État de Sergipe

N° de l'échantillon	Classe de sol dominant	pH	Cond. (*)	Na	K	Cl	S04
				<-------mg.1^{-1}------>			
147	Litholique	8,5	1756	154,4	4,0	450,9	30,0
120	Planosol solodisé	7,7	1709	180,0	8,3	381,0	20,5
126	Podzolique eutrophe	7,4	368	38,9	4,5	75,7	16,5
130	*idem*	6,9	53	4,8	0,6	13,8	4,0
119	Sables quartzeux	6,0	71	12,3	0,2	17,2	3,2

Sources : LEPRUN (1983). * = en micromhos. cm^{-1}.

Á partir des eaux de pluies qui ont été considérées en première analyse comme chimiquement identiques dans les zones sèches des deux continents, l'examen de l'évolution de ces compositions en surface, puis en profondeur, permet de mettre en évidence, dans le sertão, une minéralisation croissante et rapide des eaux dans le temps et dans l'espace. En revanche, le même cheminement ne fait pas varier de manière notable la minéralisation des eaux sahéliennes. Alors que les eaux de ruissellement superficiel issues de la première concentration des eaux de pluies ont pratiquement la même composition chimique, les eaux du Nordeste semi-aride se chargent de plus en plus en sels dissous à mesure que l'écoulement se prolonge et que l'infiltration s'approfondit. Les élévations les plus spectaculaires concernent les teneurs :

- en Na et en Cl, qui sont multipliées par 100 et plus lorsque les eaux atteignent les nappes fissurales ;
- en Ca, Mg et CO3H, qui accusent des augmentations de 10 à 20 fois.

Les taux de K et de S04 augmentent de manière beaucoup plus lente.

Les données du tableau X ont été recueillies à Sumé et concernent des eaux de différentes natures. Elles ont été collectées au même endroit sur le bassin expérimental constitué de sols bruns vertiques associés à des sols bruns non vertiques et à des taches de vertisols développés sur migmatites et gneiss (CADIER, FREITAS et LEPRUN, 1983a et b), en mai 1982 ; une eau de l'açude a été prélevée en saison sèche (février 1982).

L'augmentation rapide des concentrations, avec la distance parcourue en surface et vers la profondeur, telle qu'elle apparaît à l'observation des valeurs de tous les éléments, à l'exception du potassium, renforce encore la constatation précédente du rôle prépondérant de la circulation interne dans les sols et dans les roches sur la minéralisation des eaux du socle cristallin nordestin.

Un dernier exemple (tabl. XI ; fig. 2), issu d'un travail antérieur (LEPRUN, 1983), va illustrer le rôle du type de sol sur la qualité de l'eau superficielle dans le Nordeste semi-aride.

La figure 2 fournit la localisation géographique des sols et des prélèvements d'eaux du tableau IX et montre qu'il y a moins de 4 km entre les 2 prélèvements les plus éloignés. Les sols qui contiennent le plus de minéraux altérables et qui sont les plus riches chimiquement donnent naissance aux eaux les plus minéralisées.

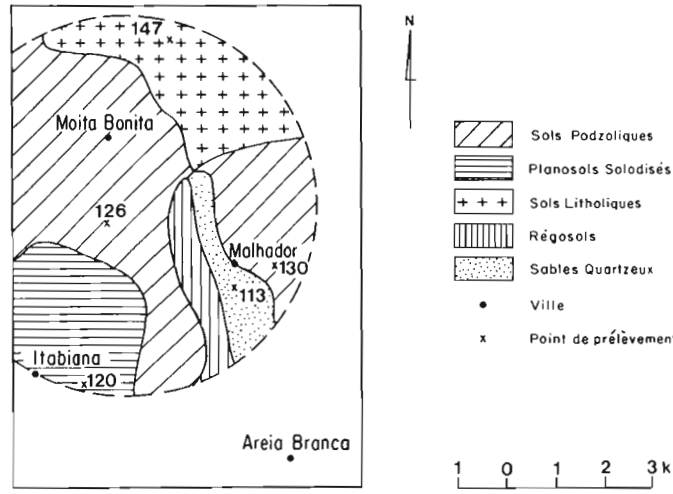


FIGURE 2 - *Localisation des prélèvements d'eaux en fonction des sols.*

CONCLUSIONS

Après avoir passé en revue les différents facteurs de la pédogenèse et du devenir des eaux pluviales dans les 2 régions semi-arides, il convient de dégager les analogies et les particularités des sols et des eaux de ces 2 régions, objectif de ce travail.

Dans la première partie, il a été établi qu'à partir de roches identiques d'un même socle cristallin originel et de roches sédimentaires diverses, les sols des 2 régions sèches étudiées présentaient :

- des morphologies semblables, vertisols, sols bruns, solonetz, rendzines ;
- des sols morphologiquement proches, latosols-sols ferrallitiques, régosols et sols litholiques-sols peu évolués et lithosols ;
- des sols morphologiquement différents, sols podzoliques, sols ferrugineux tropicaux, cambisols et brunizens.

Bien qu'un peu différentes et plus accentuées en Afrique de l'Ouest, les conditions des facteurs climatiques actuelles ne peuvent suffire à expliquer les différences morphologiques importantes lorsqu'elles existent. Plus accentué, le relief du Nordeste brésilien permet de comprendre en partie le soutirage plus important des solutions internes des sols de cette région. Les vertisols lithomorphes, par exemple, sont moins épais et ne présentent qu'exceptionnellement des nodules calcaires (plaines de l'État de Bahia), alors que la concentration de ces nodules est l'une des caractéristiques des vertisols du Sahel. Si les différences de nature et de densité du couvert végétal reflètent les conditions différentes de climat et des fertilités chimique et physique des sols, elles ne semblent pas pouvoir expliquer la présence de sols de classes différentes.

En revanche, plusieurs facteurs majeurs de différenciation pédologique se dégagent de l'ensemble des considérations de l'analyse précédente. En toute première place apparaît l'histoire géologique postjurassique et la tectonique, responsables de la faible épaisseur du manteau d'altération et des sols du Nordeste. De ce fait unique, moteur puissant de la géodynamique externe, découlent d'importantes conséquences qui différencient les 2 régions :

- au Nordeste :
  - drainage externe limité par la bonne perméabilité des sols et par la quasi-absence de pellicules de battance, bon drainage interne favorisé par la structure du sol et par la densité de la couverture végétale,
  - soutirage continu des solutions,
  - sur le socle cristallin, altérations faibles ou nulles, sols peu épais, riches en minéraux altérables, présents quelquefois jusqu'en surface et qui montrent une faible altéroplasmation,
  - argilification de type mixte mono- et bisiallitique,
  - absence quasi totale de formations ferrugineuses carapacées et cuirassées,
  - les sols podzoliques se développent sur des altérations peu profondes (1 à 3 m) de roches granitiques ou migmatitiques acides à moyennement basiques,
  - présence de latosols sur les couvertures sédimentaires,
  - juxtaposition de sols très différents au même endroit (sols peu évolués et latosols par exemple sous 400 mm) ;
- au Sahel :
  - socle stable depuis l'ère tertiaire,
  - drainage externe bon, favorisé par la présence très fréquente des pellicules et croûtes de battance,
  - drainage interne réduit ou nul,
  - manteau d'altération latéritique kaolinique et désaturé, très épais, surmonté de cuirasses et de carapaces ferrugineuses de très grande extension,
  - absence de sols ferrallitiques et gradient de différenciation latitudinale des sols ferrugineux sur les sédiments et sur les sables dunaires. Lorsque ce manteau kaolinique ancien est absent, les roches du socle fournissent les mêmes sols partiellement montmorillonitiques que dans le Nordeste. Sur ce manteau et sur les cuirasses ferrugineuses plus ou moins démantelées se développent des sols ferrugineux.

Comme cela a été observé pour les mesures obtenues sous pluies simulées et pour les coefficients de ruissellement des bassins hydrographiques, les sols du sertão infiltrent beaucoup plus que leurs homologues africains, et l'eau de pluie, qui va traverser sur le socle un sol peu épais, riche en minéraux altérables, et pénétrer dans les fissures et les diaclases de la roche, va se charger considérablement en sels dissous. Seront peu minéralisées en revanche, les eaux de pluie infiltrées en faible quantité dans les sols moins riches dépourvus de minéraux altérables et dans les épaisses altérations sahéliennes désaturées, et qui ruissellent sur des horizons sablo-argileux encroutés et peu perméables.

J.-C. LEPRUN, *pédologue*, représentation ORSTOM, CP 09747, 70001 Brasilia, Brésil
C. OLIVIER DA SILVEIRA, *pédologue*, Embrapa, SNLCS, 22460 Rio de Janeiro, Brésil

BIBLIOGRAPHIE

ASSELINE (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XV, n° 4 : 321-349.

AUDRY (P.), CADIER (E.), LEPRUN (J.-C.) et MOLINIER (M.), 1987. - Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux du sol. Rapport d'avancement des travaux. Rapp. multic. ATP-PIREN. Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. ORSTOM, Récife, juin 1987, 78 p., *multigr.*

BARRY (J.-P.), BOUDET (G.), BOURGEOT (A.), CELLES (J.-C.), COULIBALY (A.-M.), LEPRUN (J.-C.) et MANIERE (R.), 1983. - Étude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. Rapport ACC-GRIZA-LAT, minist. Recher. et Indust. Départ. Recherc. et technol. dans les zones trop. arides, 114 p.

BLOT (A.), 1970. - Les nappes phréatiques du Sénégal oriental. Données géochimiques sur les eaux. Rapp. ORSTOM, *multigr.*, Dakar, 34 p.

BLOT (A.), 1980. - L'altération climatique des massifs de granite au Sénégal. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 114, 434 p.

BOULET (R.), 1968. - Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord. Rapp. ORSTOM *multigr.*, Dakar, 351 p.

BOULET (R.) et LEPRUN (J.-C.), 1970. - Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. Rapp. ORSTOM *multigr.*, Dakar, 331 p.

BOULET (R.), FAUCK (R.), KALOGA (B.), LEPRUN (J.-C.), RIQUIER (J.) et VIEILLEFON (J.), 1971. - Carte pédologique au 1/5 000 000 de l'Afrique de l'Ouest avec notice explicative. Atlas intern. Ouest afric. Commission sci. techn. rech. OUA.

BRASIL, 1971. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Récife, 530 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 9.

BRASIL, 1972. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Recife, 683 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 8.

BRASIL, 1973a. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 16.

BRASIL, 1973b. - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Pernambuco. Recife, 359 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 14.

BUAT-MENARD (P.), TANURE (H.S.), RIBEIRO (A.) et SAKAI (T.) 1974. - Sources of Mg, K and Ca enrichment in coastal and inland precipitations over the Bahia state (Brazil). *J. Rech. Atmos.*, VIII ,(3-4) : 995-997.

CADIER (E.) et FREITAS (B.J.), 1982. - Bacia representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de agua. Campanhas de 1973 à 1980. Sudene, *ser. Hidrologia*, 14, Recife, 195 p.

CADIER (E.), FREITAS (B.J.) et LEPRUN (J.-C.), 1983a. - Bacia experimental de Sumé (PB). Instalações e primeiros resultados. *Sudene, ser. Hidrologia*, 16, Recife, 87 p.

CADIER (.E), FREITAS (B.J.) et LEPRUN (J.-C.), 1983b. - Bacia experimental de Sumé (PB). Instalações e primeiros résultados. V Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos. Blunmeneau, SC.

CADIER (E.) et CAMPELLO (S.), 1983. - Avaliação dos recursos hídricos de pequenas bacias do Nordeste semi-árido. V Simpósio brasileiro de hidrologia e Recursos hídricos. Blumeneau, SC.

CAMARGO (M.N.), KLANT (E.) et KAUFFMAN (J.H.), 1987. - Sistema brasileiro de classificação de solos. Separata do B. *Inf., Soc. bras. Ci. Solo, Campinas*, 12 (1) : 11-33.

CASENAVE (A.), 1982. - Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4 : 207-227.

CHEVALLIER (P.), 1982. - Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4 : 253-297.

COLLINET (J.) et LAFFORGUE (A.), 1979. - Mesure du ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques tupes de sols de Haute-Volta. Rap. ORSTOM, Ouagadougou, 129 p., 2 vol., *multigr.*

DUQUE (J.G.), 1980. - O Nordeste e as lavouras xerófilas. 3° éd. Mossoro, Escola sup. Agric. Fundação Guimaraes Duque, Coleção Mossoroense, 238 p.

EMBRAPA, 1975a. - Centro de pesquisas Pedológicas. Levantamento exploratorio - reconhecimento de Solos do Estado de Alagoas. Recife, (Boletim Técnico, 35). Sudene, *ser. Recursos de Solos*, 5, 532 p.

EMBRAPA, 1975b. - Centro de Pesquisas Pedologicas. Levantamento exploratorio - reconhecimento de Solos do Estado de Sergipe. Recife, (Boletim Técnico, 36). Sudene, *ser. Recursos de Solos*, 6, 506 p.

EMBRAPA, 1976. - Serviço nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento exploratorio - reconhecimento de solos da margem esquerda do Rio Sao Francisco - Estado de Bahia. Recife, (Boletim técnico, 38). Sudene, *ser. Recursos de Solos*, 7, 404 p.

EMBRAPA, 1977. - Serviço nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento exploratorio - reconhecimento de solos da margem direita do Rio Sao Francisco - Estado da Bahia. Recife, (Boletim técnico, 52). Sudene, *ser. Recursos de Solos*, 10, 735 p.

EMBRAPA/SNLS, 1981. - Mapa de solos do Brasil a 1/5 000 000.

FAO, 1975. - Formulation of a tropical forest cover monitoring project, FAO/UNEP. Rome.

HAYASHI (I.), 1981. - Plant communities and their environments in the caatinga of Northeast Brazil. *Latin American studies*, 2, Univ. Tsukuba Skura-mura Ibarahi, Japon.

LAMOTTE (M.) et BOURLIERE (F.), 1978. - Problèmes d'écologie : structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres. Paris, Masson.

LEPRUN (J.-C.), 1977. - Esquisse pédologique à 1/50 000 des alentours de la mare d'Oursi (Haute-Volta) avec notice et analyse des sols. ACC DGRST "Lutte contre l'érosion dans l'Oudalan (Haute-Volta). *Rapp. multigr.* ORSTOM, Paris, 53 p.

LEPRUN (J.-C.), 1978. - Compte-rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de «brousse-tigrées» dans le Gourma. *Rapp. multigr.* ORSTOM-DGRST., Dakar, 45 p.

LEPRUN (J.-C.), 1979. - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Thèse doctorat, Strasbourg, 1979 et *Mém. Sc. Géol.* Strasbourg, n°59, 224 p.

LEPRUN (J.-C.), 1981. - A erosão, a conservação e o manejo do solo no Nordeste brasileiro. Balanço, diagnostico e novas linhas de pesquisas. Sudene, *ser. Recursos de solos*, 15, Recife, 107 p. Carte annexe.

LEPRUN (J.-C.), 1983. - Relatório de fim de convénio de manejo e conservaçao do solo no Nordeste brasileiro (1982-1983). Rapport Sudene-ORSTOM, Recife, 290 p. 5 Cartes annexes.

LEPRUN (J.-C.), 1985. - La conservation des sols dans le Nord-Est brésilien. Particularités, bilan et perspectives. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*vol. XXI, n° 4 : 39-66.

LEPRUN (J.-C.), 1986. - Étude comparée des facteurs et des effets de l'érosion dans le Nordest du Brésil et en Afrique de l'Ouest. Colloque Nordeste-Sahel, Inst. Hautes études Amérique Latine, Paris, 10 p.

MENDES (B. V.), 1986. - Alternativas tecnológicas para a agropecuária do semi-árido. Ed. Nobel, São Paulo, 2e ed., 171 p.

Ministério da Agricultura, 1973a. - Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Brasil. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado da Pernambuco. Recife, 359 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 14.

Ministério da Agricultura, 1973b. - Departamento Nacional de Pesquisa agropecuária. Divisão de Pesquisa pedológica. Brasil. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. Sudene, *ser. Pedologia*, 16

NIMER (E.) 1979. - Climatologia do Brasil. IBGE, Rio de Janeiro, *Recursos Naturais e Meio ambiante*, 4, 421 p.

PIOGER (R.), 1964. - Ressources en eau du Nord-Est du Brésil : les eaux fluviales. Recife, Sudene-FAO, 11 p.

PION, (J.-C.), 1979. - L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en haute-Volta. Thèse Sci. Strasbourg et *Sci. Géol., Mém.*, 57, 220 p.

REICHELT (R.), 1972. - Géologie du Gourma (Afrique occidentale). Un seuil et bassin du Précambrien supérieur. *Mém. BRGM*, 53, 213 p.

ROOSE (E. J.), 1977. - Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest ; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 78, 108 p.

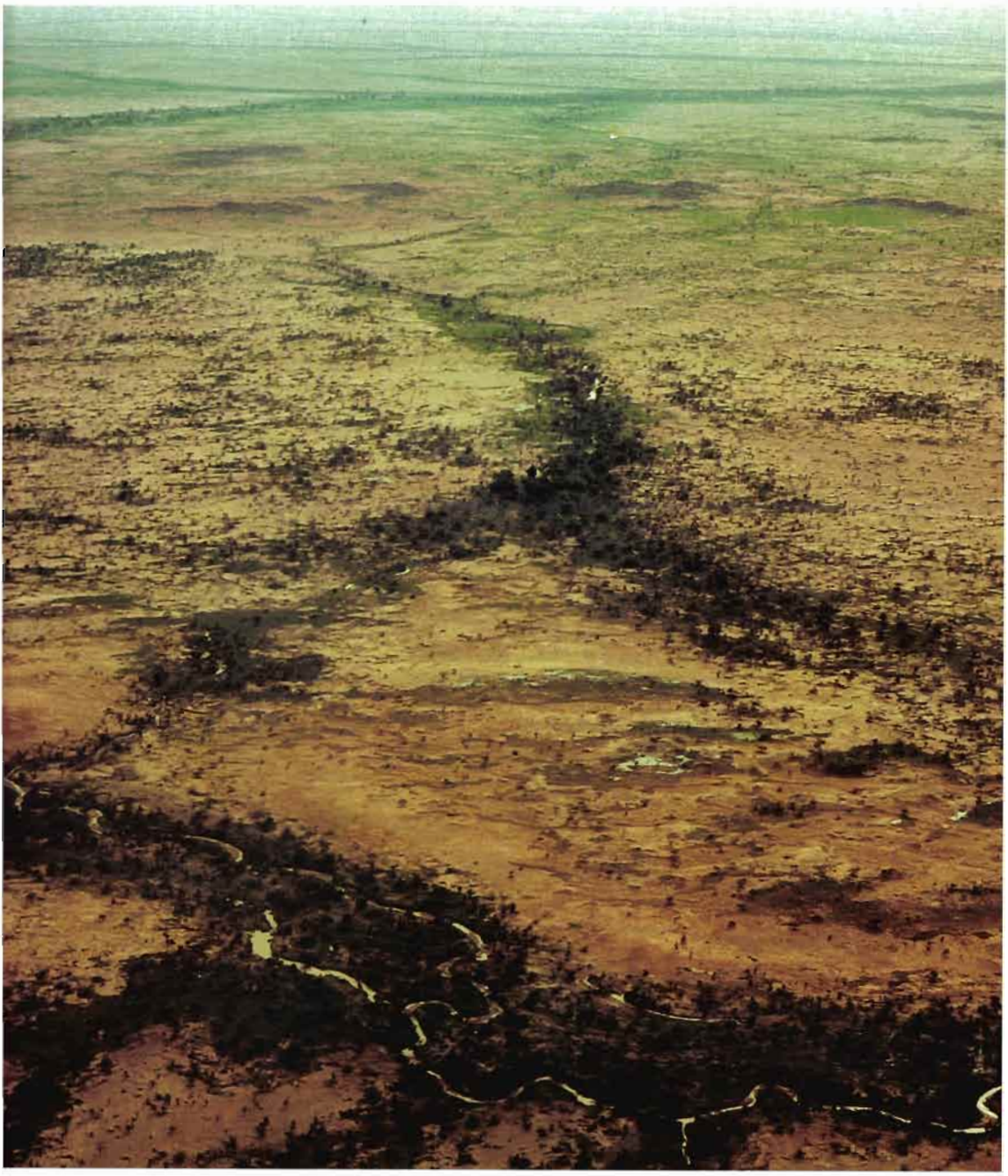
ROOSE (E. J.), 1980. - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse Doctorat, Univ. Orléans, 587 p.

TARDY (Y.), 1969. - Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.

VIEIRA (H. P. J.), CADIER (E.), LINS (M. J. A.) et ASSUNCAO (M. S.), 1983. - Descrição da rede de bacias representativas e experimentais do Nordeste brasileiro. V Simpósio brasileiro de Hidrologia e recursos hídricos. Blumenau, Sc.

WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1958. - Rainfall energy an its relation ship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union*, Washington, 39 : 285-291.

Deuxième partie



☜ *Photo* : P. MILLEVILLE
Axes de drainage dans la région de la mare d'Oursi, Burkina Faso

Interactions des facteurs du milieu et réponses biologiques à l'aridité

La deuxième partie de cet ouvrage comporte 16 articles qui, par leurs divers apports fondamentaux ou appliqués, tentent de décrire, d'expliquer, voire de prédire, quelques-unes des réponses biologiques à la sécheresse et à l'aridification du milieu. La plupart de ces articles suggèrent aussi les voies à suivre pour une gestion plus rationnelle des ressources en eaux et en terres.

Les 8 premiers articles mettent l'accent sur l'interaction entre végétaux et variables environnementales. Les auteurs ont le souci de traiter leurs sujets à divers niveaux d'organisation de la biosphère, de la production des ressources végétales, de l'utilisation de ces ressources, et dans des aires géographiques différenciées, principalement les zones arides d'Afrique (au nord et au sud du Sahara). L'accent est mis sur la variabilité des données recueillies, sur l'hétérogénéité des constituants physiques et biologiques, sur les réponses contrastées des végétaux en fonction de leurs diverses stratégies d'adaptation, et sur les risques des généralisations trop simplistes, ou trop hâtives, faute d'échantillonnage suffisant, ou faute de recherches sur les mécanismes et les dynamiques en jeu. Quelques-uns de ces articles apportent des arguments en faveur de choix méthodologiques.

4 articles traitent des conditions d'adaptation des animaux à l'aridité. Les modèles choisis concernent les rongeurs et les oiseaux. On appréciera aussi de trouver un exposé relatif à un invertébré et un exposé sur un animal domestique.

Enfin, 4 autres articles montrent comment la valorisation des ressources en eau et en terres pourrait être envisagée en évitant les risques de dégradation de l'environnement et en mettant en œuvre des projets de conservation des ressources renouvelables et de développement durable de l'espace rural.

Les relations plantes-environnement constituent un système complexe et évolutif dont certains paramètres peuvent être appréhendés par les données multitemporelles de la télédétection spatiale à faible résolution. L'interprétation de ces données ne peut se faire que sous certaines conditions que Bille *présente dans un premier article à partir d'expériences réalisées en Éthiopie et au Kenya à propos desquelles il combine*

des données fournies par le satellite Noaa, à faible résolution spatiale, et des données obtenues par radiométrie aéroportée ou au sol. Les anomalies liées à l'hétérogénéité spatio-temporelle des systèmes plantes-environnement sont mises en évidence, ainsi que celles qui résultent des facteurs de transmission dans la basse atmosphère. La méthode des indices de végétation peut apporter, dans certaines conditions, des indications sur le potentiel d'activité photosynthétique des divers couverts végétaux. Bille insiste, à juste titre, sur la nécessité d'importants contrôles au sol (vérité terrain) réalisés à des moments critiques de la physiologie des principales espèces végétales ; il démontre efficacement à quelles conditions de la surface et de la basse atmosphère il faut faire appel pour expliquer les anomalies constatées dans les courbes de réponses spectrales obtenues par voie satellitaire. En définitive, l'on est invité à une grande prudence dans le processus de généralisation issu du traitement de données satellitaires, lequel doit impérativement tenir compte de la dynamique écologique des phénomènes de surface et des variations de la transmissivité atmosphérique. Cette règle générale est parfois un peu trop négligée par les utilisateurs des données de la télédétection spatiale. Il est utile de le rappeler.

Les risques de généralisation hâtive sont encore évoqués dans le second article de Bille, consacré à une tentative d'explication des ressemblances, ou plutôt des dissemblances, qui affectent les zones arides tropicales de l'Ouest et de l'Est africains soumises aux mêmes pluviosités moyennes annuelles. Cette comparaison, fort judicieuse, se révèle d'une grande utilité pour comprendre les dynamiques des paysages de savanes pâturées dans des zones cependant trop arides pour être cultivées. Les interactions entre flore, végétation, régimes des précipitations, systèmes d'élevage et de pâturage, pratiques sociales (des éleveurs) conduisent à des réponses différenciées des évolutions, progressives ou régressives, des systèmes végétaux de la savane. Les modèles mis en évidence sont tirés de l'expérience propre de Bille, d'une part au Sénégal pour l'Ouest africain, d'autre part au Kenya, pour l'Est africain.

Au Sénégal, le régime des précipitations est de type monomodal (une seule saison des pluies), les sols sont peu diversifiés et peu fertiles ; le climat joue un rôle actif plus important que l'impact du pâturage ; la végétation est alors dominée par des espèces herbacées annuelles à fort pouvoir de résilience (pour les explications, voir aussi l'article de Grouzis) ; les espèces ligneuses, peu abondantes, présentent une grande tolérance vis-à-vis des variations climatiques et, de plus, servent abondamment de ressources fourragères en périodes de disette ; l'arbre sahélien est un élément fondamental du système d'élevage et des pratiques sociales.

Au Kenya, le régime des précipitations est de type bimodal (deux périodes des pluies), les sols sont diversifiés et généralement plus fertiles ; l'impact du pâturage est plus important que les variations climatiques ; la végétation pastorale est dominée par des herbacées pérennes à faible pouvoir de résilience (cicatrisation plus lente de la végétation herbacée après une forte perturbation) ; les espèces ligneuses, abondantes, présentent, par place, des signes de sénescence naturelle notamment lorsque les strates ligneuses ont tendance à se densifier et à se fermer ; on ne constate pas d'impact négatif des fortes charges de bétail domestiques sur les arbres ; en revanche, un excès de charge dû aux herbi-

vores sauvages est observé par place et entraîne la destruction des strates ligneuses. En Afrique de l'Est, l'arbre ne constitue pas un élément fondamental du système d'élevage et des pratiques sociales.

En dernier ressort, ce sont aussi ces pratiques sociales (des pasteurs peul à l'Ouest et des éleveurs masaï à l'Est...) traduites dans la nature et la composition des troupeaux d'élevage, les habitudes alimentaires, et dans les modalités différentes des migrations, etc., qui déterminent des équilibres dynamiques apparemment semblables, et cependant assez différents si l'on considère l'organisation spatiale et l'évolution, voire la composition floristique, des écosystèmes de savanes.

Il est intéressant de savoir si ces différences traduisent aussi l'impact du climat pour la production des ressources végétales utilisables dans l'économie des régions arides. Le Houérou, dans un premier article, nous propose une analyse des relations générales entre les paramètres climatiques et la productivité biologique (végétale, animale) des zones arides du monde. À partir des données d'environ un millier de stations pour lesquelles il dispose de la répartition mensuelle des pluies sur de longues périodes, confrontée à des données de la production de certaines cultures et des terres à pâturage, Le Houérou présente une synthèse fondée sur l'utilisation de nombreux indices que nous pourrions désigner par l'expression «indices d'efficacité bioclimatique pour la production primaire». Le premier de ces indices, déjà traité par d'autres auteurs dans la première partie de cet ouvrage, est le coefficient de variation de la pluviosité annuelle ; 2 autres indices sont spécifiques au traitement proposé par Le Houérou : le rapport de la variabilité de la production primaire (végétale) à celle de la pluviosité (RVPP), utilisé pour les terres à pâturage, et le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) qui revient à exprimer le nombre de kilogrammes de matière sèche végétale susceptible d'être produite par unité de surface, par unité de temps et par millimètre de pluie.

La comparaison des coefficients de variations de la pluviosité permet de proposer un classement des diverses zones arides du monde d'après leurs types climatiques, et de les ordonner selon un gradient de variabilité décroissante. D'une manière générale, les régions qui présentent des régimes de précipitations monomodaux ont des coefficients plus faibles que les régions où ces régimes sont bimodaux. La confrontation des données sur les régimes des précipitations et sur leur variabilité, avec celles des productions végétales (cultures ; terres de parcours) et de leur variabilité propre, oblige à considérer des correctifs liés, entre autres, à l'écophysiologie des végétaux, à la nature des phytocénoses en présence, à la capacité différentielle des substrats édaphiques pour assurer le stockage et la restitution des ressources hydriques, aux choix des cultures et aux pratiques culturales (aridoculture).

Le Houérou propose une équation qui permet de prédire la production annuelle des terrains de parcours en fonction de la variabilité de la pluviosité annuelle et du coefficient d'efficacité pluviale. Il convient de souligner le très grand intérêt des sols sableux (dans la mesure où ils sont stabilisés) pour garantir les meilleures conditions d'une économie de l'eau dans les zones arides ; ce qui permet, comme en Tunisie, de cultiver des arbres fruitiers, ici oliviers, jusqu'à la limite subsaharienne de l'étage aride.

S'agissant des relations entre les variations de la pluviosité et la production secondaire, la démonstration proposée par LE HOUÉROU *porte seulement sur l'exemple des élevages de moutons et de chèvres dans la zone aride tunisienne. Ce seul exemple illustre bien cependant que ce sont d'abord les jeunes qui sont affectés par des conditions de sécheresse accrue, c'est-à-dire le système de reproduction dans sa partie la plus sensible ; ce que démontrera bien la réponse de l'avifaune (voir l'article de* MOREL *et* MOREL*). Il est clair cependant que les systèmes d'élevage, qui sont l'expression de pratiques sociales traditionnelles, ont développé quelques stratégies pour tamponner les contraintes climatiques.*

Une perception macroscopique (au niveau des grandes régions continentales) des relations entre l'aridité climatique et la distribution des formations végétales, ne doit pas occulter l'intérêt qu'il y a à effectuer quelques changements d'échelles pour percevoir des variations locales dont la récurrence, quant aux modèles d'organisation et d'évolution de la végétation, est si typique de certaines zones arides. LEPRUN *décrit ainsi le modèle de la brousse tigrée des steppes herbacées et arbustives du Mali et du Burkina Faso dans des zones arides où l'endoréisme prévaut, où les pentes des versants sont faibles (glacis), où les sols subissent sans cesse un rajeunissement de surface par l'action conjuguée des érosions hydrique et éolienne qui contribue ainsi au tri superficiel des éléments texturaux de sols sans cesse remaniés. À cette dynamique physique de l'eau, de la terre et du vent, est associée une dynamique biologique propre, dont l'expression morphologique et structurale se traduit par l'existence dans l'espace d'un modèle récurrent de distribution de la végétation à propos duquel on distingue 3 éléments structuraux. De l'amont vers l'aval de versants à faible pente on identifie ainsi, en mode répétitif, un premier élément de végétation herbacée, suivi d'un élément de sol dépourvu de végétation et d'un deuxième élément de végétation dominée par des végétaux ligneux. Ce dispositif, à l'échelle du paysage, constitue la brousse tigrée. Les éléments biologiques du système montrent une vitesse de déplacement en surface de l'ordre de 20 à 70 cm par an dans le sens de la pente remontante. Il est intéressant de souligner que le dispositif entraîne des variations significatives des potentialités biologiques, par suite de la répartition différentielle des espèces et des ressources hydriques entre les 3 éléments du modèle ; ainsi la partie aval du système, qui bénéficie d'un accroissement sensible de ressources en eau, est constituée d'une végétation ligneuse de type sahélo-soudanien, plus mésophytique, alors que les conditions générales du milieu en amont sont celles du subaride sahélien, plus xérophytique.*

On voit bien que dans une situation de ce type, une banale liste d'espèces destinée à argumenter sur le thème de la diversité floristique des zones arides tropicales, ne saurait fournir une explication simple de l'environnement, faute de faire référence à la diversité écologique analysée à divers niveaux d'organisation de la phytocénose paysagère. La nécessité d'une hiérarchisation dans l'approche écologique des changements de l'environnement est soulignée.

Mais on perçoit bien que ces modèles descriptifs des changements environnementaux devraient être soutenus par des données et des expli-

cations sur les processus de fonctionnement qui les déterminent. Telle est la tentative assurée par CORNET *dans l'analyse qu'il propose des modalités de redistribution en surface des eaux de ruissellement et de leur infiltration différentielle dans les sols, processus responsables des variations du bilan hydrique et qui conduisent à des réponses biologiques contrastées des différents éléments interactifs de paysages végétaux.*

2 modèles sont ainsi étudiés quant aux relations entre la répartition et la structure spatiale de la végétation en fonction du bilan hydrique, de l'hétérogénéité pédologique, des différents états de surface des sols, de la dynamique propre de la végétation : d'une part, une brousse tigrée typique du Bolson de Mapimi, désert de Chihuahua (Mexique) et, d'autre part, un système en mosaïque avec éléments récurrents par tâches, et en mode contracté qui occupe un système dunaire ancien du Ferlo (Sénégal). CORNET *apporte des données mesurées et précises à l'appui de la thèse qu'il soutient, à savoir que l'hétérogénéité apparente du couvert végétal, visuellement très organisée comme dans la brousse tigrée ou apparemment peu organisée dans le cas de la mosaïque de la steppe arbustive, dépend directement de l'efficacité des pluies, considérée dans ses potentialités de redistribution en surface. Il en résulte des équilibres métastables et l'émergence de systèmes écologiques en interaction, à propos desquels les conditions de fonctionnement des interfaces (écotones) commandent les changements de composition et de structure des éléments de végétation constitutifs des phytocénoses complexes. Comme le soulignait déjà* LEPRUN, *pour le Mali et le Burkina Faso, les éléments de végétation qui bénéficient de la meilleure restitution hydrique à Mapimi et au Ferlo expriment des tendances mésophytiques, alors même que les conditions d'aridité générale du climat sont clairement indiquées par la prédominance, dans le paysage, de structures végétales de type xérophytique. On observe ainsi des réponses de même nature dans des territoires éloignés les uns des autres et soumis aux mêmes types de dynamique hydrologique. Peut-on parler de convergences dans les adaptations des végétaux aux stress de l'environnement ? Certainement, mais cela n'exclut pas une référence toujours plus précise des composantes biologiques.*

Avec le thème traité par GROUZIS, *nous abordons ainsi les réponses adaptatives des espèces végétales à la variabilité des conditions stationnelles dans les steppes d'herbacées annuelles du Sahel. Ces réponses sont jugées par le biais de l'analyse des conditions du succès de la mise en place du tapis herbacé, c'est-à-dire principalement au niveau des phases juvéniles du développement qui suivent la germination des graines.* GROUZIS *démontre que les flux de germination et d'installation des diverses espèces sont commandés par les capacités des stocks de semences viables (banques de graines), dont les effectifs ont été dénombrés à 3 stades critiques :*

- à la fin de saison des pluies, au moment de la dissémination des semences, après leur maturation, sous la forme d'un stock de semences initial (SSi, lui-même fonction du succès de la saison de végétation et des prélèvements effectués par les herbivores et granivores) ;

- à la fin de la saison sèche, sous la forme d'un stock de semences final (SSf, compte tenu des prélèvements effectués) ;

- après les premières levées de germinations, sous la forme d'un stock de semences résiduel (SSr), assurance pour le futur, dans la perspective d'une durée incertaine des déficits hydriques d'une année à l'autre.

Les valeurs usuellement rencontrées sont exprimées par les ordres de grandeur suivants : pour SSi, 10^4 à 10^5 semences.m^{-2} ; pour SSf, 1/3 à 2/3 des semences disponibles en SSi ont disparu ; pour SSr, il ne reste plus que 1 à 5% de SSi. La viabilité des semences n'est acquise qu'après un certain délai, on soutient ainsi l'idée qu'une postmaturation serait nécessaire pendant la saison sèche, soit pour faciliter la levée de dormance, soit pour supprimer une inhibition exogène. Dans la plupart des cas, 70 à 90% des semences sont viables après cette période de postmaturation alors que les facultés germinatives sont faibles au moment de la dissémination. Dans tous les cas, d'après GROUZIS, *les réserves de semences (des thérophytes) sont largement excédentaires pour garantir un couvert herbacé satisfaisant si les conditions de pluviosité sont optimales. En début de saison pluvieuse, 10 à 25 mm suffisent pour permettre les premières germinations et levées, mais 20% des précipitations moyennes annuelles sont nécessaires pour permettre une installation durable des jeunes plantules dans la zone sahélienne qui reçoit entre 200 et 600 mm de précipitations moyennes annuelles. La présence, chez la même espèce, de graines à aptitudes germinatives plus ou moins précoces, ou différées dans le temps, augmente les chances d'une occupation de l'espace à des dates variables, d'où le constat qui peut être fait de vagues de levées, qui correspondent à des variations localisées de la pluviosité, des conditions de la surface du sol et de l'état hydrique des substrats. En conclusion, la reconstitution du tapis herbacé n'est en rien limitée par les stocks de semences (des espèces thérophytiques), d'où l'impression qui se dégage, au Sahel aride, d'une bonne résilience des écosystèmes, à condition que les cycles d'années déficitaires soient espacés et d'une durée maximale de 2 à 3 ans, et que les effets de l'érosion éolienne soient tels, qu'ils n'aient pas contribué à éliminer tous les stocks de semences viables.*

La question qui se pose alors est de savoir si l'impact des activités pastorales sur les formations herbacées de ces zones arides tropicales serait de nature à entraîner des déséquilibres dans la composition et dans la structure des phytocénoses et, d'une manière concomitante, s'il est possible, par des méthodes appropriées, de mesurer les états d'équilibre de telles phytocénoses. Dans ce dessein, POISSONET, CHAMBRIS *et* TOURÉ *ont testé la méthode des points-quadrats au Ferlo sénégalais, méthode largement expérimentée sur la plupart des formations herbacées du monde par* POISSONET *et ses élèves. L'application aux steppes herbacées du Sahel aride s'est révélée possible et prometteuse. Les auteurs mettent en évidence les états d'équilibre et de déséquilibre de communautés soumises aux aléas climatiques (irrégularité et efficacité des pluies) et, simultanément, à des conditions contrastées de pression animale (sur-utilisation et sous-utilisation des ressources pastorales disponibles). Le modèle mathématique auquel ils ont recours décrit les relations qui existent entre le nombre de taxons présents et leurs fréquences spécifiques. Ils prétendent ainsi fonder un bon diagnostic sur les états d'équilibre des diverses phytocénoses d'un territoire donné. Les*

auteurs en déduisent des procédures simples pour assurer une gestion rationnelle des pâturages. Les bonnes conditions d'une année d'hivernage seraient réalisées au Ferlo sénégalais lorsque le tapis végétal en équilibre dynamique, soumis à une exploitation pastorale rationnelle, est le résultat biologique obtenu avec les conditions suivantes : total des précipitations annuelles proche de 350 mm tombant en vingt-cinq jours entre juillet et septembre dont 120 mm doivent tomber en sept jours, en juillet. Les méthodes rapides proposées en matière de diagnostic phytoécologique des ressources pastorales ont fait l'objet d'une très large vulgarisation dans les pays du Sahel grâce aux cycles de formation dispensés à l'occasion du cours Fapis (Dakar), sous l'égide de l'Unesco.

Dans les premiers articles de la deuxième partie de cet ouvrage, on s'est attaché à montrer les conditions d'installation et de différenciation des phytocénoses en fonction de la variabilité des conditions climatiques et édaphiques. L'article de ACHARD *aborde le thème des variations de la production primaire et de la productivité des formations végétales herbacées dans la zone nord-soudanienne du Burkina Faso. De très nombreux travaux ont eu le même objectif pour l'ensemble des régions arides des zones soudanienne et sahélienne des divers pays au sud du Sahara ; il suffit de rappeler les travaux de* BILLE, BONKOUNGOU, BOUDET, CÉSAR, DEVINEAU, FOURNIER, GROUZIS, LE HOUÉROU, *etc., parmi ceux publiés en langue française.* ACHARD *compare les modalités de la production végétale de phytocénoses dominées par des graminées annuelles ou par des graminées pérennes. On retiendra que les graminées pérennes sont plus efficaces que les graminées annuelles pour valoriser les pluies, et que cette efficacité peut être augmentée d'un facteur multiplicateur de 2 à 3 si les conditions de gestion pastorale sont rationnelles (entre autres, charge modérée). On a ainsi une indication intéressante sur la marge des progrès techniques qu'il faudrait introduire dans la gestion des parcours. On trouve là, la trame d'un débat général à propos duquel l'école française d'écologie pastorale s'est souvent heurtée aux dogmes établis par les chercheurs australiens, dominés par le souci d'une gestion des ressources pastorales au moindre coût humain, ce qui conduit au modèle du «*Yearlong Grazing System*» et à la disparition des espèces pérennes, dont la maintenance dans les terres à pâturage implique des périodes de repos (sans pâturage).*

Dans ce travail, ACHARD *ne prend pas en considération la production des espèces ligneuses, lesquelles sont aussi plus abondamment représentées dans les savanes dominées par les herbacées pérennes en Afrique de l'Ouest. Des recherches doivent être développées sur les effets synergiques pour la productivité des savanes arbustives ou arborées, liés à la coexistence de strates de ligneux et de strates d'herbacées pérennes. Les modèles agroforestiers ou sylvopastoraux réclament encore une acquisition de connaissances qui fait en partie défaut dans les zones arides des pays sahéliens. Mais nous savons que des recherches sont en cours pour combler cette lacune.*

Avec l'article de SICARD *on aborde dans cette deuxième partie les relations entre l'aridité (climatique et/ou édaphique) et la répartition, le comportement et les adaptations des animaux.* SICARD *nous offre ainsi*

une excellente démonstration en considérant les espèces de rongeurs du Burkina Faso, distribuées selon des gradients d'aridité climatique et d'aridité édaphique. Il souligne le rôle synchronisateur des facteurs climatiques dans la biologie des espèces. L'aridité climatique conduit à l'existence d'espèces liées aux variations climatiques et d'autres indifférentes, ubiquistes. D'autre part, l'aridité édaphique permet de discriminer un groupe d'espèces spécialistes et un autre groupe d'espèces généralistes. En raison du nombre assez élevé d'espèces présentes des zones humides aux zones les plus arides (désert), les rongeurs sont un excellent modèle pour traiter des stratégies d'adaptation aux conditions de l'aridité. SICARD *appuie ses démonstrations sur des données écophysiologiques relatives au métabolisme hydrique des espèces, à leur cycle de reproduction, etc. La confrontation de données récoltées sur les populations* in situ *et de données issues d'expériences contrôlées au laboratoire est riche d'enseignement pour des perspectives de généralisation, ce qui est le propre d'une bonne recherche. Les stratégies d'adaptation concernent une spécialisation concurrentielle des fonctions de reproduction, de taille et de mobilité des populations. Le brassage génétique, facteur de succès de la permanence des populations soumises à des conditions écologiques très variables et à des stress environnementaux, est obtenu à l'occasion des bonnes années (pluviosité qui favorise le développement des ressources alimentaires), par la concentration des populations, voire leur pullulation.*

En revanche, on a quelque peine à imaginer a priori *que le modèle «oiseaux», traité par* MOREL *et* MOREL, *puisse apporter des éclaircissements quant à la valeur indicatrice d'animaux réputés mobiles ; en effet, pour une part, certaines espèces font partie des groupes migrateurs et, par ailleurs, pour l'ensemble de l'avifaune, l'une des contraintes reste la disponibilité, à des distances de quelques dizaines de kilomètres au maximum, de lieux d'abreuvement journalier :* MOREL *et* MOREL *nous invitent cependant à suivre leur démonstration à partir de la connaissance approfondie et remarquable qu'ils ont de l'avifaune des steppes arbustives de la région de Richard Toll au Sénégal. C'est ainsi qu'il faut considérer d'autres critères essentiels : le type des ressources alimentaires offertes et la variation des quantités disponibles, les lieux préférentiels de nidification, les modalités de l'élevage des jeunes et, principalement, les types de reproduction. S'agissant de ce dernier critère, on constate ainsi que les peuplements d'oiseaux comportent différents types :*

- espèces à saison de reproduction limitée à la saison des pluies (modèles Quelea quelea *et* Passer luteus) ;

- espèces granivores à longue saison de reproduction (modèle Lagonosticta senegala) ;

- espèces granivores à saison de reproduction ininterrompue, avec synchronisation entre la reproduction et les disponibilités de graines de Panicum laetum *(modèle* Streptopelia roseogrisea) ;

- espèces granivores ne se reproduisant qu'en saison sèche et adaptées aux saisons de pluie déficitaires, lesquelles sont favorables au développement de la légumineuse Zornia glochidiata, *qui produit des graines consommées par les oiseaux (modèle* Pterocles exustus).

Faut-il souligner que le régime alimentaire dominant des oiseaux de la steppe arbustive est du type «granivore», et qu'il serait fort utile qu'un

lien puisse être établi entre les travaux de MOREL *et* MOREL*, présentés ici, et les recherches de* GROUZIS *évoquées préalablement, et qui concernent la production de graines des formations herbacées des zones arides tropicales. L'interdisciplinarité entre phyto-écologie et zoo-écologie est encore un défi qu'il faudra relever pour une approche holistique du fonctionnement des systèmes écologiques. En confrontant les résultats des zoo-écologues et des phyto-écologues, on pourrait dire toute l'importance qu'il convient d'attacher dans l'adaptation des populations d'espèces herbacées annuelles et des oiseaux des steppes arbustives à la stratégie «r», laquelle tend à maximiser les conditions de la reproduction en année favorable sur le plan de la ressource hydrique, mais pour des zones où la fréquence d'occurrence de telles conditions écologiques est faible, donc où le degré d'incertitude est élevé. En définitive, les oiseaux sont un bon exemple d'adaptation à la double tendance du milieu : régularité d'un cycle des précipitations (place de la saison pluvieuse), mais risques de déficits interannuels fréquents et variables.*

Avec l'article de GHABBOUR, RIZK *et* MIKHAIL *on aborde le domaine des invertébrés. Ces animaux, il faut en convenir, ne font pas l'objet de nombreuses études dans les zones arides. Les auteurs nous offrent une analyse originale des relations entre le facteur eau (y inclus en ce qui concerne son état de vapeur) et la biologie du cafard des sables, invertébré très caractéristique de la faune du sol dans le désert nord-occidental égyptien, sous climat méditerranéen aride, tamponné par la proximité de la mer. Le bilan hydrique de l'espèce montre que cet animal dispose d'un arsenal diversifié d'adaptations pour survivre dans des conditions d'aridité et de déficit hydrique. Il faut souligner que l'espèce représente les 40 à 60% des effectifs de la mésofaune totale des sols dans le secteur considéré. Le cafard des sables possède la faculté d'absorber la vapeur d'eau à des seuils d'humidité relative de l'air aussi bas que 75% ; ces mesures, conduites au laboratoire, ont été validées* in situ*, où l'on a démontré qu'à une profondeur de 50 cm, dans les sols sableux, l'état hygrométrique de l'air se maintenait toujours à des niveaux égaux ou supérieurs à 75-80%, ce qui représente, par conséquent, la condition optimale du milieu de vie de l'espèce. On souligne ainsi l'importance de l'état hydrique de l'air, d'une porosphère volumineuse dans des sols à granulométrie grossière constitués de sables non consolidés (pour faciliter le fouissage et la pénétrabilité). Par ailleurs, l'animal présente des dispositifs morphophysiologiques appropriés qui lui évitent de subir une trop grande perte d'eau corporelle dans les atmosphères à faible humidité relative. Ce modèle «cafard des sables» ne constitue pas, sans doute, une exception quant aux adaptations à l'aridité des milieux, notamment lorsque celle-ci n'est définie que sur la base des paramètres de la pluviosité. Dans de nombreuses régions arides du monde, où les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 100 à 200 mm, on constate l'existence de périodes au cours desquelles l'état hygrométrique de l'air reste élevé (tel est le cas des zones arides du Chili avec le phénomène de la* neblina*). Des études mériteraient d'être développées pour compléter ainsi le bilan hydrique des systèmes vivants par une analyse plus poussée de tous les éléments qui interviennent dans l'économie de l'eau. On voit bien aussi que les recherches sur les conséquences écologiques de l'aridité édaphique et de l'aridité climatique ne peuvent se*

passer d'une analyse sur les mécanismes physiologiques mis en œuvre par les animaux et par les végétaux pour assurer le succès du cycle de vie, en premier lieu de la reproduction.

Il était intéressant de vérifier sur un animal domestique, réputé adapté aux conditions des zones arides, sa capacité à résister à des périodes de disette alimentaire si fréquentes dans ce genre d'environnement. Sur la base d'expériences qu'il a réalisées en Libye, Le Houérou présente des résultats qui démontrent les aptitudes exceptionnelles de la race ovine barbarine à la restriction alimentaire et à la récupération rapide de son poids initial ainsi que d'un bon état physiologique (essentiellement fondée sur le déficit énergétique), après des périodes prolongées de carence alimentaire aiguë ; en effet, des brebis non gestantes, soumises au traitement de disette alimentaire, peuvent perdre jusqu'à 40% de leur poids, puis le récupérer ensuite ; on considère que 15 à 20% de pertes pondérales seraient sans effet sur la reproduction. Ces quelques éléments, auxquels il faut ajouter le fait qu'il existe une grande variabilité des réponses individuelles, suggèrent la grande adaptabilité de la race considérée et le potentiel de sélection qu'elle offre ; les sujets jeunes (agneaux de 100 jours) peuvent accuser des gains de poids journaliers aussi élevés que ceux mesurés pour les jeunes des races sélectionnées. Il en résulte des considérations qui portent sur les avantages de la flexibilité du matériel animal pour la conduite d'élevages qui doivent impérativement intégrer les aléas climatiques susceptibles d'entraîner des disettes chroniques pendant les périodes sèches.

Les 4 derniers articles concernent les modalités d'évolution et de gestion de terres et des eaux à divers niveaux d'appréhension des zones arides. M'timet, à partir de l'étude de cas des lœss du Sud tunisien, distribués sur les reliefs collinéens des Matmata, fait le plaidoyer des techniques de récupération des eaux de ruissellement ; il indique les valeurs que doivent acquérir certains paramètres physiques des sols et des versants pour favoriser au maximum, par des aménagements de surface, la collecte hydrique. Les lœss du Sud tunisien ont des propriétés qui se prêtent bien à ce genre d'aménagement. Les résultats expérimentaux sont appliqués à un modèle de lutte intégrée contre l'érosion, sur un territoire d'environ 10 000 ha ; le modèle comporte des aménagements relatifs aux matériaux physiques (sol, roche mère), biologiques (plantations d'arbres ou d'arbustes ; mises en défens), et des interventions biotechnologiques (incorporation de matière organique : résidus de l'industrie oléicole) et de génie rural (citernes, terrasses, jessours *et* tabias*). L'auteur souligne, comme on le constate dans de nombreux articles de ce chapitre, la très grande importance des états de surface du sol. La gestion simultanée des eaux de surface et des sols est une condition indispensable pour assurer un développement durable des ressources biologiques.*

Floret, Le Floc'h et Pontanier, toujours en Tunisie aride, considèrent le niveau régional pour analyser l'évolution sur des longues durées (quatre décennies) des bilans hydriques et des productions végétales utilisables (ici : phytomasse pastorale et production d'orge en grains). La détérioration de l'environnement, notamment depuis 1963 (dans la zone

étudiée), est telle qu'elle s'accompagne d'une baisse généralisée de la réserve utile en eau des sols, de la perte des propriétés de stockage de l'eau, d'une érosion physique de nombreux milieux, etc., tous phénomènes concomitants d'un accroissement des surfaces cultivées (mécanisation sans précautions suffisantes), au dépens des steppes pastorales qui, lorsqu'elles étaient gérées avec modération, assuraient la préservation des équilibres écologiques. Toute la démonstration des auteurs est fondée sur la connaissance qu'ils ont acquise du fonctionnement différentiel des principaux systèmes écologiques des zones considérées, fonctionnement mesuré en terme de bilan hydrique, de bilan d'érosion des terres soumises à diverses contraintes et de production végétale récoltable dans le cadre de systèmes de gestion pastorale et céréalière des divers milieux. L'analyse et l'interprétation des couvertures photographiques aériennes successives permet de calculer l'évolution des superficies occupées par les divers systèmes écologiques indicateurs des propriétés hydriques et édaphiques jugées des plus fiables pour caractériser l'évolution régressive de l'environnement. Ce constat négatif est heureusement accompagné de propositions sur les conditions de réhabilitation des fonctions écologiques et productives des milieux perturbés, dans le cadre de nouveaux systèmes de gestion et de production pour tenir compte de l'évolution de la société.

Le thème de la salinisation des terres irriguées fait l'objet d'un traitement technique dans l'article de BOUTEYRE, *qui se rapporte aux processus de salinisation et de réhabilitation des terres cultivées de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. La mauvaise gestion des eaux et des terres et l'absence de dispositifs de drainage sont les causes d'une évolution catastrophique de l'état des sols. C'est en soi, un sujet qui mériterait un développement plus conséquent, fondé sur des raisonnements scientifiques plus poussés.*

Dans un dernier article que nous situerons dans le thème général d'une «écologie du paysage» en milieu rural sahélien (Burkina Faso) SERPANTIÉ, TEZENAS DU MONTCEL *et* VALENTIN, *mettent l'accent sur la valeur «diagnostic» des états de surface pour identifier l'importance des changements de divers ordres qui affectent le paysage agraire. Ils distinguent des dynamiques ancienne, récente et actuelle. L'objectif final est la mise en évidence d'un modèle d'occupation de l'espace susceptible d'assurer un meilleur équilibre entre les pratiques et les besoins de la société rurale et le milieu physique et biologique évolutif. Chaque système complexe a ses propres capacités d'autorégulation, ses propres seuils de réversibilité et d'irréversibilité, fonction de tel ou tel système de production. L'existence et la persistance d'une certaine diversité de pratiques sociales agropastorales seraient une réponse possible de la société pour optimiser les interactions évolutives entre développement et environnement. Les auteurs mettent, à juste titre, l'accent sur l'importance qu'il convient d'accorder aux microstructures de la société locale pour affronter les aléas des zones arides.*

Gilbert LONG, *écologue,*
CEFE/CNRS, BP 5051, 34033 Montpellier cedex

Jean-Claude BILLE

La réflectance des végétaux

Variations et évolution annuelle

INTRODUCTION

De nombreux travaux ont pour objet d'évaluer indirectement la productivité des végétaux à partir de mesures radiométriques obtenues soit au sol, soit par des satellites d'observation du globe, soit encore, plus fréquemment, en combinant ces 2 sources d'informations. L'analyse des résultats se heurte souvent à des difficultés pour corréler les données de la télédétection et les biomasses végétales, et les corrélations proposées par les divers auteurs sont toujours différentes. Ces faits nous ont conduit à réaliser des mesures aériennes de réflectance à partir d'un petit avion volant à basse altitude ; le terrain concerné (Kenya et Sud éthiopien) a été choisi en fonction de la diversité de ses paysages végétaux qui vont de la forêt montagnarde au désert, avec des gradients accusés liés à la topographie.

INDICE DE VÉGÉTATION

Il est nécessaire de rappeler que le pourcentage de lumière solaire réfléchie par un objet varie selon les diverses longueurs d'ondes lumineuses. La matière de l'objet, sa couleur, sa structure et bien d'autres facteurs interviennent pour déterminer les caractéristiques de son absorption lumineuse ; on appelle généralement «signature spectrale» la courbe d'absorption qui correspond à chaque objet. La figure 1 présente une telle courbe pour les plantes vertes ; on remarque qu'il s'agit d'une surface du fait de la diversité des végétaux ; néanmoins, la lumière est toujours plus absorbée dans les radiations perçues comme rouges (R), et beaucoup moins pour la lumière qui appartient au proche infrarouge (IR), en limite des radiations perçues par l'oeil.

Bandes spectrales utilisées pour les mesures sur végétation

En raison de la signature spectrale des plantes, les mesures sur la végétation considèrent 2 bandes de radiations qui correspondent au minimum et au maximum d'absorption. On a figuré sur le même croquis (fig. 1) les canaux de 3 radiomètres satellitaires usuels : *Multi-Spectral-Scanner* (MSS), *Thematic Mapper* (TM) et *Avanced Very Hight Resolution Radiometer* (AVHRR).

Étant donné que les mesures de radiations sont fortement tributaires de la quantité de lumière incidente qui atteint l'objet contrôlé, il est usuel d'éliminer cette influence en combinant les bandes infrarouges et rouges sous forme de rapport simple (IR/R) ou en une expression plus complexe. Une combinaison particulièrement adaptée à l'étude des plantes est l'indice de végétation (*Normalized Difference Vegetation Index* ou NDVI) qui est le rapport de la différence IR - R à la somme IR + R.

Lorsque les bandes sont assez voisines, cet indice de végétation obtenu à partir de 2 systèmes différents (par exemple radiomètres TM et MSS) demeure assez comparable pour un mélange usuel de sol et de plantes et la mesure de petites variations d'indice est perçue de façon presque identique. Avec un radiomètre qui disposait de 4 canaux, mesures simultanées et enregistrement, on a pu contrôler expérimentalement que :

indice MSS = 0,999 indice TM - 0,029

Cette propriété se révèle intéressante car un petit décalage accidentel dans les bandes utilisées (filtre défectueux, vieillissement du matériel ou autres causes liées à l'alimentation électrique) n'affecte pas beaucoup la différence entre 2 niveaux de l'indice et celui-ci conserve ainsi une bonne valeur relative.

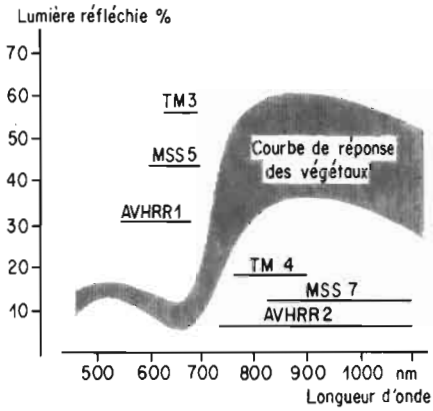


FIGURE 1. - *Signature spectrale des plantes.*

Indice d'un mélange d'objets

Si l'on excepte l'utilisation au sol d'équipement à très petit champ angulaire, le champ du radiomètre (surface sur laquelle sont effectuées les mesures) comprend le plus souvent un mélange de plantes vertes, de sol nu ou de roc, de plantes sèches, de litière ou de parties non chlorophylliennes des végétaux. Les surfaces mesurées par satellite peuvent inclure, en outre, des plans d'eau ou n'importe quel autre élément fortuit du globe terrestre.

Si l'on s'en tient aux 3 composantes les plus constantes, chacune peut être présentée dans un même système de coordonnées en fonction de ses réflectances dans le rouge et dans l'infrarouge. C'est ce que montre la figure 2 où les droites représentatives d'un certain nombre d'indices remplacent les valeurs mesurées le long de chaque axe, lesquelles n'ont aucune importance ; il est à noter cependant, pour les points N (sol nu), S (plantes sèches) et V (plantes vertes) que des mesures réelles sont indiquées et non pas une situation théorique.

Le point N, qui correspond donc à un type de sol déterminé, serait situé différemment pour un autre sol, tout en restant voisin de la droite d'indices 0,2. De même, les points S et V, obtenus avec des végétaux différents, garderaient le même ordre de grandeur de leurs indices, soit 0,3 à 0,4 pour la litière et plus de 0,8 pour le matériel vert. En théorie, le point représentatif de tout mélange de végétaux et de ce sol sera inclus dans le triangle NSV. Si on remplaçait le sol par de l'eau, dont l'indice est négatif, on obtiendrait un triangle différent, et le point qui montre un mélange de 4 composants appartiendrait au quadrilatère établi à partir de ces 4 éléments.

Si la brillance, ou la somme IR + R qui lui est liée dans notre cas, était la même pour tous les objets, l'indice d'un mélange des éléments serait obtenu comme la

somme des indices des divers composants, pondérés par leurs proportions respectives. En réalité, l'influence des plantes vertes sur l'indice est supérieure à ce qu'on pourrait prévoir à partir d'une relation linéaire. Comme les indices des points N et S sont peu différents, la présence de matériel vert constitue le facteur essentiel d'établissement de l'indice. En pratique, et si l'on excepte les couverts végétaux très réduits ou très élevés, un incrément de l'indice traduira donc une augmentation quasi proportionnelle de la quantité de végétation verte.

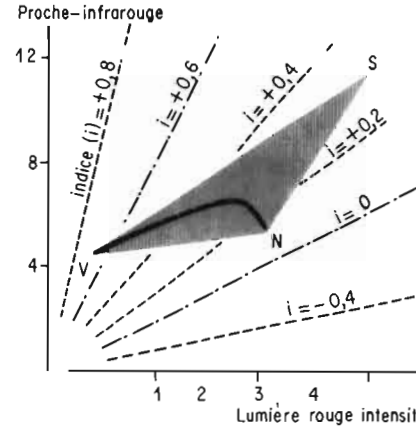


FIGURE 2. - *Le triangle de réflectance.*

En outre, un mélange exclusif de sol et de plantes vertes semble très rare dans le champ des radiomètres satellitaires, et l'expérience montre que le triangle est déformé en une surface hastée. La plupart des situations observables dans les zones arides s'inscrivent dans la partie droite de cette flèche avec un pourcentage modeste de matériel vert. À ce propos, on peut remarquer que l'impression visuelle de couleur donne une bonne représentation de l'indice qui est élevé pour toute surface verte, même non végétale, et faible pour les autres teintes (jaune, noir, rouge, etc.)

À ce stade, on peut conclure que l'indice est bien lié à l'abondance de plantes vertes, donc photosynthétiquement actives ; on peut donc envisager de l'utiliser pour estimer la production végétale et cette dernière devrait être d'autant plus élevée que l'indice est plus fort.

ÉVOLUTION ANNUELLE DE L'INDICE

2 approches sont possibles pour tenter de relier l'indice à la production végétale. La première consiste à choisir une date au cours de la saison de croissance des plantes et à subdiviser l'espace étudié en fonction des différentes valeurs d'indice pour obtenir une représentation de l'intensité du couvert végétal, puis de calibrer les classes de couvert en termes de production végétale ou de biomasse en fin de saison de croissance. La procédure suppose implicitement que la nature des peuplements végétaux soit connue et que chaque communauté soit étudiée à part sur le terrain. La seconde possibilité consiste à suivre l'évolution de l'indice dans le temps et à combiner l'intensité et la durée de la croissance, en considérant que les modalités d'évolution de l'indice sont une indication suffisante du type de végétation.

Suivi de l'indice par Noaa

Le satellite météorologique Noaa observe la totalité du globe en 14 orbites chaque jour. Un certain nombre de contraintes s'opposent pourtant à l'utilisation quotidienne de toutes les mesures : présence de nuages au-dessous desquels les mesures sont impossibles, grand angle de balayage du radiomètre, qui conduit à écarter les mesures par trop obliques, entre autres. Tucker *et al.* (1985) ont choisi d'établir des images composites à partir de toutes les mesures réalisées au cours d'une période de trois semaines de façon à assurer une bonne couverture du terrain.

Les pixels couverts par des formations nuageuses sont éliminés par un masque thermique, en imposant une limite inférieure aux températures mesurées dans l'infrarouge moyen. Pour les autres, on sélectionne la plus haute valeur d'indice obtenue dans les meilleures conditions. Malgré des efforts pour améliorer le repérage géographique des pixels, la superposition des images demeure un point faible du procédé, qui est acceptable seulement pour des groupes de pixels dans une zone relativement homogène et qui entraîne en principe une légère surestimation de l'indice moyen.

Le procédé permet néanmoins de suivre un même groupe de pixels au cours de l'année. La figure 3 (Tucker *et al.*, 1985) montre l'évolution de l'indice de surfaces respectivement situées en forêt équatoriale (près de Yangambi, Zaïre), en savane soudanienne (dans le Soudan), au Sahel (région de Niono, Mali) et dans le désert namibien.

L'étagement des courbes d'indice est certainement un bon reflet des végétations concernées ; de toujours vert, en forêt primaire qui bénéficie de 2 m de précipitations bien réparties, à toujours nu, dans le désert où la pluviométrie annuelle est de 15 mm. En région soudanienne, on observe une phase de croissance végétale intense pendant les six mois de saison humide, tandis que la productivité au Sahel, réduite, est aussi limitée dans le temps.

Au-delà de cet agrément général entre l'évolution des indices et les formations végétales, le détail des courbes pose un certain nombre de questions. Ainsi, pourquoi le désert est-il aussi variable ? Les indices enregistrés varient de - 0,04 à + 0,01 ; ils sont à la fois trop irréguliers et trop faibles, puisqu'on a remarqué que les sols nus ont en principe un indice supérieur à 0,10 ou à 0,15.

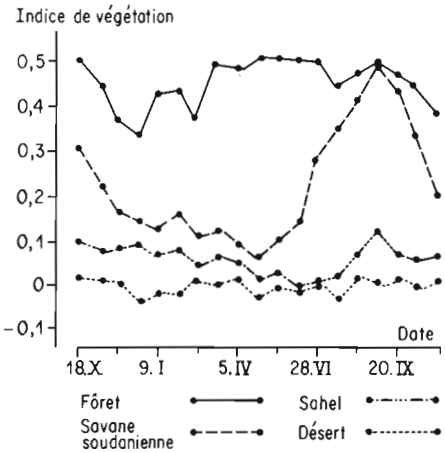


Figure 3. - *Évolution annuelle de l'indice (Tucker* et al., *1985).*

Les indices sur forêt primaire (0,35 à 0,52) semblent aussi faibles pour un couvert végétal très dense. Même si la variation annuelle exprime une réalité biologique, on voit mal pourquoi deux *minima* de l'indice encadrent le mois moins humide de janvier, pendant lequel l'indice est plus élevé. Il n'apparaît pas non plus d'explication logique pour justifier le grand écart entre les indices de début et de fin de période.

Les différences entre les indices pour la savane soudanienne et ceux pour le Sahel sont peut-être liées à l'abondance d'arbres et d'arbustes, mais les feuilles des ligneux se développent généralement au tout début des pluies, période caractérisée ici par un indice minimal. En outre, ces feuilles persistent jusqu'à la saison sèche, alors que l'indice diminue ici rapidement dès le mois de septembre, comme s'il ne reflétait que l'évolution de la strate herbacée et son jaunissement.

Il est donc difficile de lier rigoureusement l'évolution des indices à celle du couvert des plantes vertes ou des masses végétales. Cet indice de végétation pourrait mettre en jeu d'autres paramètres que ceux de l'activité photosynthétique ; on peut imaginer l'influence éventuelle de facteurs qualitatifs inconnus ou des interférences sans rapport avec la végétation. En outre, l'évolution de la réflectance mesurée au sol sur une surface permanente ne montre pas les variations observées ici ; on assiste plutôt à une montée brutale de l'indice au cours des premières semaines de croissance des plantes, puis à un palier plus ou moins long, suivi d'une diminution lente pour les espèces pérennes ou d'une chute plus rapide chez les plantes annuelles.

Mesure des indices de végétation par avion

L'objet des mesures effectuées de 1984 à 1986 était de simuler l'acquisition de données satellitaires de réflectance en échantillonnant un certain nombre de surfaces, tout en conservant une possibilité d'observer et de photographier le terrain au moment même des mesures, et en collectant toute information annexe qui pouvait sembler utile à leur interprétation.

Dans ce dessein, on a équipé un avion de tourisme d'un miroir extérieur incliné à 45° pour obtenir des mesures verticales avec un matériel fixé horizontalement ; mesures et observations ou photographies se faisaient par l'intermédiaire de ce miroir. Le radiomètre disposait d'un système programmable de déclenchement automatique de mesures simultanées des radiations dans plusieurs bandes, de stockage des résultats et de calcul de l'indice avec affichage des résultats en temps réel. Ainsi l'opérateur pouvait-il suivre le déroulement des mesures et constater sans délai les anomalies éventuelles ; il avait alors la possibilité d'en rechercher immédiatement les causes.

À la suite d'essais préalables, il est apparu qu'une altitude de 1 200 pieds au-dessus du sol permettait une bonne observation visuelle, un champ radiométrique (taille de l'échantillon) convenable, de l'ordre de 1,3 ha, et des conditions de navigation précises. En outre, la navigation était assistée par un ordinateur de bord et les mesures pouvaient être obtenues, si nécessaire, à un rythme supérieur à 1 par seconde. La périodicité la plus usuelle était cependant de 20 secondes, soit en moyenne 1 mesure par kilomètre ou encore une densité d'échantillonnage linéaire de 12 % environ.

Les essais ont également montré que, dans ces conditions, les résultats obtenus par répétition des mêmes lignes de vol demeuraient constants pour la moyenne et l'écart-type de plus de 60 à 80 mesures (selon la variabilité du milieu) ; de même, les fluctuations le long d'une ligne de vol étaient correctement décrites sous réserve de grouper les mesures par 5 au moins pour éviter des écarts localisés trop élevés. En fait, les simulations ont été tentées avec une large marge de sécurité le long de 4 parcours, de

150 km chacun, survolés périodiquement au-dessus de la province de Sidamo (Éthiopie), dont le milieu naturel faisait l'objet de nombreux contrôles au sol, ou encore le long de trajets de près de 2 000 km (mais survolés plus épisodiquement) sur le Kenya. En Éthiopie, chaque parcours était donc finalement décrit, pour 150 à 300 mesures, à partir de 30 points qui constituaient le «profil radiométrique» du trajet à un temps donné.

Résultats obtenus au cours de l'année

L'évolution des indices de végétation au cours de l'année peut être illustrée à partir de celle des profils radiométriques qui décrit les pentes depuis les hauts plateaux au nord (2 000 m d'altitude) jusqu'à la zone pastorale 500 m plus bas vers le sud. Cette région bénéficie de pluies faiblement bimodales du 15 mars au 15 octobre ; le total annuel varie de 500 à 800 mm en moyenne selon l'altitude. Les paysages le long de ce parcours sont plus diversifiés que dans les autres cas (zone de cultures en montagne, parcours plus arides des confins kenyans et désert de Chalbi).

Les enregistrements réalisés en 1985 sont présentés pour 4 périodes caractéristiques (fig. 4). L'indice moyen mesuré le long des 150 km est de 0,06 pour janvier, cœur de la saison sèche. Des taches de verdure n'existent qu'en haut de pente où on trouve quelques cas de boisement sempervirent ; les petits pics d'indice observés plus au sud correspondent à des pitons isolés ou à des boisements ripicoles. Les plus faibles indices sont obtenus sur des parcours érodés et surpâturés ; le profil dans son ensemble constitue une excellente image des différents milieux et les variations s'expliquent bien par les détails de la topographie ou de l'utilisation du terrain.

L'indice moyen en début avril est de 0,49 ; la valeur est atteinte après deux à trois semaines de développement végétal, alors que le couvert des plantes est encore bien inférieur au maximum saisonnier ; ceci confirme les mesures au sol. La tendance générale le long du transect est encore une diminution de l'indice vers le sud, mais l'augmentation d'indice en altitude est plus faible qu'en bas de pente.

Plusieurs explications peuvent être envisagées pour cette relative stabilité de l'indice au nord ; par exemple, les boisements ont été peu modifiés et quelques défrichements ont été réalisés (causes biologiques) ou bien on se rapproche du niveau de saturation de l'indice qui cesse de refléter linéairement les surfaces vertes (raison technique).

En octobre, où l'indice moyen est de 0,27, les pluies persistent au nord et ont cessé au sud. Le profil radiométrique traduit ce phénomène par une pente très marquée, et

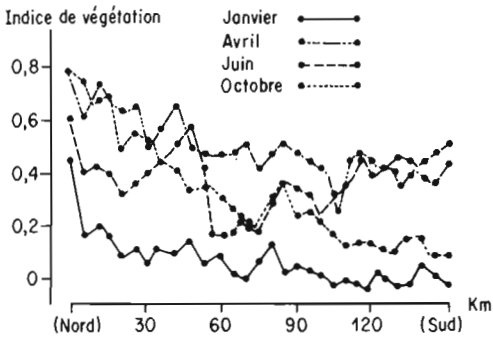


Figure 4. - *Évolution de l'indice sur transect aérien.*

on note déjà dans la fraction au sud les mêmes détails topographiques qu'en saison sèche. Le profil de janvier 1986, qui n'a pas été figuré, est très comparable à celui de janvier 1985. La principale différence entre les résultats satellitaires et les résultats aériens tient à ce que l'avion attribue à l'indice une décroissance plus graduelle que celle enregistrée par satellite.

Le profil de juin, qui n'a pas encore été commenté, se singularise du fait qu'il ne montre pas la tendance habituelle du nord au sud. En outre, la végétation à cette date est encore totalement verte et ne justifie ni une diminution d'indice, dont la moyenne s'établit alors à 0,36, ni les écarts observés par rapport à la courbe d'avril pour certaines parties du trajet. Au cours des périodes de vol correspondantes, on note depuis l'avion une «mauvaise visibilité», bien qu'il ne pleuve pas et que le ciel ne soit que partiellement nuageux.

Le même jour, des mesures réalisées sur un lac donnent un indice égal à - 0,44, alors que les résultats habituels varient de - 0,18 à - 0,24 pour la même surface utilisée comme référence au départ des vols. Il faut donc admettre que la transmission des radiations lumineuses à travers l'atmosphère a pu être profondément affectée sur plusieurs parties du trajet perçues comme brumeuses, tout le paysage paraissant bleuté et flou.

La Vague verte

Les termes *Green Wave* ont été proposés par ROUSE *et al.* (1974) pour décrire l'évolution de l'indice de végétation, en considérant non plus les variations d'un pixel, mais celles d'un groupe de pixels. Les résultats précédemment présentés peuvent également servir à illustrer ce phénomène (fig. 5).

Pour établir cette figure, les indices mesurés ont été distribués en classes de 0,1 unité d'indice entre les valeurs extrêmes - 0,15 et + 0,85 observées le long des divers transects éthiopiens. À chaque date correspond une courbe de fréquence des 10 classes d'indice ainsi créées. Les distributions obtenues à différentes dates sont caractéristiques d'un terrain donné car elles expriment à la fois l'hétérogénéité du milieu et sa variabilité dans le temps. Dans notre cas, par exemple, le trajet sur le désert est à la fois le plus homogène lorsque tout est sec et le plus diversifié à la suite de pluies occasionnelles ; à l'opposé, les zones cultivées sont assez hétérogènes tout au long de l'année, avec des différences saisonnières moins marquées.

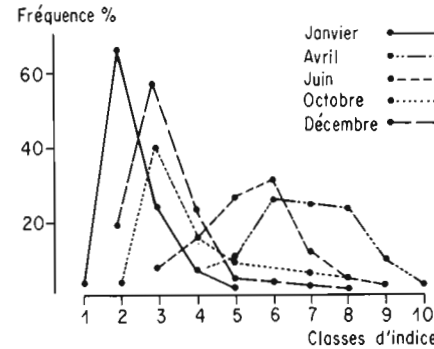


FIGURE 5. - *La Vague verte.*

Sur le transect retenu en exemple, le développement des plantes en avril est caractérisé par une distribution des fréquences presque normale et les indices se concentrent sur les 3 classes qui encadrent la valeur 0,5 (centre de la classe 7). Il n'existe pas de faibles valeurs de l'indice pour la période, et le radiomètre enregistre, à plusieurs reprises, des surfaces totalement vertes sur des zones boisées qui possèdent par ailleurs un tapis graminéen bien développé.

Dès le mois de juin semble s'amorcer la Vague verte qui se gonfle : la courbe de fréquence devient plus aiguë, même si le nombre de classes est le même. On sait que les mesures de juin sont vraisemblablement en partie des sous-estimations ; cependant celles-ci sont en principe distribuées sur toutes les classes et le pic de fréquences observé devrait être conservé si une fraction des mesures change de classe. D'autre part, le mouvement se poursuit en octobre où il ne subsiste que peu de valeurs supérieures à 0,30, et où le mode de la courbe devient très net.

Dès octobre, et plus encore par la suite, la distribution, en outre, est très dissymétrique avec une médiane bien inférieure à la moyenne. Beaucoup de surfaces vertes reliques (boisement, bas-fonds, etc.) vont subsister pendant deux mois après l'arrêt des pluies. Au cœur de la saison sèche, presque toutes les valeurs sont proches de zéro et la crête de la Vague verte est au plus haut ; il est probable que le retour à la situation d'avril se fasse selon le schéma inverse, avec un brusque déferlement de cette retombée. Un bon suivi nécessiterait sans doute un contrôle du terrain chaque deux ou trois jours, ce qui n'a pas été réalisé.

La brutalité de l'établissement des indices maximaux de végétation permet de penser que le stade pendant lequel ce maximum est mesurable ne dure qu'un temps assez court et qu'il échappera le plus souvent à la détection. Par suite, les essais de corrélations entre indice maximal de végétation et productivité seront très approximatifs ; de même, tout calcul qui repose sur une seule date d'acquisition de la réflectance (et ceci quelle que soit la définition ou la précision des appareils de mesure) est incompatible avec les délais nécessaires pour réaliser des mesures de biomasse végétale au sol.

En fait, une telle procédure met en parallèle 2 situations évolutives qui ne sont connues chacune que par une photographie instantanée assez floue. Dans le cas traité ici, il est apparu que la courbe de fréquence des indices en octobre était la meilleure indication, encore que peu satisfaisante, de la répartition des biomasses végétales en fin de saison de croissance ; cependant, il n'existe pas de preuve du caractère généralisable de ce résultat qui est certainement faux pour des territoires moins boisés, même avec un climat analogue. Les corrélations entre végétation et valeurs radiométriques obtenues le long de cet itinéraire n'étaient pas extrapolables aux autres transects du Sud éthiopien.

TRANSMISSIVITÉ ATMOSPHÉRIQUE

On peut facilement contrôler l'absorption d'une part du rayonnement solaire par les nuages, même diffus, en effectuant des mesures radiométriques en direction du ciel sous un verre dépoli horizontal et avec une optique d'angle plat. On constate que les radiations sont plus ou moins réduites pour les diverses bandes lumineuses en cas de couvert nuageux, et qu'un indice mesuré par temps couvert sera sous-estimé. La lumière qui est captée par un radiomètre de satellite subit 2 fois l'influence de l'atmosphère, d'où des mesures d'indice plus faibles qu'au sol, même en s'efforçant de réduire les distorsions dues à l'atmosphère par composition des images et choix des valeurs maximales pour chaque pixel (*cf. supra*).

Corrélations entre mesures à basse et à haute altitudes

En principe, la mesure des indices de végétation par avion devrait éliminer près de la moitié des distorsions dues à l'opacité atmosphérique. Associés à nos activités, des scientifiques de la *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa) (groupe *Global Inventory, Modelling and Monitoring Studies* du Centre spatial Goddard, États-Unis) nous ont procuré tout au long de la période d'étude, et sous forme digitale, les mesures obtenues par le satellite Noaa sur les mêmes terrains et aux mêmes dates que nous. Il devenait donc possible de chercher à corréler les indices mesurés par avion et par satellite.

La figure 6 est un exemple de résultats obtenus dans ce domaine sur les 4 transects du Sud éthiopien. Pour une date donnée, les mesures aériennes sont bien corrélées aux acquisitions satellitaires ; on trouve même une corrélation significative (r = 0,89) pour l'ensemble des résultats toutes dates confondues, bien que les mesures aériennes, interrompues en avril pour cause de mauvais temps, soient à la fois incomplètes et peu satisfaisantes. Les corrélations ont évidemment été établies entre les moyennes des mesures aériennes pour chaque transect (soit 150 valeurs) et les moyennes des indices des pixels le long d'une bande qui couvre le transect (également 150 valeurs), car les pixels Noaa ne sont pas repérables au sol avec une précision supérieure à 2 pixels.

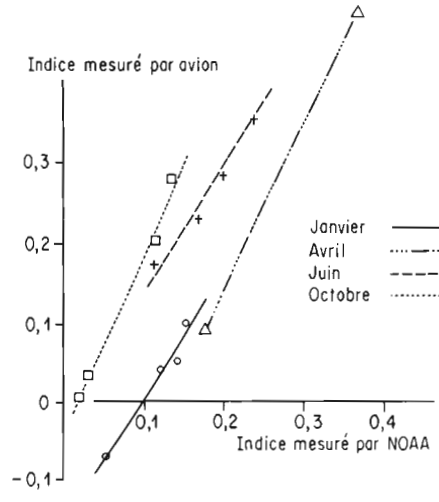


FIGURE 6. - *Corrélation entre indices mesurés par avion et par Noaa.*

Cependant, les droites de régression établies pour les diverses dates diffèrent sensiblement les unes des autres :

- janvier, indice (air) = 1,57, indice (satellite) - 0,15 ;
- avril, indice (air) = 1,74, indice (satellite) - 0,24 ;
- juin, indice (air) = 1,51, indice (satellite) - 0,02 ;
- octobre, indice (air) = 2,15, indice (satellite) - 0,05 ;

Utiliser la relation moyenne : indice (air) = 1,52, indice (satellite) - 0,06, conduit à des erreurs qui peuvent dépasser 0,1 point d'indice dans certaines situations ; une relation entre les 2 mesures n'est valable que pour une date. Le résultat est important, car il confirme le fait qu'une relation entre végétation et indice est dépendante du moment où elle a été obtenue.

D'autres relations entre mesures d'indice par avion et par satellite ont pu être établies par ailleurs le long des transects beaucoup plus longs au-dessus du Kenya, entre Nairobi et Moyale (700 km) ; entre Nairobi et Lodwar (600 km) ; ainsi qu'entre Kisumu, sur les rives du lac Victoria, et Malindi, sur la côte de l'océan Indien (650 km). Les régressions obtenues en octobre 1985 sont respectivement :

$Y = 2,62\ x - 0,19$
$Y = 1,94\ x - 0,21$
$Y = 1,42\ x - 0,09$

Dans tous les cas, les valeurs de r sont supérieures à 0,75. Comme tous les vols ont eu lieu en moins d'une semaine, il apparaît que les régressions obtenues ont seulement une valeur relativement locale et, en aucun cas, elles ne peuvent être extrapolées à d'autres surfaces que celles où les mesures ont été réalisées.

De nouveau, les résultats obtenus par temps clair sont les meilleurs. C'était le cas au Kenya dans le sud du pays, et la pente de la droite de régression entre les 2 types de mesures pourrait être une bonne indication de la valeur des résultats : plus les mesures sont comparables en valeur absolue (pente faible), moins les mesures ont été biaisées par l'atmosphère. Le résultat est extrapolable à l'évaluation des indices mesurés au sol sous réserve d'échantillonnage représentatif.

Or, la représentativité de l'échantillonnage au sol demande un grand nombre de mesures ; si les résultats sont mal extrapolables, l'effort nécessaire pour calibrer une scène entière de satellite devient hors de proportions avec les bénéfices escomptés et l'utilisation de l'imagerie n'apporte qu'une confirmation accessoire de la valeur du travail effectué sur le terrain.

Distorsions atmosphériques

Des diverses observations précédentes, il résulte 2 faits : d'une part l'atmosphère abaisse la valeur des indices, d'autre part elle réduit les écarts entre ces différents indices. Un radiomètre à bord du satellite est moins discriminant qu'un appareil utilisé par avion ou au sol, alors que la variabilité de l'opacité atmosphérique rend encore plus imprécises les valeurs enregistrées.

Ainsi, les indices mesurés par satellite sur les terres exondées varient le plus souvent de - 0,05 à + 0,55. On peut considérer par suite qu'un accroissement de 10 % du matériel végétal vert présent au sol augmente l'indice d'une valeur inférieure à 0,08 alors que les indices mesurés à travers une atmosphère opaque peuvent être réduits de plus de 0,10. Il apparaît également que les interférences atmosphériques ne sont pas seulement le fait des nuages, mais aussi de toute une gamme d'aérosols, terme usuel qui regroupe poussières, brumes et autres fumées. L'utilisation de transmissomètres au sol permet seule de détecter les aérosols, par la mesure de l'intensité de la lumière incidente sous l'atmosphère. Il n'existe pas encore de réseau constitué qui fournisse des valeurs de transmissométrie.

L'abaissement de l'indice est logiquement accru lorsque la mesure radiométrique est oblique. Holben et Fraser (1984) considèrent que les aérosols peuvent diminuer de près de 0,4 unité l'indice d'une surface d'eau libre si l'angle de mesure atteint 48°, et

de 0,2 unité l'indice d'une végétation de densité moyenne dans les mêmes conditions. En outre, les sols sont très variables : les valeurs mesurées verticalement par avion sur divers sols nus s'étagent de - 0,1 pour des sables blancs à + 0,4 sur des laves récentes.

L'atmosphère est souvent trouble pendant les intersaisons, c'est-à-dire au moment de l'arrivée des pluies et en début de saison sèche ainsi que lors de la période comprise entre les 2 pics de pluviosité pour les régimes bimodaux. Les indices mesurés dans ces 3 cas sont moins fiables et correspondent à la plupart des anomalies constatées ; on s'est parfois efforcé de réduire les variations d'indice dues à l'atmosphère en rétablissant des courbes dans le temps à partir des seuils maximaux enregistrés pendant les périodes de bonne transmissivité ; le procédé n'est qu'un pis-aller qui, outre son manque de rigueur scientifique, ne peut pas garantir une présentation correcte des faits.

Aucune procédure, parmi celles qui ont été tentées, ne permet donc d'éliminer les distorsions atmosphériques avec sécurité. L'examen des distributions de fréquences des classes d'indices serait une meilleure base pour déterminer, à l'intérieur de séries multitemporelles, les mesures douteuses qui ne doivent pas être prises en compte. Pour reprendre le cas de l'Éthiopie méridionale, on pouvait constater, par exemple, que les indices satellitaires de saison sèche ne comprennent que peu de valeurs négatives. Or, celles-ci représentent 3 % des mesures en avril, 1 % en mai, 3 % en juin, 1 % en août et 4 % en octobre ; les résultats, inacceptables pour au moins 3 mois de la saison des pluies, pourraient même être médiocres tout au long de la saison de croissance des plantes.

Comparaisons entre plusieurs années de mesures

Les données digitales Noaa ont été obtenues pour le Sud éthiopien (3 000 pixels) en 1984 et en 1985, mais un mauvais fonctionnement du satellite n'a pas permis de couvrir la période d'avril à juin 1985. Il reste possible de comparer les 2 saisons sèches, par exemple entre janvier et mars, et les fins de pluies, sachant que l'année 1985 a été beaucoup plus humide que l'année précédente sur la zone concernée.

Les résultats ont été tout à fait similaires pour les saisons les plus sèches ; en outre, ils n'ont été différents en saison des pluies que sur le quart de la zone, où l'on observe à la fois concordance entre les mesures aériennes et les mesures AVHRR, et des indices systématiquement plus élevés en 1985. La différence entre les années, pourtant très réelle, n'a pas été perçue sur le désert de Chalbi ; dans les secteurs humides du nord de la surface étudiée, les indices Noaa de 1985 sont supérieurs à ceux de 1984 en juillet et en août, mais l'écart s'inverse pour les mois de septembre et d'octobre.

Grâce aux contrôles aériens, on sait que les indices Noaa obtenus en juillet ont été sous-estimés pour les 2 années. L'estimation par satellite, bonne en octobre 1984, est très mauvaise en 1985 parce que les pluies n'ont pas encore cessé. Finalement, les différences entre les années 1984 et 1985, ou l'absence de différences, peuvent être expliquées par une bonne connaissance du terrain et par les observations annexes sur le climat. Ces conditions seront rarement remplies pour de vastes surfaces où l'on ne dispose au mieux que de rares postes météorologiques et de quelques zones test supposées représentatives (le fait qu'elles soient représentatives au cours d'une année donnée ne signifie pas qu'elles le resteront pour les années suivantes).

La durée annuelle pendant laquelle l'indice est plus élevé qu'au cours de la saison sèche pourrait être une mesure de la croissance végétale plus correcte que l'augmentation des indices. Cependant, le démarrage de la végétation n'est repérable qu'à une ou deux semaines près ; la fin de la production végétale est encore plus imprécise : dans tous les cas, les indices de végétation mesurés par satellite n'apportent que des indica-

tions approximatives sur le comportement végétal et ils devraient plutôt être retenus comme mesures semi-quantitatives.

CONCLUSIONS

Le suivi des indices de végétation par télédétection reste un exercice particulièrement complexe en raison des nombreuses interférences susceptibles de fausser les mesures. Ces difficultés s'ajoutent aux problèmes plus habituels de constitution d'un système d'échantillonnage compatible avec l'échelle à laquelle on travaille ; surtout si on fait appel à l'imagerie puisque chaque fragment d'image devrait être corrélé de façon indépendante aux caractéristiques végétales, sans que l'on puisse extrapoler ni appliquer les résultats à une autre image.

L'usage du radiomètre au sol est plus aisé, à condition toutefois de réaliser un grand nombre de mesures dans un temps assez court pour que la qualité de la lumière incidente soit conservée ; l'automatisation des mesures est souhaitable car c'est la seule technique qui permet une vitesse d'exécution élevée. L'avion enfin est un excellent relais entre les données au sol et l'imagerie ; il assure une échelle intermédiaire avec un bon repérage sur le terrain.

Les mesures d'évolution annuelle exigent la réalisation de mesures multitemporelles ; en conséquence de ce qui précède, il est impossible d'accroître beaucoup la précision des résultats satellitaires sans aboutir à des contrôles au sol trop contraignants. En revanche, il semble que l'on puisse développer des raisonnements satisfaisants à partir des caractères de la Vague verte, c'est-à-dire des courbes successives de fréquences des valeurs d'indice de végétation. La durée de déformation de la courbe obtenue en saison sèche ainsi que la dispersion des mesures, à la fois pendant la croissance végétale et hors saison, seraient les paramètres à considérer puisqu'ils ne font appel qu'aux valeurs relatives des indices et non à des valeurs absolues qui sont généralement mal connues.

J.-C. BILLE : *écologue*, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1

BIBLIOGRAPHIE

HOLBEN (B. N.) et FRASER (R. S.), 1984. - Red and near-infrared response to offnadir viewing. Int. *J. Remote Sensing* : 5-145.

ROUSE (J. W.), HASS (R. H.), SCHELL (J. A.), DEERING (D. W.) et HARLAN (J. C.), 1974. - Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Texas A. and M. Univ., College Station.

TUCKER (C. J.), 1979. - Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Envir.* : 8-127.

TUCKER (C. J.), TOWNSHEND (J. R.) et GOFF (T. E.), 1985. - African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, n° 4685.

Jean-Claude BILLE

Tendances évolutives comparées des parcours d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique de l'Est

INTRODUCTION

Il a fallu une succession exceptionnelle d'années à pluviométrie déficitaire pour promouvoir les études sur la dynamique des savanes d'Afrique. En effet, les pluies des tropiques arides et semi-arides, moins abondantes à partir des années soixante-dix, ont mis en difficulté toute la population de cette zone et, en particulier, les éleveurs dont le cheptel a subi de lourdes pertes. Les scientifiques se sont alors efforcés de décrire l'évolution de la situation et de mesurer une éventuelle dégradation des milieux sahéliens ou arides. (BOUDET, 1977 ; GASTON, 1977 ; LE HOUÉROU, 1977 ; POUPON, 1977).

On pense alors que le climat explique l'évolution du milieu, mais des constatations troublantes vont perturber ce schéma initial trop simple :

- d'une part, il apparaît que des années à pluviométrie favorable n'apportent que peu d'amélioration dans la végétation naturelle dont on connaît pourtant les extraordinaires facultés de résistance au manque d'eau et les aptitudes à la «remontée biologique». Tous les travaux décrivent une production de graines très favorable au resemis des surfaces appauvries et souvent révèlent même un stock semencier parfaitement viable dans le sol ; cependant, la régénération du milieu est médiocre. (LE HOUÉROU, 1973 ; HIERNAUX, 1983 ; ALBERGEL, 1984 ; BERNUS, 1984 ; PEYRE DE FABRÈGUES, 1985) ;
- d'autre part, beaucoup de mesures s'effectuent à l'intérieur de surfaces protégées par des clôtures. La clôture est une garantie de non-interférence d'éléments étrangers avec l'objet des recherches, qui reste l'influence du climat sur le milieu ; les travaux en zone aride doivent tenir compte des grandes variations entre années successives ; tel résultat obtenu après un an d'études, ou tel phénomène observé deux années de suite, sera totalement contredit si les observations se poursuivent et si les enclos deviennent durables pour permettre l'obtention de résultats fiables. Or, l'évolution à moyen terme du milieu protégé est en totale contradiction avec ce qui se passe à l'extérieur de la parcelle d'étude.

Un exemple parmi beaucoup d'autres peut être cité. Dans le nord du Burkina Faso, GROUZIS (1987), sur parcelles en défens, trouve des biomasses en moyenne 2 fois supérieures à celles mesurées hors protection ; dans l'un des cas cités, la quantité de matériel végétal herbacé résiduel, en début des pluies, est de 100 $g.m^{-2}$ sur le défens et la biomasse augmente de 150 $g.m^{-2}$ au cours de la période de croissance. Les valeurs correspondantes, hors de l'enclos, sont respectivement 0 et 100 $g.m^{-2}$. Bien plus, le nombre d'arbres et d'arbustes augmente de 10 à 30 % en trois ans sur les défens, mais il demeure stable à l'extérieur.

On commence alors à parler d'exploitation abusive des savanes surpeuplées, en particulier pendant les mauvaises années climatiques. En réalité, il faudrait admettre qu'un pâturage naturel aride est toujours sous-exploité si les pluies sont bonnes, et sur-exploité lorsqu'elles sont mauvaises. Par ailleurs, comme un écosystème non exploité n'est d'aucun intérêt pour les éleveurs, il s'ensuit que les descriptions de l'évolution des savanes n'ont de sens que si ces savanes sont soumises aux hommes ; un champ est cultivé pour produire le plus possible et on l'abandonne si rien n'y pousse.

Les comparaisons qui suivent concerneront donc des savanes pâturées qui subissent l'action conjointe du climat et des troupeaux. En outre, il ne s'agit que de tendances évolutives, c'est-à-dire de ce qui se passe en quelques années seulement ; lorsque l'on considère des périodes longues, composées de pulsions climatiques diverses, on dispose rarement de toutes les informations nécessaires pour une bonne analyse des résultats.

LES PLUIES EN AFRIQUE INTERTROPICALE SÈCHE

L'objet de ce travail n'est pas une nouvelle définition des climats tropicaux secs ; il n'est pas davantage un commentaire sur les zonations écologiques déjà proposées pour l'Ouest et l'Est africains ; À ce propos, on peut néanmoins remarquer que les descriptions ont été données sans grand souci de standardisation des termes utilisés ; pour s'en convaincre, il suffit de comparer, par exemple, EMBERGER (1942), AUBRÉVILLE (1949), EDWARDS (1956), GRIFFITHS (1958), LEMÉE (1967), PRATT et GWYNNE (1977), lesquels emploient des termes variés. Plus simplement, les exemples traités correspondent, dans tous les cas, à des savanes qui reçoivent en moyenne entre 300 et 600 mm de pluie chaque année et qui, impropres aux cultures, sont plus ou moins sahéliennes en Afrique occidentale, arides ou semi-arides en Afrique orientale.

Pour caractériser la pluviométrie, nous avons retenu 4 stations ; 2 reçoivent de l'ordre de 300 mm d'eau par an et 2 environ 500 mm (tabl. I). Les stations de l'Est afri-

Tableau I - Précipitations comparées (en mm) de quatre stations d'Afrique tropicale sèche

	Afrique de l'Est (KENYA)		Afrique de l'Ouest (SÉNÉGAL)	
STATION ALTITUDE, m.	Garissa 150	Kajiado 1 700	Podor 40	Linguère 140
Janvier	7	35	0	0
Février	2	37	0	0
Mars	18	78	0	0
AvriL	76	143	0	0
Mai	5	72	3	6
Juin	3	8	16	25
Juillet	0	0	58	96
Août	5	0	130	219
Septembre	6	4	75	129
Octobre	15	19	22	48
Novembre	88	67	4	7
Décembre	87	49	0	0
Année	312	512	308	530

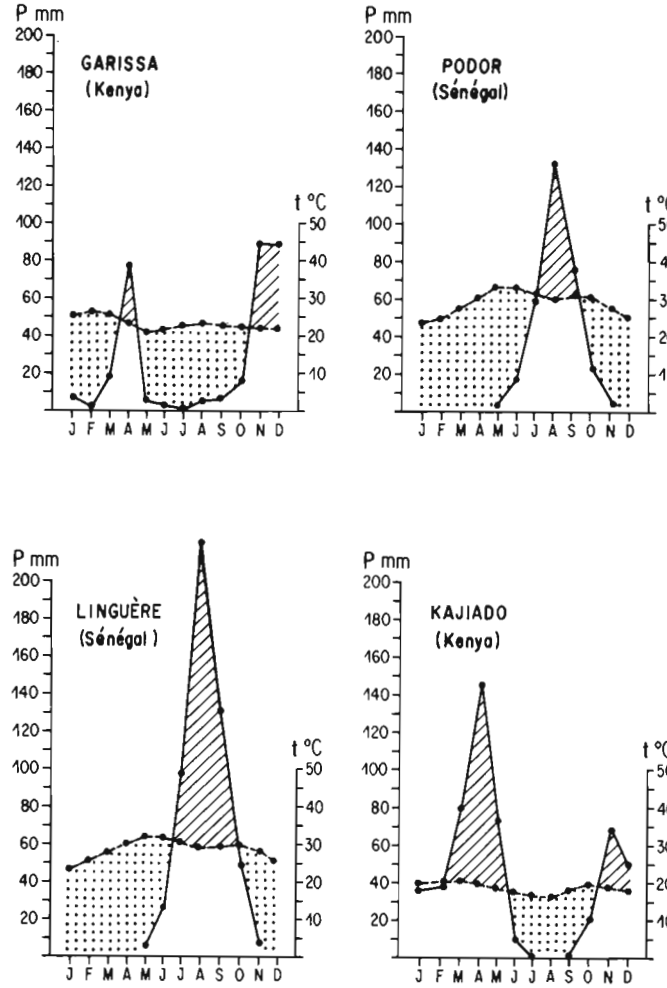


FIGURE 1 - *Diagrammes ombrothermiques des quatre stations retenues.*

cain, au Kenya, sont situées légèrement au-dessous de l'équateur et si les pluies y sont évidemment décalées par rapport à celles de l'Ouest africain (Sénégal), les périodes favorables à la croissance végétale cependant, sont *a priori* de même durée dans les 2 cas, soit trois à quatre mois. En dehors de cette similitude, on constate des différences fondamentales entre le Sénégal et le Kenya (tabl. I ; fig. 1) :

- au Kenya, la distribution des pluies est nettement bimodale avec 2 périodes humides centrées sur avril et sur novembre, alors que dans les stations du Sénégal toutes les précipitations sont concentrées entre juillet et septembre ;
- les mois à pluviométrie maximale sont plus humides dans l'Ouest africain :
  - 130 mm à Podor contre 90 mm à Garissa,
  - 220 mm à Linguère contre 140 mm à Kajiado, soit approximativement 50 % de plus au Sénégal pendant le mois le plus arrosé de l'année ;
- en conséquence, les pluies sont mieux distribuées dans l'Est africain où, certaines années, de janvier à mars, la petite saison sèche, peu marquée, peut autoriser un léger maintien de la croissance végétale. Ainsi, à Kajiado, les probabilités de pluies men-

suelles qui excèdent 50 mm sont de 1 année sur 3 en décembre, janvier et février ; aussi les mêmes probabilités ne sont que de 1 an sur 2 pour mars, mai et novembre ; il est aussi habituel que l'une des saisons de pluies soit très déficitaire et que la pluviométrie annuelle soit alors réduite, en moyenne :

- à moins de 300 mm, à Kajiado, 1 an sur 6,
- à moins de 200 mm, à Garissa, 1 année sur 3 ;
- enfin, au Sénégal, la zonation climatique se fait en fonction de la latitude alors que, au Kenya, elle est surtout une conséquence de l'altitude ; dans ce dernier pays, il existe toujours une bonne corrélation entre l'altitude et les pluies, avec de petites variations dues à l'exposition des pentes ou à des particularités locales du relief très tourmenté.

Si les pluies d'Afrique de l'Est semblent plus favorables aux végétaux, qui bénéficient souvent de saisons actives prolongées, on peut finalement retenir qu'elles sont aussi beaucoup plus variables d'une année à l'autre en raison de l'indépendance totale des 2 saisons humides. Ainsi, les extrêmes pluviométriques enregistrés à Saint-Louis, au Sénégal, sont de 144 et de 691 mm pour une médiane annuelle de 330 mm ; à El Wak, sur la frontière entre le Kenya et la Somalie, ils sont de 85 et de 721 mm pour une médiane presque identique. En Afrique de l'Est, il n'est pas rare que 2, voire 3, saisons de pluies successives soient presque inexistantes, et le régime pluviométrique est parfois monomodal comme dans l'Ouest africain.

LE PASTORALISME AUX DEUX BORDS DU CONTINENT

Les Peul, ou Maures, de l'Ouest africain et les Masaï, ou Somalis, de l'Est africain, demeurent largement tributaires de leurs troupeaux ; si les bovins y dominent, ils sont accompagnés de chèvres et de moutons, surtout chez les Peul, et d'une fraction importante de dromadaires, chez les Somalis. Quoique de façon plus nette en Afrique occidentale, on observe dans les 2 cas une certaine tendance à une dépendance croissante des éleveurs vis-à-vis de l'extérieur, monde agricole ou aide alimentaire, et à une diminution de la fraction bovine du cheptel, quand ce n'est pas à une réduction généralisée de tous les animaux, qui accompagne l'appauvrissement des éleveurs.

Pour de multiples raisons, il n'existe pas de statistiques fiables en ce qui concerne les populations humaines et animales des zones arides d'Afrique. Pour le Sénégal, on sait que ces zones couvrent le quart de la superficie du territoire, soit environ 50 000 km^2, et on peut estimer qu'elles abritent, au nord de la limite des cultures, 15 à 20 % des 2 700 000 bovins du cheptel national, 30 000 chameaux et près d'un million de petits ruminants. Il y aurait donc entre 500 000 et 600 000 équivalents-bovins dans cette partie de la zone aride, avec certainement plus de 10 bovins par kilomètre carré (IBRD, 1984 ; FAO, 1985).

Au Kenya, la densité du cheptel est beaucoup plus variable ; les recensements aériens indiquent de l'ordre de 6 à 8 bovins au kilomètre carré dans le Sud-Est, 8 à 10 bovins au kilomètre carré dans les districts orientaux de Kitui et de la rivière Tana, plus de 25 bovins au kilomètre carré aux abords des montagnes, mais moins de 5 bovins au kilomètre carré dans le Nord du pays. Par ailleurs, les contrôles de terrain révèlent souvent des nombres inférieurs de 30 à 50 % aux densités officielles. En 1978, les valeurs observées étaient de 3,6 bovins, 11 chèvres ou moutons et 2 dromadaires au kilomètre carré (soit, au total, 8 équivalents-bovins), sur les zones arides qui reçoivent moins de 400 mm d'eau par an, c'est-à-dire une densité plus faible qu'au Sénégal. En revanche, il y avait plus de 20 zébus et autant de petits ruminants dans le district de Kajiado, plus humide, et moins de 5 ha par tête en zone semi-aride de façon générale (Kremu, 1972 ; Ilca, 1979).

Pour le Sénégal, les statistiques proposées tiennent compte de la transhumance annuelle et présentent donc des valeurs moyennes dépassées pendant la saison des pluies mais réduites en saison sèche. Les mouvements animaux ont toujours une certaine ampleur et les déplacements, qui dépassent souvent plusieurs centaines de kilomètres, sont assez réguliers au cours des années ; ils associent habituellement une portion de savanes sèches à un territoire plus méridional ou à une vallée humide le long d'un grand fleuve.

Dans le nord et dans l'est du Kenya, les déplacements, s'ils demeurent importants, évoluent davantage en fonction des années ; les territoires des groupes pastoraux sont plus flous et, selon les circonstances, des ethnies différentes peuvent être séparées par des zones tampon vides ou, au contraire, se livrer à une compétition acharnée comme c'est le cas entre les éleveurs somalis et ceux des groupes samburu ou rendille. La densité du cheptel fluctue couramment de 25 % et plus, selon les années, et pas seulement en fonction des saisons, avec possibilité d'incursions des animaux en direction de la côte ou vers les premières pentes de montagnes.

En savanes semi-arides, les mouvements deviennent optionnels. Les éleveurs masaï se contentent généralement d'exploiter tour à tour des niches écologiquement différentes, plateaux et vallées ou encore collines et bas-fonds humides des terres noires qui voisinent à l'intérieur de leur territoire coutumier. En cas de difficultés, ils partent vers les zones d'altitude, sans itinéraire ni but nettement préétablis, et ils s'y heurtent de plus en plus à la résistance des agriculteurs.

Ainsi les climats à régime pluviométrique bimodal imposent dans tous les cas une stratégie pastorale différente de celle de l'Afrique occidentale où règne la grande transhumance annuelle, et les déplacements y sont plus variables en intensité comme en itinéraire. En revanche, dans les 2 cas les savanes sont souvent exploitées au maximum de leur potentiel productif et au-delà en cas d'année médiocre.

LA VÉGÉTATION HERBACÉE

La végétation basse du Nord-Sénégal peut être illustrée à partir des observations effectuées à Fété-Olé, en 1970 (Bille, 1977) (tabl. II).

On voit que le tapis herbacé est presque exclusivement constitué de graminées annuelles, si l'on excepte les bas-fonds à *Zornia* sp. qui n'occupent que 3 % de la surface. Ce tapis s'établit à partir de plus de 50 millions de diaspores par hectare dont 5 millions germent pour ne laisser subsister que 800 000 plantes adultes ; on comprend qu'une sélection aussi brutale puisse donner lieu à un couvert très variable en fonction des années, selon l'intensité et la distribution des pluies.

Plus au sud, des informations ont été collectées, en 1975, sur les ranchs de Dahra et Ndoli (Bille, 1976) où la pluviométrie moyenne annuelle est respectivement de 400 et de 560 mm. On peut considérer dans chaque cas des aires peu pâturées et, au contraire, des surfaces très exploitées par le bétail (tabl. III).

Dans les savanes peu utilisées, si les graminées annuelles demeurent les espèces dominantes, elles sont éventuellement accompagnées d'une graminée pérenne (*Andropogon* spp.) ou d'une légumineuse pluriannuelle (*Tephrosia* spp.), et elles ne constituent plus les trois quarts du couvert, comme à Fété-Olé. Une intensification de l'utilisation par les animaux se traduit par l'abondance de *Zornia* spp. et de *Borreria* spp. qui remplacent une fraction importante des graminées alors que le couvert et la productivité sont peu affectés. À Ndoli, la production de la strate basse n'est pas augmentée par des pluies pourtant plus abondantes qu'à Dahra, car la richesse des sols devient un facteur limitant pour la croissance des plantes.

Tableau II - Strate herbacée à Fété-Olé

Contributions des espèces, % au recouvrement de végétation	Dunes	Ombrage	Bas-fonds
Aristida funiculata/mutabilis	51,3	9,6	3,9
Schoenefeldia gracilis	15,8	5,5	
Eragrostis spp.	2,8		5,7
Brachiaria spp.		13,1	9,2
Panicum laetum/humile		17,3	13,5
Cenchrus biflorus	1,3		
Chloris prieurii	1	7,2	
Digitaria horizontalis		5,5	
Echinochloa colona			13,5
Diheteropogon/Andropogon		4,8	5,4
Autres graminées	9,0	4,8	4,8
Zornia glochidiata	0,7		30,6
Autres dicotylédones	19,1	22,2	15,1
Biomasse, $g.m^{-2}$	59-67	180	330

Tableau III - Espèces dominantes de la strate herbacée, Dahra et Ndoli (Sénégal) en relation avec le niveau de pâturage

	Dahra		Ndoli	
(A = abondantes)	peu pâturé	très pâturé	peu pâturé	très pâturé
Schoenefeldia gracilis	A	+	A	+
Aristida spp.	+		+	+
Eragrostis spp.	+	+	+	+
Cenchrus biflorus	A		+	
Panicées	+	+	+	+
Diheteropogon/Andropogon		+	A	+
Elionurus/Ctenium		+		+
Pennisetum/Loudetia			A	
Zornia glochidiata	+	A		A
Tephrosia spp.	A		+	+
Alysicarpus/Indigofera	+	+	+	+
Borreria spp.	+	+	+	+
Ipomoea/Merremia	+	+		+
Individus par m^2	120	160	300	250
Biomasse, $g.m^{-2}$	250	250	220	290

Des observations comparables ont été faites dans plusieurs autres sites de la zone sahélienne au sens large, en Mauritanie (Boudet, 1986), au Mali (Hiernaux et Diarra, 1985 ; Hiernaux *et al.*, 1986) ou au Burkina Faso (Grouzis, 1987), par exemple.

Au Kenya, des observations ont été réalisées en 1978 (Bille, 1982) (tabl. IV). Par rapport au Sénégal, l'importance respective des graminées et des dicotylédones s'inverse pour la zone la mieux arrosée où les graminées forment la quasi-totalité de la végéta-

Tableau IV - Végétation herbacée au Kenya. Contribution des espèces (%) au recouvrement

a) ZONE ARIDE (300 mm)	Mado Gashi	Chandlers Falls	Kalalut
Aristida mutabilis/kenyensis	19,4	42,8	9,0
Dactyloctenium	12,4		2,1
Chrysopogon aucheri	0,8	4,8	
Urochloa			46,5
Enteropogon	0,3		14,0
Blepharis	12,3	4,6	
Duosperma, Barleria	54,2	9,5	9,3
Ocimum, Indigofera	11,9		4,6
Diverses graminées	0,6	9,2	3,4
Autres dicotylédones		17,2	1
Couvert total %	6,4	4,2	4,3
b) ZONE SEMI-ARIDE (500 mm)	**Empuiyanka**	**Elangata Wuas**	**Mbilini**
Digitaria scalarum/milanjiana	22,6	13,7	30,5
Pennisetum mezianum/stramineum	22,5	47,2	
Themeda triandra	27,5		1,3
Chloris/Eriochloa		6,4	5,6
Eragrostis/Sporobolus	7,4		13,9
Cynodon/Microchloa	20,0		8,9
Lintonia, Bothriochloa		22,7	5,5
Aristida adscensionis		6,9	8,3
Diverses graminées		3,0	2,7
Dicotylédones		0,1	23,3
Couvert total %	39,8	46,6	3,6

tion, avec une contribution de l'ordre de 90 % à une biomasse très élevée (500 à 600 $g.m^{-2}$) ; Mbilini, où une énorme surcharge en bétail a gravement endommagé le site dont le sol est très dénudé, constitue une exception. Les graminées des savanes plus arides forment parfois moins de la moitié d'un couvert clairsemé où les espèces dominantes sont très diverses : acanthacées à Mado Gashi, *Aristida* spp. à Chandlers Falls et graminées hautes à Kalalut.

En outre, et c'est le point le plus important, les espèces végétales sont presque exclusivement pérennes dans la région semi-aride de Kajiado et elles forment encore de 15 à 60 % du couvert dans la partie aride. Il y a peu d'espèces communes aux 2 zones.

TENDANCES ÉVOLUTIVES DE LA STRATE HERBACÉE

Les observations sur la strate herbacée se sont poursuivies pendant plusieurs années aussi bien à Fété-Olé qu'au Kenya. Dans le cas du Sénégal, la période d'étude a inclus la grande sécheresse de 1972 et ses conséquences jusqu'en 1976 ; les pluviométries furent de 33 mm en 1972, de 210 mm en 1973 et de plus de 300 mm au cours des saisons suivantes, cependant que les effectifs animaux avaient été très réduits. La pluviométrie au Kenya a été assez favorable de 1978 à 1980, années qui ont suivi les mesures initiales :

- 725 mm, 532 mm et 202 mm à Garissa ;
- 778 mm, 604 mm et 470 mm à Kajiado.

Les variations les plus remarquables dans le tapis herbacé concernent évidemment le Sénégal septentrional ; la productivité des dunes y a été nulle en 1972 et très faible (10 $g.m^{-2}$) l'année suivante ; en 1974 et en 1975, qui ont vu un brusque retour à la normale, on a constaté plus de 80 $g.m^{-2}$. Les productions sous ombrage et dans les bas-fonds ont été également affectées, puisque, en 1972, leurs productivités ne sont que de 5 à 7 % de la normale. Dans ces situations, le retour à une situation habituelle semble avoir été plus aisé ; dès 1973, on retrouve respectivement 44 % et 70 % de la biomasse d'avant la sécheresse. Le phénomène s'explique par le fait d'un appauvrissement tel des sols de dunes en semences qu'on ne peut espérer plus de 150 germinations et qu'il n'y aura que 20 plantes par mètre carré en 1973.

Pourtant, en 1975, il ne manque que 3 espèces dans la liste floristique établie en 1969 ; on peut donc souligner l'extraordinaire pouvoir de récupération des écosystèmes nord-sahéliens à la suite d'un traumatisme climatique. Une forte charge en bétail modifie la flore, comme à Dahra et à Ndoli, en augmentant le pourcentage de papilionacés et en favorisant les petites dicotylédones (*Gisekia* spp., *Tribulus* spp., *Alternanthera* spp. ou *Gynandropsis* spp. par exemple), mais ne change rien à l'aptitude du milieu à se reconstituer.

Les évolutions constatées au Kenya, en 1980 ou en 1981, sont plus complexes. Pour la partie la plus aride, le couvert herbacé s'est souvent réduit au cours de la période favorable : de 80 % à Mado Gashi, de 70 % à Chandlers Falls et de 40 % à Kalalut. Aux environs de Mado Gashi, il ne reste qu'un cinquième du territoire pour conserver une strate herbacée aussi fournie qu'en 1978 et toutes les espèces végétales sont également touchées. En fait, ce résultat est dû à une importante augmentation du cheptel et l'on trouve de 30 à 40 % d'animaux en plus en fin de période. Outre les nombreuses naissances, des bovins ont envahi ces terrains, depuis l'Éthiopie ou la Somalie, afin de bénéficier de divers programmes de vaccinations et du développement hydraulique, qui a multiplié le nombre de mares artificielles et de forages, au Kenya. Les changements dans les densités des strates basses résultent de la pression de pâture bien davantage qu'ils ne traduisent la pluviosité.

Les mêmes observations s'appliquent à de nombreuses savanes de la région de Kajiado. Ainsi le couvert d'Empuiyankat est réduit à 34,7 % et les graminées les plus appétentes sont les plus touchées ; on ne retrouve qu'un tiers des *Themeda* spp., tandis que *Pennisetum mezianum* est partiellement remplacé par *P. stramineum* et que *Cynodon plectostachyum* recule devant les *Eragrostis* spp. A Elangata Wuas, une moitié des graminées disparaît, les plus touchées étant *Digitaria milanjiana* et encore *Pennisetum mezianum* ; on constate aussi que les surfaces les plus abîmées sont situées aux abords immédiats des campements les plus importants. On ne peut pas accuser ici des envahisseurs venus de loin ; l'augmentation des effectifs des ranchs correspond à une modification du cheptel de la région.

La preuve en est que Mbilini, pratiquement abandonné, voit sa végétation se reconstituer et que le couvert y augmente de 17 %, dès 1978, pour atteindre, en 1980, 210 % de sa valeur initiale ; *Digitaria milanjiana* et *Chloris roxburghiana* sont les graminées agressives qui colonisent les sols ; les savanes environnantes, en meilleur état que le site de référence proprement dit, retrouvent presque la productivité citée en 1967, lors de l'inventaire du milieu avant la mise en œuvre des actions de développement. Le couvert graminéen y est de 20 %.

Pour autant que les mesures de 1967 aient été effectuées selon des méthodes qui autorisent la comparaison avec les observations de la période 1977-1981, l'inventaire initial décrit souvent un couvert herbacé environ 2 fois supérieur à celui de fin de

période, avec une flore qui a peu changé. Si l'on conserve aussi en mémoire les différences observées entre savanes peu pâturées et savanes très utilisées du Sahel méridional, un certain nombre de grandes lignes se dégagent des observations :

- le climat est le facteur essentiel qui dicte la productivité des espèces annuelles au Sahel, mais l'utilisation intense des savanes par les animaux modifie profondément la flore en termes qualitatifs ;
- la pâture, également, modifie qualitativement la flore d'Afrique de l'Est et, en outre, elle a davantage d'influence que le climat sur le couvert herbacé et sur la productivité annuelle, en raison de l'abondance des espèces pérennes ;
- le retour à une végétation optimale, après un accident climatique ou comme conséquence d'une mise en défens du milieu, est rapide au Sahel ;
- les évolutions sont plus lentes dans les zones à régime pluviométrique bimodal, aussi bien dans le sens d'une dégradation que dans celui d'une régénération.

On peut trouver d'autres illustrations de ces phénomènes dans nombre de publications, tant à l'ouest qu'à l'est du continent ; si les observations sont parfois anciennes (CAB, 1951 ; GLOVER et TRUMP, 1970 ; HENDERSON, 1972 ; TRUMP *et al.*, 1973), on trouvera cependant plus de détails dans des travaux plus récents (SICOT et GROUZIS, 1981 ; ALBERGEL *et al.*, 1985 ; BOUDET, 1985a ; LE HOUÉROU, 1987).

LES LIGNEUX DES SAVANES SÈCHES

Si tous les arbres et les arbustes des savanes tropicales arides participent à l'alimentation des animaux domestiques, soit par leurs fruits, soit par leurs feuilles consommées en vert ou sèches, leur importance n'est cependant pas la même partout ; en Afrique occidentale, où la longue saison sèche en impose le recours pour complémenter les pailles en protéines, elle est plus grande qu'à l'est, où il reste habituellement quelques fractions vertes herbacées tout au long de l'année. Malgré tout, dans les 2 cas, ils demeurent la seule ressource des périodes de disette ; leur intérêt a été clairement perçu au Sahel, entre 1972 et 1973, quand ils ont permis la survie des animaux, et que la fin de leur exploitation a entraîné les pertes en bétail les plus graves.

Il importe donc de connaître les réactions de ces ligneux en milieu aride. En 1971, leurs couronnes couvraient moins de 10 % du terrain à Fété-Olé et l'on y dénombrait en moyenne 133 individus de plus de 1 m de hauteur par hectare. Ces arbustes étaient surtout concentrés dans les parties basses où ils étaient 2 à 4 fois plus denses que sur les dunes. Le tableau V précise les proportions des principales essences et donne un aperçu de la population.

Considérant que les plus petits individus n'ont pas été mesurés, le nombre proposé pour la première classe de circonférence est une estimation par défaut et l'ensemble de la population est une représentation de strate ligneuse équilibrée où la régénération est active, avec réduction progressive des nombres d'arbustes les plus vieux. Cette considération reste valable pour les genres considérés isolément, sauf *Commiphora* spp., pour lequel il n'y a pas de jeunes tiges.

La strate ligneuse de Fété-Olé a été décrite plus en détail par POUPON (1980) ; d'autres exemples de boisements sahéliens peuvent être trouvés dans les travaux de LE HOUÉROU (1980). Pour des zones moins sèches, on peut aussi se référer à AUDRU (1977), PIOT et TOUTAIN (1980), BOUDET (1985b) ou CORNET *et al.* (1987).

Les ligneux sont plus nombreux à Dahra et à Ndoli, avec respectivement 500 tiges.ha^{-1} pour les arbres et de 900 à 1 800 tiges.ha^{-1} pour les arbustes. Les savanes les plus exploitées de Dahra n'ont plus que 300 ligneux par hectare, car de nombreuses germinations sont détruites par les bovins. Par ailleurs, la topographie a moins

Tableau V - Strate ligneuse à Fété-Olé. Nombre d'individus par hectare

Circonférence	*Guiera*	*Boscia*	*Grewia*	*Acacia*	*Balanites*	*Commiphora*
moins de 10 cm	35	3 }	5	4	5	
10 - 20 cm	31	5 }				
20 - 30 cm	3	1	5	3	4	
30 - 40 cm			3	2	3	1
40 - 50 cm				1	2	2
50 - 60 cm					1	3
plus de 60 cm					2	6
Total	69	9	13	10	17	12

Tableau VI - Les ligneux sud-sahéliens. Nombre de tiges par hectare

Espèces	Dahra		Ndoli	
	Charge faible	Charge forte	Charge faible	Charge forte
Combretum spp.	220	48	985	280
Guiera senegalensis	171	126	389	280
Balanites aegyptiaca	57	7		
Acacia senegal/macrost	12	5	189	
Dicrostachys glomerata	23		51	20
Boscia senegalensis		10	18	
Grewia spp.		12	41	
Commiphora/Feretia			72	
Divers	12	3	88	246
Total	495	310	833	874

d'impact sur la densité ligneuse qu'à Fété-Olé et la flore ligneuse est plus riche. Le tableau VI décrit le couvert d'arbres et arbustes des différents sites.

Sauf *Balanites* spp., tous les arbres ont une croissance plus active qu'à Fété-Olé et les populations sont en expansion dans les savanes les moins exploitées. *Combretum glutinosum* est particulièrement sensible à l'action du bétail, mais les animaux peuvent aussi promouvoir un certain envahissement par certaines espèces comme *Acacia macrostachya*.

Les ligneux sont plus abondants en Afrique de l'Est aride que dans le Sahel septentrional. À Mado Gashi, on trouve plus de 200 arbustes par hectare avec un couvert des couronnes de près de 20 % ; les espèces les plus nombreuses sont *Acacia reficiens* (95 individus.ha^{-1}), *Salvadora persica* (20 individus.ha^{-1}), *Cordia* (13 individus.ha^{-1}), plusieurs espèces du genre *Commiphora*, *Capparis decidua* et *Acacia mellifera*. La flore ligneuse est également plus variée qu'au Sahel dans les différents sites en raison de la diversité des substrats : sables, limons, terrains volcaniques, etc. Les ensembles dunaires de Kalalut sont dominés par les *Commiphora* spp. et des *Terminalia* spp. qui couvrent 22 % du terrain ; les *Acacia* spp., essentiellement *A. nubica*, et *Grewia tenax* représentent 2 % du recouvrement dont le total est de 27 % pour 575 arbustes par hectare.

C'est à proximité de Chandlers Falls que les ligneux ont le couvert le plus élevé, soit 42,7 % ; on trouve 386 tiges.ha^{-1}, dont 108 *Combretum aculeatum*, 52 *Grewia villosa*, 50 *Boscia angustifolia*, 21 *Commiphora* spp. et 17 *Acacia tortilis*. La densité arbustive augmente encore vers l'est pour culminer à près de 1 600 individus.ha^{-1} pour le même couvert. D'autres mesures dans la région de Garissa confirment l'importance des arbres où plusieurs espèces de *Acacia* spp. et de *Commiphora* spp. dominent habituellement :

- à Dadaab, *Commiphora* assure plus du tiers du couvert total qui atteint, avec *Acacia reficiens*, 26,3 % ;
- dans les environs de Hola, 22 % des arbustes sont des *Commiphora* spp., 23 % des *Acacia reficiens* et 10 % d'autres espèces de *Acacia (A. nilotica, A. tortilis* et *A. mellifera).*

On ne dispose pas d'étude de population à proximité de Garissa, mais on a remarqué que les jeunes individus étaient toujours nombreux dans les savanes les moins boisées alors que les formations les plus denses ont manifestement atteint un seuil de déséquilibre qui se manifeste par l'abondance d'arbres morts. Dans certains cas, les jeunes plantules manquent d'espace pour s'installer depuis sans doute plus d'un demi-siècle et les arbres les plus nombreux ont un diamètre supérieur à 10 cm ; leur apparition a coïncidé avec l'implantation des éleveurs sur ces terres qui a entraîné une réduction de la faune sauvage, en particulier des éléphants, destructeurs d'arbres. En Afrique de l'Est, ce phénomène est d'ailleurs constant et des cas extrêmes peuvent être observés dans le Sud éthiopien, avec des boisements de 1 700 à 2 000 tiges.ha^{-1} et la formation de véritables fourrés. Des envahissements ligneux similaires sont décrits par GLOVER *et al.* (1959), PRATT (1964 ; 1966), MALUKI (1969).

Dans la zone depuis longtemps semi-aride et systématiquement soumise au bétail, le couvert des arbres et des arbustes n'augmente pas notablement, car les sols à hydromorphie temporaire sont peu favorables aux ligneux, souvent représentés par les seuls *Acacia seyal* et *A. drepanolobium*, et le boisement moyen de la zone est inférieur à celui de savanes plus sèches. On a retenu comme assez représentative la végétation ligneuse des plateaux de Mbilini (tabl. VII), dont le couvert est légèrement supérieur à 20 %.

Tableau VII - Population ligneuse, Mbilini. Nombre d'individus par hectare

CIRCONFÉRENCE	*Acacia tortilis*	*A. mellifera*	*Grewia*	*Commiphora*	Divers
1 - 15 cm	37	21	21	6	23
16 - 30 cm	52	14	11	18	9
31 - 45 cm	98	18	8	32	12
46 - 60 cm	46	6	1	24	6
61 - 75 cm	6			5	1
plus de 76 cm	2			3	
Totaux	241	59	41	88	51

Cette population végétale est révélatrice de l'historique de la région. En effet, des coupes transversales de tiges ont montré que la croissance radiale des *Acacia tortilis* est de l'ordre de 1,5 mm par an ; en 1980, les arbres les plus nombreux auraient donc une quarantaine d'années ; ils dénotent un envahissement ligneux terminé vers 1940, l'époque à laquelle les éleveurs ont déserté le territoire pour échapper aux réquisitions

de bétail par les troupes combattantes. Les sécheresses de 1960 et de 1975 ont encore accentué le déficit en jeunes arbustes, mais les signes de reprise du boisement sont manifestes, avec un grand nombre de jeunes plantules et de germinations.

Les effets de la substitution d'animaux domestiques à la faune sauvage semblent donc les mêmes à travers toute la partie aride de l'Afrique orientale ; une augmentation de la strate ligneuse compense la diminution de la strate herbacée. Dans les causes de ce changement cependant, on peut s'interroger sur la part qui revient au bétail et celle qui revient aux feux ; non seulement la pâture supprime une large part de combustible, mais les éleveurs ont davantage tendance à constituer des réserves fourragères sur pied qu'à nettoyer les savanes par brûlis et les incendies sont exceptionnels. Chez les Masaï en particulier, la gestion traditionnelle du territoire pastoral comporte la mise en défens d'une partie de l'espace, réservée aux veaux en sevrage et aux animaux malades.

L'ÉVOLUTION DES LIGNEUX

En Afrique de l'Est, les contrôles réalisés deux ou trois ans seulement après la description dont il a été fait état ne montrent jamais de changement significatif dans le couvert des arbres. On note seulement que les populations arbustives demeurent envahissantes à la fin de la période et que les plantules sont nombreuses, confirmation éventuelle de l'absence d'impact négatif des fortes charges en bétail sur les arbres. S'il en va certainement différemment des concentrations d'animaux sauvages, notamment les girafes, les éléphants et plusieurs espèces d'antilopes qui se nourrissent surtout de feuilles et de jeunes rameaux d'arbres, les effets dévastateurs ne seront perceptibles qu'à plus long terme.

Un exemple particulièrement frappant a été observé lorsque tous les éléphants de la région ont été concentrés dans le Parc national de Tsavo ; à l'intérieur des limites de ce dernier, ne se trouvent plus en moyenne que 175 tiges ligneuses par hectare (dont 70 *Acacia* spp. et 50 *Commiphora* spp.), alors que le ranch voisin de Taru porte 1 170 arbres par hectare pour un couvert de 60 %. En outre, la flore ligneuse de Taru, qui est très diversifiée, comprend 340 *Commiphora* spp., 146 *Grewia similis*, 100 *Acacia nilotica*, 115 *Sericocomopsis* sp., 92 *Combretum apiculatum*, 62 *Acacia tortilis*, 31 *Boscia cordifolia*, 46 *Sterculia africana*, 25 *Acacia brevispica*, 23 *Cordia ovalis*, 20 *Albizzia* spp., 32 *Maytenus* spp., 51 *Premna* spp. et une dizaine d'autres espèces moins fréquentes. La destruction du couvert ligneux de Tsavo a largement contribué à la mort des éléphants maintenus dans le parc pendant l'année 1976, déficitaire en pluie.

Les arbustes de Fété-Olé ont été à nouveau recensés en 1975, après la grande sécheresse sahélienne. On ne retrouve sur les dunes que 39 individus.ha^{-1} au lieu de 105 auparavant et seuls les *Balanites* et *Boscia senegalensis* y ont résisté à la sécheresse. En revanche, la densité d'arbustes a augmenté dans les bas-fonds (avec 292 tiges.ha^{-1} contre 238 auparavant), ainsi qu'en position intermédiaire où les populations de *Boscia* et de *Guiera* ont explosé, de sorte qu'il ne manque que 20 % des individus en moyenne. L'absence de toute possibilité d'abreuvement sur la zone ayant tenu à l'écart les consommateurs primaires, il n'y a donc pas eu de dommages généralisés dans la strate ligneuse.

On a également pu déterminer les conséquences de l'année sèche sur les ranchs de Dahra et de Ndoli, en comptant les arbres morts à l'issue de la période. Les savanes les moins pâturées ont connu une diminution moyenne des nombres d'arbres et d'arbustes respectivement de 22 % et de 8 %, mais les surfaces les plus pâturées ont vu leurs strates ligneuses réduites de 48 %, à Dahra, et de 41 %, à Ndoli. Si, logiquement, les espèces les plus touchées ont été celles qui se trouvaient en limite nord de leur aire

d'extension, comme *Terminalia avicenioides, Ximenia americana* ou *Bombax* à Ndoli, les *Acacia* spp. cependant, l'ont très été également, en dépit de leur adaptation supposée aux conditions sahéliennes.

Il apparaît donc, pendant la grande sécheresse au Sahel, qu'il y a eu convergence des influences climatiques et humaines, mais le second facteur semble l'avoir emporté de beaucoup sur le premier. On peut admettre en première approximation que les ligneux sahéliens, tout comme ceux de l'Afrique de l'Est, font preuve d'une très bonne tolérance aux aléas pluviométriques ; cependant, les récits des voyageurs du XXe siècle décrivent un Sahel plus boisé qu'il ne l'était en 1970, sans parler de l'évolution régressive accélérée du boisement au cours des quinze dernières années (BOURLIERE et HADLEY, 1970 ; VALENZA et DIALLO, 1972) ; les savanes orientales, au contraire, étaient plus ouvertes qu'elles ne le sont actuellement (GARDNER, 1936 ; EDWARDS, 1939 ; PICHI SERMOLLI, 1955 et les remarquables documents photographiques de SCHANTZ et TURNER, 1958).

La seule différence entre les zones arides de l'Ouest et de l'Est africain résiderait dans le comportement des éleveurs vis-à-vis des arbres. Les pasteurs sahéliens, qui ont une conscience aiguë du rôle des ligneux dans l'alimentation des troupeaux, s'efforcent de mettre à la disposition du bétail un maximum de feuilles ; accoutumé à survivre grâce à elles, le zébu sahélien en consomme plus volontiers que les bovins des régions arides orientales. Dès que la nécessité s'en fait sentir, l'éleveur sahélien élague des branchages de *Acacia* spp. ou de capparidacées qu'il peut disposer au sol à destination de son troupeau, et même transporter jusque chez lui ou au marché ; cette activité est inhabituelle au Kenya ; les ligneux y sont seulement considérés comme un substitut de l'herbe, quand celle-ci vient à manquer, et les prélèvements sur arbustes n'y ont été observés que chez les nomades éleveurs de chèvres des zones subdésertiques, à l'occasion de déplacements en régions très hostiles.

Des Masaï ont été interrogés sur leurs sentiments face à l'envahissement de leurs parcours par un arbuste commun des savanes d'altitude, *Tarconanthus camphoratus,* qui couvre jusqu'à 65% du terrain dans les savanes assez humides. Une indifférence tolérante traduit leur réaction habituelle qui est de considérer que leurs animaux peuvent à la rigueur manger cette composée, et surtout qu'ils auraient la possibilité, si nécessaire, de l'éliminer par le feu. En réalité, la plante ne présente pratiquement aucune appétence, mais les éleveurs répugnent par principe à détruire les ligneux.

CONCLUSIONS : L'AVENIR DES SAVANES ARIDES

Lorsque l'on récapitule les enseignements de ce rapide survol de quelques situations d'Afrique tropicale, on constate un problème majeur dans la comparaison des savanes. En effet, si les conditions édaphiques du Sahel sont assez constantes, l'Afrique orientale, au contraire, est hautement diversifée.

Dans le premier cas, les sols sont plutôt sableux, même si les dépressions ont une granulométrie plus fine et si quelques roches ou zones gravillonnaires modifient localement le régime hydrique ; la teneur des sols en éléments nutritifs est habituellement médiocre, de sorte qu'une pluviosité accrue n'augmente la productivité herbacée que dans les situations les plus arides et ne se traduit ailleurs que par une intensification des boisements.

Dans le second cas, en revanche, on trouve de grandes étendues sableuses, mais aussi des terrains calcaires (comme dans l'Ogaden et en Somalie) et surtout, un peu partout, des terrains volcaniques qui vont du plateau rocailleux de laves récentes aux riches sols basaltiques capables d'un rendement 3 à 4 fois supérieur à celui des sables,

mais en partie peu favorables aux espèces ligneuses à cause des excès temporaires d'eau. Le surpâturage peut y détruire la végétation, il n'épuise la richesse du substrat que par la voie temporaire de l'érosion entre le moment où le terrain est nu et celui où il est densément boisé.

Une fois cette réserve émise, les types d'évolution des savanes sous exploitation excessive sont différents aux 2 extrêmes arides du continent :

- d'un côté, la végétation herbacée se modifie profondément et se raréfie tandis que les arbustes sont évincés et, par suite, la survie des animaux domestiques devient impossible ;
- de l'autre, l'herbe disparaît, remplacée par des fourrés denses.

Les vitesses d'évolution également sont différentes : changements brutaux et par à-coups à l'ouest, où chaque nouvelle sécheresse repousse les éleveurs de quelques kilomètres vers le sud bien que la reconstitution de la savane soit possible au prix de quelques années de protection ; évolution lente et insidieuse, à l'est, pour aboutir à ces boisements stables, capables de perdurer pendant des siècles si l'on n'intervient pas.

Les tendances évolutives, de même, sont influencées différemment selon le stade d'évolution au départ. Lorsque les dommages sont peu accusés, il suffit, au Sahel, d'une saison pour y remédier, alors qu'à l'est il faut combiner le temps et le feu pour renverser les processus ; après une dégradation plus poussée, il restera seulement l'herbe à l'ouest et les arbres à l'est ; à moins qu'il ne reste aucune végétation dans les 2 cas : de vastes étendues de sols du Sahel, limoneux ou limono-argileux, sont dénudées et leur surface s'est colmatée de sorte que les germinations y sont devenues aléatoires (PEYRE DE FABRÈGUES et ROSSETI, 1971 ; BOUDET et COULIBALY, 1976 ; D'HERBÈS, 1980 ; etc.). De la même façon, des coupes d'arbres pour la production de charbon de bois laissent les sols dénudés dans la vallée du Rift.

Enfin, l'adaptation des hommes aux changements dans les savanes paraît suivre des voies différentes, en dehors de l'abandon des activités pastorales qui amène chaque année nombre d'éleveurs aux abords de Dakar ou de Nairobi pour tenter d'y trouver un hypothétique travail salarié. À l'ouest, la réaction des éleveurs consiste à envahir les confins méridionaux de leur domaine alors qu'à l'est ils ont commencé à remplacer leurs bovins par des chèvres et par des dromadaires capables de tirer partie des arbustes.

Ce dernier point peut être illustré à partir des recensements effectués sur 2 ranchs communautaires des environs de Kajiado (BILLE, 1981). Le premier, Mbirikani, est en assez bon état et chaque famille y dispose de 500 ha pour 110 zébus et 70 moutons ou chèvres ; le second, Olkarkar, est déjà assez dégradé : il offre 300 ha par famille qui possède chacune 52 bovins et 60 petits ruminants. La surpopulation à Olkarkar se traduit donc à la fois par une détérioration progressive du milieu, par un appauvrissement des éleveurs et par un rapport entre le nombre de petits ruminants et celui de zébus qui passe de 0,6 à 1,1.

En terrain plus aride, les bovins sont remplacés par des dromadaires chez les peuples rendille ou gabbras ; on imagine aisément l'issue du processus : une stérilisation totale des parcours par destruction de la végétation ligneuse après disparition de l'herbe. Il n'y a pas lieu d'être optimiste à propos de l'avenir des zones tropicales arides du continent africain si l'élevage du bétail s'y maintient avec une intensité aussi élevée que celle que l'on observe actuellement ; les 2 tendances évolutives impliquent une catastrophe à plus ou moins long terme, à moins d'une réorganisation totale et complexe des territoires à vocation pastorale avec privatisation des terres pour en responsabiliser les utilisateurs, appel aux techniques d'agroforesterie, gestion très stricte des ressources primaires et régulation du cheptel.

J.-C. BILLE : *écologue*, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1

Bibliographie

ALBERGEL (J.), 1984. - Les données pluviométriques, hydrologiques et agronomiques dans la phase de persistance sèche en Haute-Volta. ORSTOM/FAO.

ALBERGEL (J.), CARBONNEL (J-P.) et GROUZIS (M.), 1985. - Sécheresse au Sahel, incidences sur les ressources en eau et productions végétales : cas du Burkina Faso. Comm. Agrhymet, Niamey.

AUBRÉVILLE (J.), 1949. - Climats, forêts et désertification de l'Afrique. Soc. Ed. Géogr. Mar. et Col., Paris.

AUDRU (J.), 1977. - Les ligneux et sub-ligneux des parcours naturels soudano-guinéens en Côte-d'Ivoire. Synthèse n° 8, IEMVT Maisons-Alfort.

BERNUS (E.), 1984. - L'homme et l'animal concurrents - Problèmes d'écologie pastorale au Sahel. *Mém. ORSTOM*, 106 : 106-122.

BILLE (J.-C.), 1976. - Végétation et productivité de cinq sites sahéliens au Sénégal. Cipea Addis Abeba.

BILLE (J.-C.), 1977. - Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris.

BILLE (J.-C.), 1981. - Olkarkar, Merueshi and Mbirikani areas, a first comparison. Ilca Nairobi.

BILLE (J.-C.), 1982. - Mesure des changements dans les systèmes de production animale au Kenya ; compléments sur l'étude de l'évolution du milieu entre 1977 et 1981. Cipea Addis Abeba.

BOUDET (G.), 1977. - Désertification ou remontée biologique au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.* : 12-4.

BOUDET (G.), 1985a. - Conservation et évolution des systèmes pastoraux. Colloque «Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelle recherche pour le moyen terme ?»Cirad, Dakar Ngor. *In Cah. de la recherche et développement*, n° 6 : 17-19.

BOUDET (G.), 1985b. - L'arbre et l'élevage. *Aménagement et Nature*, 81.

BOUDET (G.) 1986. - Recherches pluridisciplinaires sur les pâturages, leur conservation et l'élevage en Rép. Islamique de Mauritanie. Rapp. IEMVT/Cirad, Maisons-Alfort.

BOUDET (G.) et COULIBALY (M.), 1976. - Pâturages du Gourma et Seno-Mango. Rapp. DGRST Paris, ACC Lutte contre l'aridité, *multigr.*

BOURLIERE (F.) et HADLEY (M.), 1970. - The ecology of tropical savannas. *Ann. Rev. Ecology and System.*1.

CAB (Commonwealth Agricultural Bureau), 1951. - Management and conservation of vegetation in Africa. *Bull.*, 41 Pasture and Field Crops.

CORNET (A.), DELHOUME (J.-P.) et MONTANA (C.), 1987. - Dynamics of striped vegetation patterns and water balance in Chihuahuan desert. Mexico, Symp. Vegetation structure, utrecht).

D'HERBÈS (J.-M.), 1980. - Stock de graines et germination en fonction des types d'état de surface du sol : étude des potentialités phytodynamiques dans les friches post-culturales en région aride tunisienne. Rapp. DGRST/ ORSTOM/Ira Médecine, *multigr.*

EMBERGER (L.), 1942. - Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique. *Bull. Soc. Hist. Nat.* Toulouse : 77-2.

EDWARDS (D. C.), 1939. - Natural reversion to grass. *E.A. Agric. Journal*, 4.

EDWARDS (D. C.), 1956. - The ecological regions of Kenya : their classification in relation to agricultural development. *Empire j. of Exp. Agr.*, 24.

FAO (Food and Agriculture Organization, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), 1985. - Annuaire de la production agricole. FAO Roma.

GARDNER (H. M.), 1936. - Trees and shrubs of Kenya colony. Gov. Printer, Nairobi.

GASTON (A.), 1976. - Projet *Quelea quelea*, rapport final - travaux phytoécologiques en relation avec la lutte contre *Quelea quelea* dans le bassin du lac Tchad. IEMVT/FAO, Maisons-Alfort, *multigr.*

GASTON (A.), 1977. - Connaissance du couvert végétal et évolution de la végétation sous diverses actions, en particulier la sécheresse. IIIe Congr. Les Pays du Soudan central, Khartoum.

GASTON (A.), 1986. - Évolution d'un système pastoral au Tchad. Sémin. régional La dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens, Unesco/CILLS/EISMV/Fapis Dakar.

GLOVER (P. E.), TRUMP (E. C.) et WILLIAMS (R.), 1959. - Note on mechanical bush clearing. *E. A. Agr. J.*, 25.

GLOVER (E. C.) et TRUMP (E. C.), 1970. - An ecological survey of the Narok District of Kenya Masailand, K. National Parks, Nairobi.

GRIFFITHS (J. F.), 1958. - Climatic zones of East Africa. *E. A. Agr.*, 23.

GROUZIS (M.), 1987. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens - Mare d'Oursi, Burkina Faso. Thèse doct. univ. Paris-Sud, *multigr.*

HENDERSON (G. R.), 1972. - Rumuruti grazing trials. *Annual review dep. of Agric.*, Kenya.

HIERNAUX (P.), 1983. - Impact de la sécheresse sur la production et la structure du tapis herbacé : compte-rendu d'une visite effectuée à Niono, Nampala et Diafaraba. Doc. programme Ilca Bamako, *multigr.*

HIERNAUX (P.), DEMBELE (D.) et SAMASSEKOU (D.), 1986. - Étude du stock semencier de quelques sols sahéliens après la sécheresse des années 1983-84 : potentialités d'une régénération naturelle. Doc. Progr. Cipea, Bamako.

HIERNAUX (P.) et DIARRA (L.), 1985. - Croissance des herbacées sahéliennes : suivi de l'évolution de la structure et de la biomasse de quelques pâturages du ranch de Niono, Mali, au cours de la saison des pluies 1983. Doc. progr. Cipea Bamako.

IBRD (International Bank for Reconstruction and Development), 1984. - Word Agricultural statistical yearbook. IBRD Washington.

ILCA, 1979. - District Ranch development briefs. Ilca W. D. 13, Nairobi.

KREMU, 1972. - Kenya livestock density Maps. Kenya Rangelands Ecological Monitoring Unit Nairobi.

LE HOUÉROU (H. N.), 1973. - Peut-on arrêter la désertisation ? *Coll. La désertisation au sud du Sahara*, Nouv. Éd. africaines, Dakar - Abidjan).

LE HOUÉROU (H. N.), 1977. - Biological recovery versus desertification. *Econ. Congr.* 53.

LE HOUÉROU (H. N.), 1980. - Browse in Africa : the present state of knowledge. Ilca, Addis Abeba.

LE HOUÉROU (H.N.), 1987. - The grasslands of the Sahel. Natural Grasslands, Ecosystems of the World - Coupland Éd. Elsevier, Amsterdam.

LEMÉE (G.), 1967. - Précis de biogéographie. Masson, Paris.

MALUKI (M. M.), 1969. - Weed and bush control in the United States and Australia, with special implications to Kenya Rangeland development (FAO/USAID/Kenya Range management division, Nairobi).

PEYRE DE FABRÈGUES (B.), 1985. - Conséquences de la sécheresse dans le domaine pastoral de la Rép. du Niger. Dével. agr. et conserv. du patrimoine nat. dans les Pays du Tiers-monde, Gembloux.

PEYRE DE FABRÈGUES (B.) et ROSSETI (C.), 1971. - Évolution des pâturages naturels sahéliens du sud Tamesna, Niger. *Étude agr.*, 32 IEMVT, Maisons-Alfort.

PICHI SERMOLLI (R. E.), 1955. - Tropical east Africa. *In* : plant ecology, reviews of research : arid zone research, Unesco, Paris.

PIOT (J.) et TOUTAIN (B.), 1980. - Utilisation des ligneux sahéliens par les herbivores domestiques ; étude quantitative dans la zone sud de la mare d'Oursi Haute-Volta. CTFT/IEMVT Nogent-sur-Marne.

POUPON (H.), 1977. - Évolution du peuplement d'*Acacia senegal* dans une savane sahélienne au Sénégal de 1972 à 1976. ORSTOM, Dakar, *multigr.*

POUPON (H.), 1980. - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au Nord du Sénégal. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 115, Paris.

PRATT (D. J.), 1964 - Bush-control studies in the drier areas of kenya. *Empire J. of Exp. Agric.*, 32.

PRATT (D. J.), 1966. - An evaluation of the Holt Bush-breaker in Tarconanthus Acacia thicket. *Journal of applied Ecol.*, 3.

PRATT (D. J.) et GWYNNE (M. D.), 1977. - Rangeland management and ecology in East Africa. Hodder and Stroughton, Londres.

SHANTZ (H. L.) et TURNER (B. L.), 1958. - Photographie documentation of vegetational changes in Africa over a third of a century. Univ. of Arizona Press, Tucson.

SICOT (M.) et GROUZIS (M.), 1981. - Pluviométrie et production des pâturages naturels sahéliens. Rapp. ORSTOM, Ouagadougou, *multigr.*

TOUTAIN (B.), 1976. - Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute-Volta : étude des effets de la mise en repos temporaire de quelques formations sahéliennes dégradées sur leur évolution. Rapp. IEMVT, Maisons-Alfort.

TRUMP (E. C.), NOBLE (N. D.), DENT (J. R.) et NGUTTER (L.), 1973. - Range management division of the Ministry of agriculture, Kenya : rangelands surveys. T. report 5, UNDP/FAO, Rome.

VALENZA (J.) et DIALLO (A. K.), 1972. - Étude des pâturages naturels du nord Sénégal. *Étude agr.*, IEMVT, Maisons-Alfort.

Henri-Noël Le Houérou

Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride

INTRODUCTION

Il est bien connu que les précipitations sont très variables en zone aride ; cette variabilité se manifeste à la fois dans le temps et dans l'espace ; elle est inversement liée aux hauteurs moyennes, autrement dit, elle croît avec l'aridité. Toutefois, le degré de variabilité ne dépend pas seulement des précipitations moyennes annuelles, mais aussi du type de climat considéré, c'est-à-dire du régime saisonnier des précipitations et des températures et aussi des conditions géographiques générales et locales.

Comme les productivités primaire et secondaire dépendent avant tout (mais pas seulement) des précipitations en zone aride, il était intéressant d'examiner les relations entre ces différents paramètres et leur variabilité, afin de déterminer si, par exemple, la variabilité de la production est atténuée ou, au contraire, accentuée par rapport à celle de la pluviosité.

Pour ce faire, nous avons comparé la variabilité de la pluviométrie annuelle sous différents climats (méditerranéen, subtropical, tropical, équatorial, tempéré, etc.) par tranches de moyennes annuelles identiques, généralement de 100 mm.

Ensuite, nous avons comparé la variabilité de la pluviosité annuelle à celle de la production primaire de la végétation naturelle et des cultures, puis à celle de la production secondaire par le biais de l'effectif des troupeaux. Cette comparaison a été effectuée sur un nombre de sites aussi élevé que possible, sous divers types de climats de la zone aride mondiale, à partir des données de la littérature. Ce dernier point ne laisse pas de soulever des problèmes, car si les moyennes pluviométriques publiées sont extrêmement nombreuses et généralement fiables, les paramètres statistiques qui les concernent ne sont généralement pas disponibles ; il faut donc recourir aux données brutes afin de calculer ces paramètres. Ces données brutes sont également difficiles à obtenir. Par ailleurs, les données précises et fiables relatives à la production primaire sont très rares et/ou souvent enfouies dans la littérature grise ; il s'en faut souvent que les données pluviométriques de ces sites accompagnent celles de la production. Les données relatives à la production secondaire sont encore beaucoup plus rares : il s'agit généralement d'ordres de grandeur estimés à partir d'effectifs évalués à l'échelle d'un pays ou d'une province ; ces estimations sont basées sur des enquêtes, sur les déclarations d'impôts, sur des campagnes de vaccinations, ou tout simplement sur des évaluations plus ou moins subjectives de la part des autorités administratives.

La collecte et le rassemblement des données donc constituent déjà en eux-mêmes un travail d'investigation. Cependant, à la suite de recherches bibliographiques approfondies menées grâce à de nombreuses contributions, nous avons pu réunir quelque 80 séries de données qui comprennent un millier de couples de mesures de la pluviosité annuelle et de la production primaire annuelle. En ce qui concerne la production secondaire, nous avons utilisé des données statistiques détaillées des effectifs des troupeaux sur une période de vingt-cinq ans dans le Sud tunisien (LE HOUÉROU, 1962).

MÉTHODOLOGIE

Un des problèmes méthodologiques majeurs réside dans le choix du critère de mesure de la variabilité. Si les possibilités sont nombreuses, aucune ne se révèle entièrement satisfaisante ; chaque méthode présente des avantages et des inconvénients (VARNEY, 1925 ; KATSNELSON, 1956 ; NEUMAN, 1956 ; KATSNELSON et KOTZ, 1957 ; WALLÈN, 1958 ; LE HOUÉROU, 1959 ; WALLÈN et BRICHAMBAUT, 1962 ; KATSNELSON, 1964 ; BROWN et COCHEMÉ, 1969 ; AUSTIN et NIX, 1978 ; LE HOUEROU, 1984 ; 1986 ; 1988).

Plusieurs méthodes ont été testées : écart moyen à la moyenne, écart moyen séquentiel, indices percentiles, coefficient de variation, rapport des extrêmes, différence relative des extrêmes, etc. Nous avons constaté que l'utilisation de l'écart-type et du coefficient de variation présentait plus d'avantages et moins d'inconvénients que les autres méthodes, en dehors des régions proprement désertiques. En effet, le taux d'asymétrie demeure généralement modéré au-dessus de 100 mm de moyenne annuelle, la différence entre la moyenne et la médiane étant le plus souvent inférieure à 10 %. Dans 95 % des cas environ, cette différence est positive, c'est-à-dire que la moyenne est supérieure à la médiane ; mais la situation inverse se présente dans environ 5 % des cas. Il n'y a donc pas d'inconvénient sérieux à utiliser cette méthode lorsque le taux d'asymétrie est faible, car l'erreur ainsi commise est inférieure à l'erreur expérimentale sur les mesures (GLOVER et ROBINSON, 1953 ; GLOVER et HENDERSON, 1954 ; GRIFFITHS, 1958, 1961 ; GRIFFITHS et HEMMING, 1963 ; BROWN et COCHEMÉ, 1969 ; LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988).

Le tableau III montre d'ailleurs que, dans le cas d'un taux d'asymétrie de 10 % (sous une pluviosité moyenne de 220 mm), la différence entre la probabilité gaussienne et les déciles est très faible.

Dans les chiffres que nous avons traités, l'écart moyen à la moyenne (EMM) est systématiquement et significativement inférieur de 20 % à l'écart-type (ET) ou au coefficient de variation (CV) :

EMM = 0,80 ET +/- 0,05

L'écart moyen séquentiel (EMS), au contraire, est systématiquement supérieur à l'écart-type de 25 % :

EMS = 1,25 ET +/- 0,05

Mais ce rapport EMS/ET tend à augmenter légèrement avec la variabilité ; il est d'environ 1,2 sous 500 à 1 000 mm de pluviosité moyenne annuelle et de 1,3 sous 50 à 200 mm. Cependant, contrairement à l'EMM et à l'ET, l'EMS ne dépend pas du type de distribution et présente donc un avantage lorsque les distributions sont fortement asymétriques.

La méthode des déciles (d 0,9 - d 0,1 / d 0,5), utilisée par les climatologues australiens (AUSTIN et NIX, 1978), offre le même avantage de ne pas dépendre du type de distribution.

Nous avons aussi utilisé l'indice de fiabilité qui est, en quelque sorte, l'inverse du coefficient de variation, c'est-à-dire le rapport entre la fréquence de 80 % (ou de 75 %) et la moyenne (ou la médiane). Cet indice est souvent utilisé par les agroclimatologues (HARGREAVES, 1973, 1974 ; DANCETTE, 1977 ; DANCETTE et HALL, 1979 ; VIRMANI *et al.*, 1980 ; LE HOUÉROU, 1982-1984 ; LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988). Bien entendu, le taux de fiabilité décroît avec l'aridité ; en zone désertique, il peut descendre à 0,20 et il atteint généralement 0,70 à 0,80 en zones semi-aride et subhumide, lorsque la distribution s'approche de la normalité gaussienne. En d'autres termes, la pluviosité assurée 4 années sur 5 peut ne pas dépasser 20 % de la moyenne en zone désertique mais elle atteint 70 à 80 % de celle-ci en zone semi-aride et subhumide. Il y a naturellement des exceptions à cette règle, comme dans le Nordeste brésilien où on peut rencontrer des taux de fiabilité de 0,20 sous des pluviosités moyennes annuelles de 400 à 500 mm (LE HOUÉROU, 1986).

La variabilité spatiale est très mal connue (SLATYER et MABUTT, 1964 ; SHARON, 1972). Il est seulement admis que la proportion des pluies de convection, donc l'importance de la variabilité spatiale, dans le total annuel croît avec l'aridité ; elle est donc inversement proportionnelle à la pluviosité moyenne annuelle. Il existe cependant des cas particuliers, à vrai dire très mal connus, représentés par les «lignes de grains» préférentielles dans les tropiques arides et les «trajectoires d'orages» privilégiées en zone aride méditerranéenne. Tout comme les «couloirs de grêle», ces chemins semblent fortement influencés par le relief.

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET DISTRIBUTION CLIMATIQUE DE LA VARIABILITÉ PLUVIALE

Les tableaux I et II et les figures 1, 2 et 3 montrent les coefficients de variation de la pluviosité annuelle dans quelques zones géographiques, pour des tranches qui varient de 50 à 2 000 mm, sur un total de 1 100 stations d'Afrique, d'Amérique et d'Asie. À la lecture de ces tableaux on voit, de façon générale, que :

- la variabilité de la pluviosité est inversement liée à la moyenne annuelle quel que soit le type de climat. Cette règle souffre néanmoins une exception : le Nordeste brésilien où la variabilité paraît indépendante de la moyenne, avec des taux d'asymétrie énormes ; la médiane peut être inférieure à 30 % de la moyenne et les pluies assurées 4 années sur 5 inférieures à 20 % de cette moyenne dans certaines stations ; pour l'ensemble des stations de 400 à 800 mm, les pluies assurées 4 années sur 5 ne représentent que 60 à 65 % de la moyenne, alors que, en région méditerranéenne et au Sahel, elles correspondent à 70-75 %, sous les mêmes tranches (LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988 ; LE HOUÉROU, 1986) ;
- la variabilité en Afrique du Nord est systématiquement et significativement supérieure à celle du Proche-Orient, avec quelques exceptions telles que les montagnes du Zagros, au sud de l'Iran (WALLÈN et BRICHAMBAUT, 1962) ;
- contrairement à une croyance répandue, la variabilité en zone sahélienne et soudanienne est inférieure à celle de la plupart des zones arides mondiales, notamment de l'Afrique du Nord et de l'Afrique orientale, mais elle est légèrement supérieure à celle du Proche-Orient (fig. 1) ;
- la variabilité en zone aride d'Israël est inférieure à celle de Tunisie, tandis que l'inverse se produit en zone semi-aride et subhumide (LE HOUÉROU, 1988) ;
- la variabilité est plus élevée sous le climat équatorial (régime pluviométrique bimodal) de l'Afrique de l'Est que sous le climat tropical des zones sahélienne et soudanienne (régime pluviométrique monomodal). On retrouve d'ailleurs un phénomène

Tableau I - Variabilité de la pluviosité annuelle en Afrique du Nord et au Proche-Orient

Tranches Pluviométriques mm	Algérie		Tunisie		Libye		Maroc		Afr. du Nord		Pr.-Or.		Afr. du N. et Pr.-Or.	
	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV
0- 50	13	0,90	1	0,73	12	1,30	3	0,85	26	1,08	2	1,10	28	1,08
50- 100	9	0,60	5	0,55	9	0,68	4	0,60	27	0,62	4	0,60	31	0,62
100- 200	15	0,49	11	0,50	30	0,56	6	0,51	62	0,53	16	0,44	78	0,51
200- 300	8	0,30	8	0,51	56	0,40	4	0,40	72	0,40	4	0,38	76	0,40
300- 400	18	0,29	10	0,40	26	0,37	6	0,30	54	0,29	10	0,30	64	0,29
400- 500	23	0,28	10	0,31	3	0,28	6	0,25	36	0,30	7	0,24	43	0,28
500- 600	15	0,25	5	0,27	2	0,28	5	0,22	22	0,26	3	0,26	25	0,26
600- 700	11	0,25	3	0,22	1	0,22	2	0,20	15	0,22	6	0,23	21	0,22
700- 800	9	0,22	3	0,22					12	0,22	3	0,23	15	0,22
800-1000	10	0,21	1	0,19			2	0,18	11	0,20			11	0,20
1000-2000	12	0,20	1	0,19					13	0,20	2	0,23	15	0,21
Total stations	143		58		139		38		378		57		435	

Tableau II - Variabilité des précipitations annuelles dans quelques zones écologiques du monde

Tranches Pluviométriques mm Types de climats	Afr. du Nord et Proche-Orient (1) Méditerr. CV	Z. Sahél. et Soudan. (2) Tropical. CV	Afrique orientale (3) Équator. CV	Basse Calif. N. (4) Méditerr. CV	Sud Texas (5) Subtrop. CV	Arizona (6) Subtrop. CV	Nordeste Brésil (7) Équator. CV	
0- 050	1,08	0,96						
50- 100	0,62	0,57	0,95	0,82		0,60		
100- 200	0,51	0,43	0,50	0,68		0,45		
200- 300	0,40	0,37	0,40	0,52		0,35		
300- 400	0,29	0,32	0,35	0,52				
400- 500	0,28	0,30	0,30	0,50	0,38		0,39	
500- 600	0,26	0,27	0,29		0,35		0,34	
600- 700	0,22	0,27	0,28		0,33		0,34	
700- 800	0,22	0,21	0,26		0,30		0,30	
800- 900	0,20	0,19	0,24		0,28		0,37	
900-1000	0,20	0,18	0,22					
1000-2000	0,18	0,17	0,16					
2000-2500		0,16	0,15					
Total stations	407	228	300	51	30	17	67	1 100

(1) Le Houérou, 1986, p. p. ; Katsnelson, 1964, p. p. ; Naami, 1987, p. p, ; Popov, 1987, p. p.
(2) Le Houérou, 1986, p. p. ; Nicholson, 1979, p. p. ; Sneyers, 1981, p. p. ; Virmani *et al.*, 1980, p. p.
(3) Griffiths, 1958, p. p. ; Griffiths et Hemming, 1963, p. p. ; Brown et Cochemé, 1969, p. p.
(4) Le Houérou, 1988 a
(5) Le Houérou et Norwine, 1985-1988
(6) Mc Mahon et Wagner, 1985
(7) Le Houérou, 1986, p. p. ; Hargreaves, 1973, 1974, p. p. ; De Miranda et Oliveira, 1981, p. p.

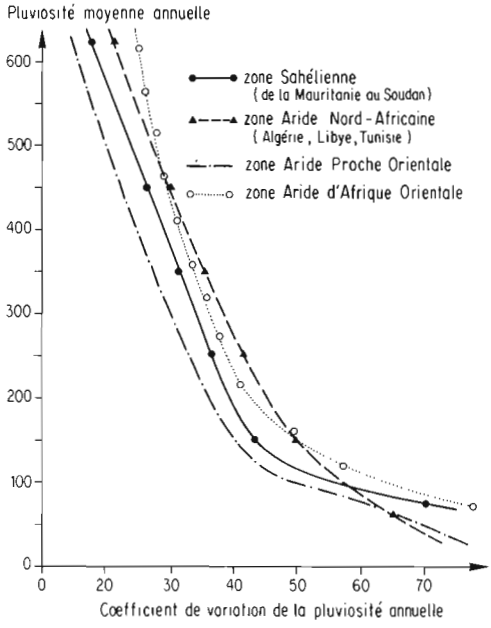


FIGURE 1 - *Comparaison de la variabilité de la pluviosité annuelle en régions méditerranéenne et intertropicale.*

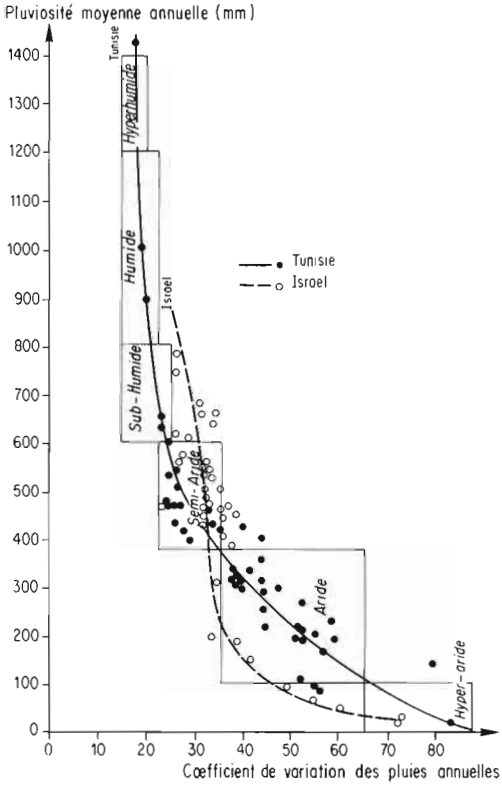


FIGURE 2 - *Variations de la pluviosité moyenne annuelle et de son coefficient de variation en Tunisie (Afrique du Nord) et en Israël (Proche-Orient).*

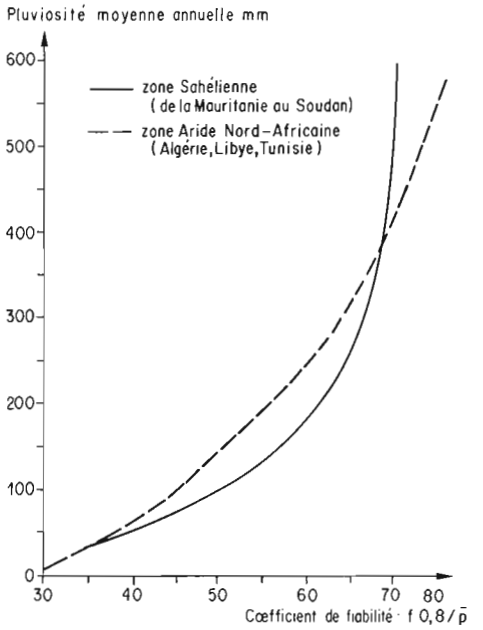


FIGURE 3 - *Fiabilité des pluies en fonction des moyennes annuelles en zone sahélienne et en zone aride nord-africaine.*

similaire en zone méditerranéenne, le régime bimodal de l'Afrique du Nord est plus variable que le régime monomodal du Proche-Orient ;

- corrélativement à ce qui a été dit plus haut, le taux de fiabilité est plus élevé en zone aride sahélienne qu'en Afrique du Nord, mais il est plus faible en zone semi-aride ;
- les différents pays d'Afrique du Nord présentent des variabilités à peu près identiques à l'intérieur de chaque tranche pluviométrique ;
- le tableau I montre que, dans les différentes zones géographiques et climatiques considérées, la variabilité décroît de la manière suivante :
  - Basse-Californie du Nord,
  - Nordeste du Brésil, Australie centrale orientale (subtropicale),
  - Sud du Texas, Australie occidentale septentrionale (tropicale),
  - Afrique du Nord, Australie méridionale méditerranéenne,
  - Afrique orientale, Australie occidentale méridionale (méditerranéenne),
  - Zones sahélienne et soudanienne,
  - Arizona,
  - Proche-Orient.

Il convient de noter que sous le climat méditerranéen de Basse-Californie du Nord, la variabilité, bien que légèrement plus élevée que dans le Nordeste brésilien, n'en présente pas le caractère aléatoire ; elle reste liée à la moyenne. La zone aride australienne présente des variabilités très différentes selon les régions : faible et comparable à celle du Proche-Orient en zone méditerranéenne de l'Australie de l'Ouest, elle est plus élevée et comparable à celle de l'Afrique du Nord en zone méditerranéenne de l'Australie du Sud. Il en résulte que la culture du blé peut se pratiquer jusque sous 280 à 300 mm en Australie de l'Ouest, comme au Proche-Orient ; mais il faut une moyenne de près de 400 mm en Australie du Sud, comme en Afrique du Nord. En revanche, la variabilité est très élevée en zone aride subtropicale à régime pluviométrique bimodal,

à la frontière des Nouvelles-Galles du Sud, de l'Australie du Sud et du Territoire du Nord, avec des coefficients de variation de 80 à 120 % sous 120 à 150 mm de moyenne (Oodnatta, Lac Eyre, Birdsville, Boulia). Elle est également très élevée en zone tropicale sèche de l'Australie de l'Ouest (Carnavon, Port Hedland) (Wadham *et al.*, 1964).

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA VÉGÉTATION NATURELLE

Des zones soumises à des moyennes pluviométriques identiques sont d'autant plus arides que la variabilité est élevée et la fiabilité plus faible, toutes choses étant égales par ailleurs. Une variabilité élevée est donc un facteur supplémentaire et aggravant de l'aridité induite par de faibles moyennes et par une répartition saisonnière défavorable. Il en résulte que, sous des moyennes et des régimes saisonniers identiques, une forte variabilité induit une adaptation plus spécialisée de la végétation à la xéricité en termes de xéromorphie, de phénologie, d'écophysiologie des espèces, en termes de structure et de composition floristique des groupements, ainsi qu'en termes de biomasse et de productivité primaire.

Les faits ne sont toutefois pas aisés à mettre en évidence car d'autres paramètres plus ou moins liés à la variabilité des précipitations interfèrent et peuvent masquer son effet. Ces faits ont été bien étudiés, particulièrement en agroclimatologie (Hargreaves, 1974 ; Dancette, 1977 ; Mattei, 1979 ; Floret et Pontanier, 1982). Les paramètres d'interférence les plus usuels sont liés au substrat : topographie, géomorphologie, exposition, sol, ainsi qu'à tous les facteurs qui influent sur l'équilibre et le bilan hydrique plante/sol/atmosphère, ainsi que l'impact des actions humaines, dont, bien entendu, les méthodes d'exploitation et de gestion. 3 études de cas peuvent illustrer ce propos :

- la limite entre végétations forestières et matorrals/chaparrals qui en dérivent d'une part, et végétation steppique d'autre part, correspond sensiblement à l'isohyète annuelle de 400 mm, tant en Afrique du Nord qu'au Proche-Orient (Le Houérou, 1969 ; Danin et Plitmann, 1987). En Afrique du Nord, cette limite correspond sensiblement à un accident tectonique majeur : la limite sud des chaînes atlasiques (Haut et Moyen Atlas du Maroc, Atlas tellien d'Algérie, Dorsale tunisienne). Le long de cet interface, le coefficient de variation de la pluviosité annuelle saute brusquement de 30-35 %, sous 400-450 mm, à 40-45 %, sous 350-400 mm, sans changement du régime saisonnier ni variation systématique du substrat. La discontinuité majeure et quasi linéaire observée dans la végétation peut seulement être attribuée à un accroissement brutal de la variabilité des précipitations. Cette solution de continuité dans la variabilité correspond ainsi à une limite contrastée des étages de végétation et au passage presque sans transition de l'étage semi-aride forestier à l'étage aride steppique. La diminution de 50 mm de la pluviosité moyenne annuelle ne saurait expliquer à elle seule cette discontinuité, non plus que d'éventuelles modifications mineures du régime saisonnier.

De fait, cette brusque élévation de la variabilité constitue également une limite agrométéorologique majeure (CAEES, 1961 ; Le Houérou, 1969 ; Le Houérou *et al.*, 1977 ; Le Houerou, 1982, 1982-1984, 1986). L'isohyète de 400 mm constitue en effet la limite bioclimatique supérieure des steppes, la limite inférieure des chênes verts et des chênes kermès ; mais c'est aussi la limite inférieure de la culture commerciale des céréales, avec une récolte assurée 4 années sur 5, ainsi que des cultures fourragères et des pâturages semés. Les agriculteurs européens qui, en Afrique du Nord, ont tenté la culture céréalière au-dessous de l'isohyète de 400 mm ont tous dû rapidement renoncer pour se consacrer à l'élevage ou à l'arboriculture fruitière là où le sol était suffisamment sableux ;

- on retrouve des faits analogues dans d'autres régions à climat méditerranéen. En Australie du Sud, par exemple, la *Goyder's line*, ou limite sèche de la céréaliculture, correspond à l'isohyète annuelle de 375 mm, ce qui coïncide, ici aussi, à un accident du relief : la partie méridionale des *Flinders Range*, et à une variabilité des précipitations annuelles voisine de celle de l'Afrique du Nord.

En Australie de l'Ouest, lorsque le coefficient de variation de la pluviosité annuelle est de l'ordre de 25 %, la culture des céréales est pratiquée jusque sous 280 à 300 mm de moyenne (médiane = 240 à 270 mm) (Mereddin, *Southern Cross*), mais là où la variabilité est plus élevée (CV de 30 à 35 %), la céréaliculture ne descend pas au-dessous de 400 à 450 mm.

Au Proche-Orient, où la variabilité est inférieure à celle de l'Afrique du Nord (fig. 2) , la culture régulière des céréales se pratique jusque sous 275 à 300 mm, sauf dans les zones à variabilité plus élevée où il faut environ 400 mm (Wallèn et Brichambaut, 1962). Il semble donc qu'un accroissement de 10 points de pourcentage dans le coefficient de variation de la pluviosité annuelle (25 à 35 %) corresponde à une demande supplémentaire de pluviométrie moyenne annuelle d'environ 100 mm pour la culture assurée des céréales en climat méditerranéen.

Mais la variabilité de la pluviosité n'est pas seule en cause ; au Proche-Orient, le régime saisonnier est différent de celui de l'Afrique du Nord (monomodal centré sur l'hiver au lieu de bimodal étendu sur cinq à sept mois).

Des faits comparables se manifestent lorsque l'on compare les cultures céréalières (mil et sorgho) en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est. En Afrique occidentale, sous régime pluviométrique monomodal, la variabilité est plus faible qu'en Afrique orientale soumise à un régime bimodal (fig. 1). Corrélativement, les cultures de mil et de sorgho nécessitent une pluviosité moyenne de 650 à 700 mm en Afrique de l'Est (Brown et Cochemé, 1969), tandis que 400 à 500 mm suffisent pour obtenir des résultats comparables en Afrique de l'Ouest (Dancette, 1977 ; Le Houérou et Popov, 1981) ;

- la variabilité élevée de la pluviosité dans les zones arides chaudes tend à favoriser les végétaux crassulescents ou succulents à voie de carboxylation CAM, particulièrement lorsque l'humidité atmosphérique est relativement élevée. Des exemples de ce fait sont la végétation des déserts littoraux de Basse-Californie, de Namibie, de Mauritanie et du Sud marocain, la brousse à didiéracées du Sud-Ouest de Madagascar, la caatinga du Nordeste brésilien et la végétation macaronésienne des archipels insulo-atlantiques (Canaries, Cap-Vert).

Le climat méditerranéen de la Basse-Californie du Nord contraste ainsi avec celui de l'Afrique du Nord et du Proche-Orient par la variabilité beaucoup plus élevée de sa pluviosité (tabl. II) (Le Houérou, 1988), partiellement corrigée, il est vrai, par de fréquents brouillards côtiers ; corrélativement, les végétaux pachycaules, pachyphylles et à ligno-tubers y abondent et sont même dominants dans les zones où la pluviosité est la plus variable, comme dans le désert de Vizcaïno (cactacées, agaves, yuccas, crassulacées, asclepiadacées, etc.). La caatinga, dont la végétation présente un caractère de xéromorphie très accentué, avec de nombreuses espèces pachycaules et caducifoliées, contraste en cela avec des régions tropicales comparables mais à faible variabilité pluviométrique telles que les zones sud-sahélienne, soudanienne et le Miombo, où dominent des espèces mésophylles plus ou moins malacophylles, comme les légumineuses et les combrétacées. Ainsi que nous l'avons évoqué (*cf. supra*), ce caractère extrêmement xéromorphe de la végétation de la caatinga correspond à une variabilité très élevée des précipitations puisque des périodes sans pluies de dix-huit à vingt mois peuvent survenir sous des isohyètes annuelles de 300 à 600 mm. Tandis que sous les climats arides de l'Ancien Monde des périodes de douze mois ou plus sans précipitations ne se rencontrent qu'au-dessous de l'isohyète de 100 mm ou légèrement plus dans les archipels insulo-atlantiques (Le Houérou, 1969, 1980).

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA PRODUCTION PRIMAIRE

Les figures 4, 5 et 6 et les tableaux III et IV montrent quelques exemples des relations générales qui régissent les rapports - de variabilité de la production à celle de la pluie (RVPP) dans la végétation naturelle des terres de parcours, ainsi que le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) - entre la production primaire et la variabilité pluviométrique :

- le CEP (quotient de la production primaire, kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}$, en kilogrammes, par la pluviosité annuelle, en millimètres) tend à être inversement lié à la pluviosité moyenne, toutes choses étant égales par ailleurs (LE HOUÉROU, 1984 ; FLORET *et al.*, 1987). Mais cette liaison peut être masquée par l'impact anthropozoïque ou l'édaphisme (topographie, ruissellement, sols). A l'échelle mondiale, le CEP est en moyenne de 4,0 ± 0,3 kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$ (fig. 4, 5 et 6, tableaux III, IV et V) (LE HOUÉROU, 1984 ; LE HOUÉROU *et al.*, 1988) ;
- le RVPP est en moyenne de 1,5 ± 0,07 pour l'ensemble des zones arides et semi-arides du monde ; en d'autres termes, la variabilité de la production primaire est supérieure de 50 % en moyenne à celle des précipitations (LE HOUÉROU *et al.*, 1988) ;
- CEP et RVPP dépendent aussi, dans une large mesure, de la dynamique des écosystèmes considérés et des conditions de la surface du sol, en particulier de la texture, de la structure, de la teneur en matière organique, de la perméabilité, de la présence ou non de litière organique, etc., ainsi qu'au degré de recouvrement du sol par la végétation. Une savane soudanienne peu exploitée pendant quelques années présente des CEP de l'ordre de 5 à 8 kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$, alors que ces savanes présentent un CEP de l'ordre de 3 dans les conditions habituelles d'exploitation (ACHARD, 1988 ; LE HOUÉROU, 1989 ; ACHARD, cet ouvrage : 297-310) (tabl. VI). Toutes choses étant égales par ailleurs, des végétations dégradées avec un faible recouvrement tendent à réduire le CEP et à accroître le RVPP ;
- les relations entre le CEP et la pluviosité ne sont pas linéaires (LE HOUÉROU, 1986-1989) ; nous avons donc développé une formule mathématique empirique qui combine CEP, RVPP et les fréquences pluviométriques. Cette formule permet de prévoir la production primaire pour diverses probabilités (ou fréquences) d'occurrence annuelle, en connaissant la fréquence ou les paramètres statistiques de distribution des pluies annuelles, le CEP et le RVPP (tabl. V et fig. 5) (LE HOUÉROU *et al.*, 1984). Cette formule, qui permet de prévoir la production annuelle avec une bonne approximation, rend ainsi possible la planification de l'utilisation des ressources pastorales de façon rationnelle et la prise de décisions de gestion basées sur une approche probabiliste. Cette approche constitue une amélioration par rapport à la méthode habituelle basée sur l'intuition et l'expérience qui résultent d'approximations successives elles-mêmes fondées sur des séries de succès et d'échecs. Cette équation prédictive s'écrit :

$$P = \left[\frac{(b\ r)}{R} + (1 - b) \right]$$

où :

P = production annuelle sous la probabilité

r = pluviosité annuelle sous la probabilité

R = pluviosité moyenne annuelle

b = RVPP (CVPr/CVPl) = quotient des coefficients de variation de la production et de la pluie

CEP = coefficient d'efficacité pluviale (quotient de la production en $kg.ha^{-1}.an^{-1}$ par la pluviométrie en $mm.an^{-1}$).

Tableau III - Calcul de la production primaire théorique et de la capacité de charge, basé sur les probabilités pluviométriques annuelles, utilisant la moyenne (223 mm) et l'écart-type (80 mm), dans l'hypothèse d'une distribution normale, sur 60 ans. Azizia, Libye

Probabilités	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	a
pluviométriques	121	156	181	203	223	243	265	290	325	ra
Quotient prob. pluviom. à la moyenne	0,54	0,70	0,81	0,91	1,0	1,09	1,19	1,30	1,46	ra/$\bar{r}$
Parcours type 1	0,4710	0,6550	0,7815	0,9865	1,0	1,1035	1,2185	1,3450	1,5290	Paramètre 1 (1)
(CEP_1 = 4,0	228	409	566	728	892	1 073	1 292	1 560	1 988	Production 1 (2)
b_1 = 1,15)	7,5	4,9	3,5	2,7	2,2	1,9	1,6	1,3	1,0	Cap. charge 1 (3)
Parcours type 2	0,2870	0,5350	0,7055	0,8605	1,0	1,1395	1,2945	1,4650	1,7130	Paramètre 2
(CEP_2 =3,0	104	250	383	524	669	830	1 029	1 254	1 670	Production 2
b_2 = 1,55)	19,2	8,0	5,2	3,8	3,0	2,4	1,9	1,6	1,2	Cap. charge
Parcours type 3	0,38882	0,6010	0,7473	0,8803	1,0	1,1197	1,2527	1,3990	1,6118	Paramètre 3
(CEP_3 = 2,0	94	188	271	357	446	544	664	811	1 048	Production 3
b_3 = 1,33)	21,3	10,6	7,4	5,6	4,5	3,7	3,0	2,5	1,9	Cap. charge 3
Parcours type 4	0,5860	0,7300	0,8290	0,919	1,0	1,0810	1,1710	1,2700	1,4140	Paramètre 4
(CEP_4 = 5	355	569	777	933	1 115	1 313	1 552	1 842	2 298	Production 4
b_4 = 0,90)	5,6	3,5	2,6	2,1	1,8	1,5	1,3	1,1	0,9	Cap. charge 4
Prod. moyenne	195	354	497	636	780	940	1134	1372	1751	Kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}$
CEP moyen	1,61	2,27	2,75	3,13	3,34	3,87	4,28	4,73	5,39	Kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$
Prod. % moy.	25	45	64	82	100	121	145	176	224	
Pluviom. % moy.	54	70	81	91	100	109	119	130	146	

(1) Paramètre 1 = (b1 ra/r) + 1- b1) ; Paramètre 2 = (b2 ra/r) + (1- b2) ; etc. ; $\bar{r}$ = Pluv. moy. ann.
(2) Production 1 = (Param.1)$ra_1.CEP_1$; Production 2 = (Param.2) $ra_1 . CEP_2$; etc.
(3) Capacité de charge en hectares par unité ovine (1,5 tête) par an, supposant un taux d'utilisation de 50 % et une ingestion jounalière de 2,.75 kg MS/UO

Tableau IV - Calcul de la production primaire théorique et de la capacité de charge, basé sur les fréquences déciles et la médiane pluviométrique, sur 60 ans. Azizia, Libye

Déciles pluviom.	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1-a
pluviométrie obs.	129	150	170	196	210	236	264	288	323	ra
Quotient déciles à la médiane	0,61	0,71	0,81	0,93	1,0	1,12	1,26	1,37	1,54	ra/rmd
Parcours type 1	0,5515	0,6550	0,7815	0,9195	1,0	1,1380	1,2990	1,4255	1,6210	Paramètre 1 (1)
(CEP_1 = 4,0	285	393	531	721	840	1 074	1 372	1 642	2 094	Production 1 (2)
b_1 = 1,15)	13,0	5,1	3,8	2,8	2,4	1,9	1,5	1,2	1,0	Cap. charge 1 (3)
Parcours type 2	0,3955	0,5505	0,7055	0,8915	1,0	1,1860	1,4030	1,5730	1,8370	Paramètre 2
(CEP_2 = 3,0	153	248	360	524	630	840	1 111	1 359	1 780	Production 2
b_2 = 1,55)	13,0	8,1	5,6	3,8	3,2	2,4	1,8	1,5	1,1	Cap. charge
Parcours type 3	0,4813	0,6141	0,7473	0,9069	1,0	1,1596	1,3458	1,4921	1,7182	Paramètre 3
(CEP_3 = 2,0	124	184	254	356	420	547	711	859	1 110	Production 3
b_3 = 1,33)	16,0	11,0	7,0	5,6	4,8	3,6	2,8	2,3	1,8	Cap. charge 3
Parcours type 4	0,6490	0,7390	0,8290	0,9390	1,0	1,080	1,2340	1,3330	1,4860	Paramètre 4
(CEP_4 = 5,0	419	554	705	918	1 050	1 307	1 629	1 920	2 400	Production 4
b_4 = 0,90)	4,8	3,6	2,8	2,2	1,9	1,5	1,2	1,0	0,8	Cap. charge 4
Prod. moyenne	245	345	463	630	735	942	1 205	1 445	1 846	Kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}$
CEP moyen	1,90	2,30	2,72	3,21	3,50	3,99	4,57	4,02	5,72	Kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}mm.^{-1}$
Prod. % médiane	33	47	63	86	100	128	164	197	251	
Pluviom. % médiane	61	71	81	93	100	112	126	137	154	

(1) Paramètre 1 = (b1.ra/rmd) + (1-b1) ; Paramètre 2 = (b2.ra/rmd) + (1-b2) ; etc. rmd = Pluv. médiane
(2) Production 1 = (Param.1) ra.CEP2 ; Production 2 = (Param.2) ra.CEP2 ; etc.
(3) Capacité de charge en Hectares par Unité ovine (1,5 tête) par an, supposant un taux d'utilisation de 50 % et une ingestion de 2,75 kg $MS/UO.an^{-1}$.

Tableau V - Relations entre la pluviosité, les conditions de sol et la production de l'olivier en Tunisie centrale. (LE HOUÉROU, 1958,1959)

TYPES DE SOLS		PLUVIOSITÉ MOY. ANN., mm X	ET	CV	PRODUCTION MOYENNE OLIVES, kg / ARBRE X	ET	CV	CEP kg.ha^{-1}.mm^{-1}	RVPP
1 - Sables grossiers profonds ; sites	A	201	79	0,39	46,3	50,3	1,10	4,6	2,80
	B	200	127	0,63	47,0	34,0	0,72	4,7	1,14
	C	200	100	0,50	44,3	32,6	0,74	4,4	1,48
	D	250	125	0,50	61,0	25,0	0,41	4,9	0,82
2 - Sables grossiers moyens à fins ; sites	A	201	79	0,39	32,0	38,0	1,20	3,1	3,3
	B	176	51	0,29	33,4	40,0	1,20	3,8	4,1
	C	256	49	0,19	45,4	49,7	1,10	3,6	5,6
	D	200	100	0,50	25,0	21,0	0,83	2,5	1,7
	E	250	100	0,52	30,0	28,0	0,95	2,4	1,8
3 - Limono-sableux gypseux	A	200	100	0,50	04,0	06,0	1,50	0,4	3,0

N.B. : le nombre de couples «pluie annuelle/rendement annuel» est de 25 à 30 dans chaque série de données. La superficie des champs échantillonnés était de 10 à 20 hectares. La distance entre chaque champ échantillonné et le pluviomètre le plus proche était inférieure à 10 km.
La topographie était plane à faiblement vallonnée et l'altitude comprise entre 50 et 400 m.
X = Moyenne ; ET = Écart-type ; CV = Coefficient de variation ;
CEP = Coefficient d'efficacité pluviale (kg.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}) ;
RVPP = Rapports de variabilité production - pluie (CVPr/CVPl).

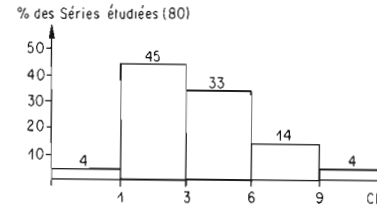


FIGURE 4.1 - *Répartition des coefficients d'efficacité pluviale (CEP) dans 80 séries d'observations de diverses zones arides du globe (LE HOUÉROU, 1984).*

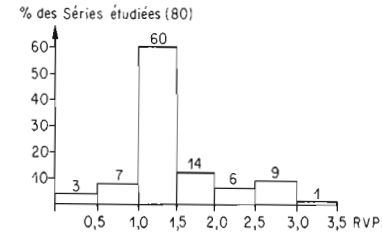


FIGURE 4.2 - *Répartition du rapport de variabilité production/pluie (RVPP) dans 80 séries de données de diverses zones arides mondiales (LE HOUÉROU et al., 1988).*

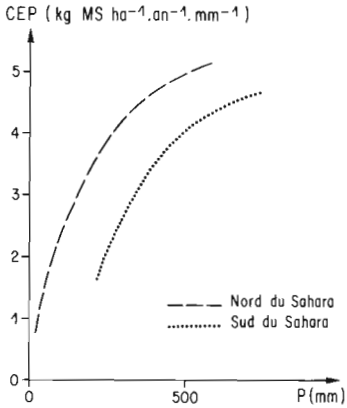


FIGURE 5 - *Comparaison de l'efficacité pluviale pour la production (CEP) entre le Nord et le Sud du Sahara et sa variation en fonction des hauteurs annuelles moyennes (production pastorale) (FLORET* et al., *1987).*

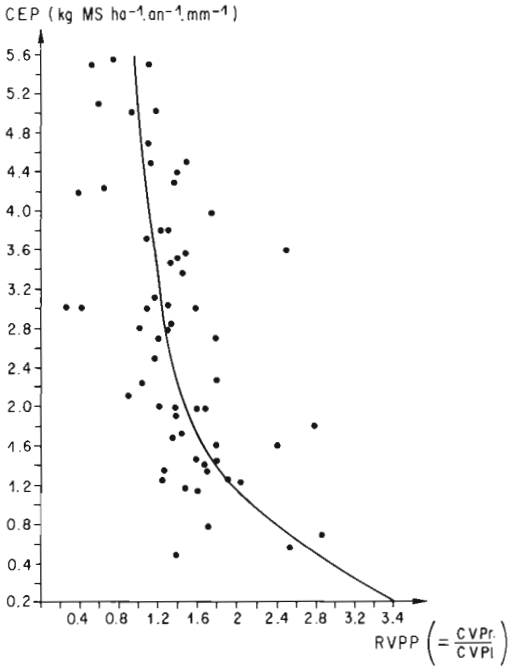


FIGURE 6 - *Relations entre CEP et RVPP dans différentes zones arides mondiales (75 séries, 1 000 paires de données) (LE HOUÉROU, 1987-88).*

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$P = (1 + b \,.\, r\text{-}R / r)\, r \,.\, CEP$$

où :
P = production une année donnée
R = pluviosité moyenne annuelle
r = pluviométrie une année donnée.

Un cas concret d'utilisation de cette formule pour la détermination de la charge de bétail est fourni à titre d'exemple dans les tableaux III et IV. Le tableau III est basé sur

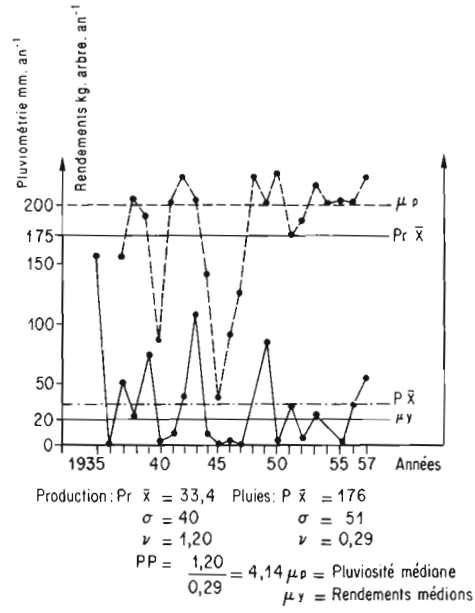


FIGURE 7 - *Relations pluviométrie-rendements de l'olivier en Tunisie centrale, sur sol de sable moyen à fin ; site 2.B (tabl. VI) (LE HOUÉROU, 1958).*

les probabilités gaussiennes, tandis que le tableau IV est construit à partir des fréquences (déciles). On voit que, même si les différences entre probabilités et percentiles pluviométriques sont faibles, les différences en termes de production sont importantes. Les productions apparaissent plus faibles en année déficitaire lorsqu'on utilise les fréquences, et plus fortes en années favorables lorsqu'on utilise les probabilités, en raison de l'asymétrie positive de la courbe de distribution des pluies.

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LES CULTURES

Le tableau V et les figures 8, 9 et 10 montrent quelques relations entre la variabilité de la pluviosité et celle de la production d'olives en culture sèche en Tunisie centrale (LE HOUÉROU, 1958, 1959). Des faits similaires ont été mis en évidence par FLORET et PONTANIER (1982) pour la végétation naturelle et les terres de parcours. Ces données montrent l'extrême importance des conditions de sol, non seulement sur la productivité mais surtout sur la variabilité de la production d'olives. On pourrait fournir des exemples identiques pour la production de céréales. D'une manière générale, on peut dire que la variabilité de la production en zone aride est proportionnelle à la finesse de la texture du sol, en particulier à celle des horizons de surface. Autrement dit, la variabilité de la production est inversement proportionnelle au diamètre des particules élémentaires du sol, toutes choses égales par ailleurs, notamment les paramètres pluviométriques et les techniques de gestion. Cette règle vaut aussi bien pour la végétation naturelle que pour les cultures. Malgré des techniques culturales destinées à réduire l'évaporation du sol, à augmenter son taux d'infiltration, à éliminer la compétition des mauvaises herbes et à réduire la transpiration de l'arbre par des tailles sévères en année sèche (qui sont toutes des techniques utilisées dans le cadre d'une stratégie des-

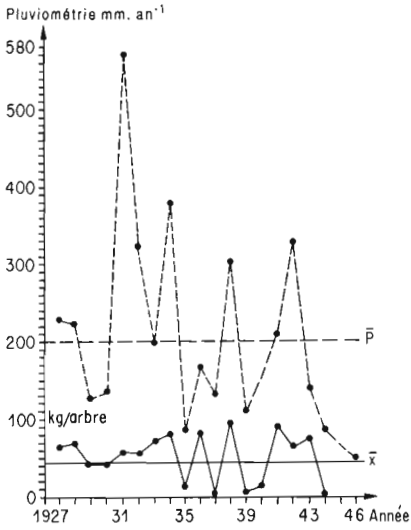


Figure 8 - *Relations pluviosité-rendements de l'olivier en Tunisie centrale sur sol sableux grossier ; site 1.C (tabl. v) (Le Houérou, 1958).*

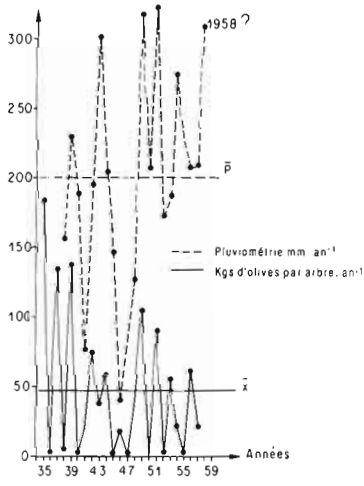


Figure 9 - *Relations pluviométrie-rendements de l'olivier en Tunisie centrale sur sol sableux grossier ; site 1.B (tabl. v) (Le Houérou, 1958).*

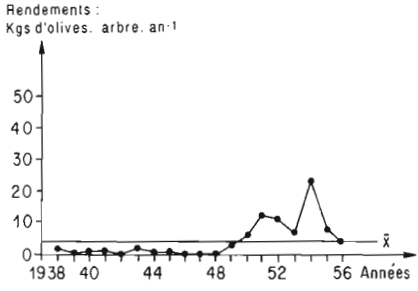


Figure 10 - *Relations pluviométrie-rendements de l'olivier en Tunisie centrale ; sol limoneux à sablo-limoneux ; site 3.A (tabl. v) (Le Houérou, 1958).*

tinée à limiter l'impact de la variabilité pluviométrique, c'est-à-dire de la sécheresse), la variabilité de la production d'olives est beaucoup plus élevée que celle de la pluviométrie, sauf sur les sables grossiers profonds. Sur les sables grossiers profonds, le rapport CVPr/CVPl est de 0,82 à 1,14 (sites 1 D et 1 B, du tableau V), tandis que sur les sables moyens et fins le RVPP est de 1,5 à 3,0 (sites 1 A, 1 C, 2 D, 2 E, tabl. V). Dans les autres cas : sols sablo-limoneux, limono-sableux, limoneux, gypseux, le RVPP varie de 3,0 à 6,0, et beaucoup plus, sur les sols argileux, où la production n'est même pas mesurable sous 200 à 300 mm de pluviosité moyenne annuelle. Les sols argileux et squelettiques sont impropres à la culture. Ces faits résultent de la dynamique pluie-sol-plante :

- les sols sableux ont un taux d'infiltration très élevé, donc pratiquement pas de ruissellement, contrairement aux sols à texture plus fine en surface ; presque toute l'eau de pluie est infiltrée (pluies utiles = pluies infiltrées = ≥ 90 % des chutes) ;
- les sols de sables grossiers évaporent peu d'eau en raison de leur faible pouvoir capillaire, encore réduit par le «mulching» de façons culturales répétées ; en revanche, la remontée capillaire, donc l'évaporation, est beaucoup plus importante sur sols limoneux ou argileux, même soumis aux techniques mentionnés ci-dessus. Ces sols sont, de surcroît, soumis à un processus de «glaçage» de leur surface qui réduit considérablement l'infiltration lorsqu'ils ne sont pas fréquemment labourés ;
- en raison du faible taux d'absorption du sable grossier pour l'eau (4 à 5 % en poids à - 1,5 MPa [= - 15 bars = pF 4,2]), la plus grande partie (95%) des rares pluies qui tombent est disponible pour l'absorption radiculaire. Dans un sol à texture plus fine, un limon par exemple, le taux d'adsorption de l'eau par le sol est plus élevé (A > 20 % en poids à - 1,5 MPa, c'est-à-dire au point de flétrissement) ; il en résulte qu'une grande proportion des pluies infiltrées (> 20 %) reste liée aux particules de sol avec une énergie supérieure à celle de la capacité d'adsorption des racines et n'est donc pas utilisable par les plantes.

Le tableau V montre que la production d'olives est proportionnelle au diamètre des particules du sol, pour la fraction inférieure à 2 mm, mais que la variabilité de cette production est inversement proportionnelle à ce diamètre.

RELATIONS ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LES EFFECTIFS DES TROUPEAUX DANS LE SUD TUNISIEN

Les figures 11 et 12 montrent les variations simultanées des effectifs de petits ruminants et de la pluviométrie dans le Sud tunisien sur une période de vingt-cinq ans. Les données pluviométriques proviennent de 10 stations climatiques synoptiques, fiables, équitablement réparties sur le territoire étudié. Ces effectifs de chèvres et de moutons ont été obtenus à partir des statistiques officielles établies à l'échelon des communes (*cheikats*) sur la même période de vingt-cinq ans. Cette période a vu 2 phases sèches (dont une extrême en 1946, 1947 et 1948) et 2 phases et demie à pluviométrie supérieure à la moyenne. Les conclusions qui émergent de cette étude du point de vue qui nous intéresse ici, peuvent être formulées comme suit :

- la pluviosité annuelle maximale observée pendant la période de référence est égale à 5 fois le minimum, à l'échelle régionale, et à 12 fois, à l'échelle de la station ;
- la population maximale de petits ruminants adultes est égale à 5 fois la population minimale à l'échelle régionale ;
- la population maximale de jeunes (âge inférieur à douze mois) égale 12 fois le minimum à l'échelle régionale. L'impact de la variabilité des précipitations se fait ainsi sentir d'abord sur les effectifs de jeunes. Les paramètres statistiques du tableau VII concernent la distribution des pluies et des petits ruminants adultes et jeunes ;

Tableau VI - Exemples de relations entre la pluviosité annuelle et la production primaire

ZONE ARIDE MÉDITERRANÉENNE (AÏDOUD, 1987)

Steppe à *Artemisia inculta (= A. herba alba)*
Situation : Borj el May, hautes plaines steppiques de l'Algérie occidentale.

Années	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Production Kg MS.ha^{-1}.an^{-1}	512	861	556	276	826	644	374	337	127	254
Pluviométrie mm	204	291	201	175	245	311	191	173	120	147
CEP, Kg MS ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}	2,51	2,96	2,77	1,58	3,37	2,07	1,96	1,95	1,06	1,73

Moyennes : Production : 477 KgMS.ha^{-1}.an^{-1} ; Pluviométrie : 206 mm.an^{-1} ;
CEP : 477/206 = 2,31 Kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}.
CV Production : 0,52 ; CV Pluviométrie : 0,29 ;
RVPP = 0,52/0,29 = 1,79 ;
Corrélation : Production = 0,019 pluie $^{1.886}$;
r^2 = 0,86 ; $p < 0,001$.

La variabilité de la production annuelle égale 1,79 fois celle de la pluviométrie.
Pluviométrie moy. ann. = 206 mm ; ET = 61 ; CV = 0,29 ; ES = 19,3
Production moy. ann. = 447 Kg ; ET = 247 ; CV = 0,52 ; ES = 78,0

ZONE TROPICALE SOUDANIENNE (ACHARD, 1988)

Situation : stat. expérim. de Gampela (Ouagadougou, Burkina Faso)
Savanes herbeuses à : A : *Loudetia togoensis* et *Andropogon pseudapricus (annuelles)*
B : *Andropogon gayanus* et *Cymbopogon shoenanthus (pérennes)*

Années	1984	1985	1986	1987	Moy.	ET	CV	ES
Production Kg MS.ha^{-1}.an^{-1}								
A	2 272	3 522	4 232	2 945	3 242	833	0,26	416
B	3 272	4 818	6 714	6 954	5 214	1 514	0,29	757
Pluviométrie	495	620	709	658	620	91	0,15	46

A - CEP = 5,23 ; RCPP = 1,73 ; $Y = 636,7^{2.58}\,x$; $r^2 = 0,79$
($Y = 7,92\,x - 1672$; $r^2 = 0,75$)
B - CEP = 8,40 ; RVPP = 1,93 ; $Y = 16,33\,x - 420$; $r^2 = 0,97$)

Tableau VII - Variabilité régionale de la pluviosité et des effectifs de petits ruminants en Tunisie méridionale de 1936 à 1960 (LE HOUÉROU, 1962)

PLUIE	MOUTONS		CHÈVRES	
	Adultes	Jeunes	Adultes	Jeunes
X = 163	249	100	266	102
ET = 88	79	46	90	48
CV = 0,54	0,32	0,45	0,34	0,47

NB : X = moyenne
ET = écart type
CV = cœfficient de variation

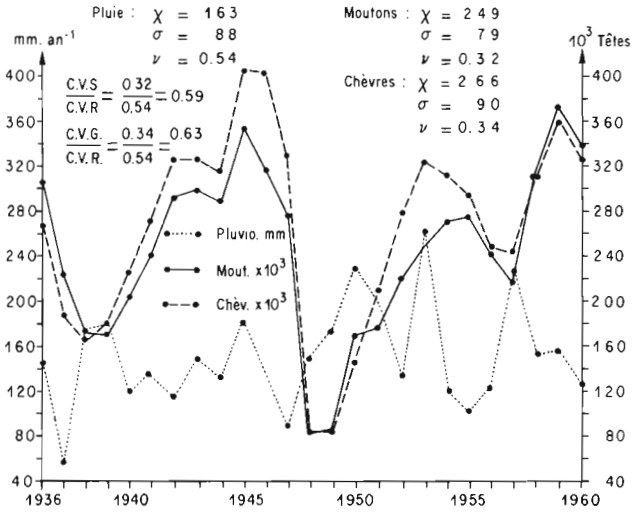


FIGURE 11 - *Relations entre la pluviométrie annuelle et les effectifs des petits ruminants domestiques* adultes *en Tunisie méridionale (LE HOUÉROU, 1962).*

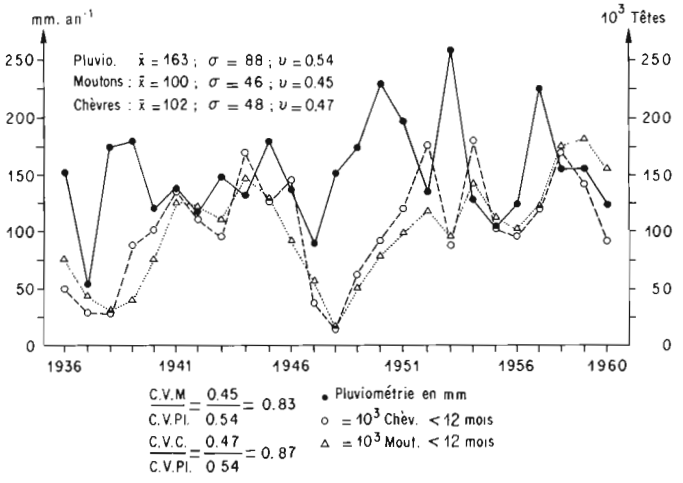


FIGURE 12 - *Relations entre la pluviométrie annuelle et les effectifs des petits ruminants jeunes (âge < 12 mois) en Tunisie méridionale (LE HOUÉROU, 1962).*

- il y a un décalage d'une année entre les variations importantes de la pluviométrie et la réponse des troupeaux. Des faits identiques ont été observés au Sahel (BERNUS, 1981) et en Australie (MAWSON *et al.*, 1974) ; mais, dans ce dernier cas, le temps de latence avant la réponse des troupeaux est de deux à quatre ans en raison de la nature différente des systèmes de production (laine ou bovin à viande sous le système de ranching). Il semble que ce phénomène constitue une règle générale (LE HOUÉROU, 1985). Il en résulte qu'une sécheresse d'une durée de un an ne constitue pas une catastrophe ; elle semble bien absorbée par les systèmes de production (LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988). Mais la situation de l'élevage devient très sérieuse lorsque 2 ou plusieurs années sèches se suivent comme ce fut le cas en Afrique du Nord en 1946-1948, et au Sahel en 1970-1973, puis en 1983-1985 ;

- les coefficients de variation des effectifs régionaux de petits ruminants et de la pluviosité ont été les suivants :
  - adultes :
    - CV moutons/CV pluie = 0,32/0,54 = 0,59,
    - CV chèvres/CV pluie = 0,34 / 0,54 = 0.63,
  - jeunes :
    - CV agneaux/CV pluie = 0,45 / 0,54 = 0,83,
    - CV chevreaux/CV pluie = 0,47 / 0,54 = 0,87 ;

le coefficient de variation des effectifs adultes est ainsi inférieur de 40 % à celui de la pluviométrie sur une base annuelle régionale. Mais le coefficient de variation des effectifs jeunes est seulement inférieur de 15 % à celui des pluies (17 %, pour les agneaux, et 13 %, pour les chevreaux) ;

- il semble assez surprenant de constater que la population caprine est plus sensible aux fluctuations pluviométriques que celle des ovins ; mais la différence de RVPP de 4 points de pourcentage à la fois chez les adultes et chez les jeunes ne représente qu'une tendance de signification marginale ;

- les raisons de la plus faible variabilité des effectifs, donc de la production secondaire, par rapport à la production primaire, tiennent à la stratégie d'adaptation des animaux et à celle de gestion des troupeaux. Dans cette stratégie, on peut individualiser un certain nombre de faits :
  - sélection multiséculaire des races rustiques locales sur le seul critère d'aptitude à la survie, au détriment de la productivité (*cf.* cet ouvrage, Le Houérou : 369-385),
  - accumulation de réserves adipeuses,
  - complémentarité des types de parcours,
  - utilisation optimale de la distribution localisée des précipitations dans l'espace par des migrations saisonnières,
  - alimentation d'appoint.

CONCLUSIONS

La variabilité des pluies est un paramètre bioclimatique très important quoique généralement sous-estimé dans les zones arides. Elle est élevée et inversement reliée aux hauteurs moyennes des précipitations. Il y a cependant de substantielles différences de variabilité d'une zone écologique à une autre parfois même à l'intérieur d'un même type de climat général. De telle sorte qu'une pluviosité donnée ne peut s'interpréter de façon réaliste sans connaître sa variabilité, ou, ce qui revient au même, la proportion de pluies fiables (assurées 4 années sur 5). Il en résulte que les cartes climatiques devraient indiquer les hauteurs annuelles des pluies fiables et la médiane plutôt que la moyenne.

La végétation naturelle est affectée par la variabilité pluviométrique dans sa composition floristique et dans sa structure, dans l'adaptation morphologique et écophysiologique des espèces qui la composent. Il en est évidemment de même des cultures, s'agissant du choix des espèces et des cultivars en fonction de la variabilité probable du régime pluviométrique. Les plantes à cycle court permettent de mieux faire face à cette variabilité. Ainsi, il a été montré que le raccourcissement de quinze jours du cycle de développement du mil permettrait d'augmenter considérablement les superficies soumises de façon fiable à cette culture au Sénégal (Dancette, 1978). S'agissant des cultures, la variabilité peut être atténuée par un choix adéquat des sols et par des techniques culturales appropriées.

On peut également influer sur la variabilité de la production primaire de la végétation naturelle (forêts, parcours) par des techniques de gestion appropriées. Nous avons montré que le RVPP dépendait dans une large mesure de l'état dynamique des écosystèmes. Il est théoriquement facile de modifier cet équilibre par une gestion qui favorise le couvert végétal pérenne, donc l'état de surface du sol, sa structure et sa perméabilité, donc ses réserves hydriques.

La variabilité de la production primaire est en moyenne 50 % plus élevée que celle des précipitations ; toutefois, dans environ 10 % des cas étudiés, elle est inférieure. Ces cas correspondent à des situations où la production ne dépend pas directement de la pluviosité de l'année (dépressions inondables, lignes de drainage, zones à nappe phréatique à la portée des racines, etc.).

Le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) et le rapport de variabilité entre la production et la pluie (RVPP) dépendent également de la pluviosité moyenne ainsi que de l'état de l'écosystème.

La production secondaire du bétail est moins variable que la pluviométrie en raison de diverses stratégies d'adaptation des animaux, des troupeaux et de leur gestion par les éleveurs (réserves alimentaires, rotation des parcours, alimentation de complément, transhumance, nomadisme et toutes les techniques de gestion des troupeaux et des parcours).

Les petits ruminants sont moins sensibles que les bovins aux fluctuations pluviométriques mais plus que les dromadaires et les ânes.

H.-N. Le Houérou : *écologue*,
Cefe/CNRS, BP 5051, 34033 Montpellier cedex 01

Bibliographie

ACHARD (F.), 1988. - Contribution à l'étude des pâturages des savanes Nord-Soudaniennes de la région de Ougadougou. 65 p. *multigr.*, stat. expérim. de Gampéla, Instit. de dével. rural, univ. de Ouagadougou, Burkina Faso.

AÏDOUD, (A.), 1987. - Les écosystèmes à Armoise Blanche (*Artemisia herba alba* Asso). II : Phytomasse et productivité primaire. *Biocénose*, 4 : 1-2.

AUSTIN (M. P.) et NIX (H. A.), 1978. - Classification of climate and its relation to Australia rangelands. In K.M.W. Howses, edit. : Studies of the australian arid zone, III Water in rangelands : 9-17 Div. of Land Resources, CSIRO, Melbourne.

BERNUS (E.), 1981. - Touaregs nigériens : unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur. 508 p. *Mém. ORSTOM*, n° 94, Paris.

BROWN (L. H.) et COCHEMÉ (J.), 1969. - A study of the agroclimatology of the highlands of East Africa. 330 p. FAO/Unesco/WMO Interagency Agroclimatology Project, Rome, Paris and Geneva.

CAEES (Caisse algérienne d'expansion économique et sociale), 1961. - Perspectives d'amélioration des productions fourragères et animales. vol. 1, 165 p., 4 fig., 4 cartes. Min. de l'Agric. Alger, Algérie.

COCHEMÉ (J.) et FRANQUIN (P.), 1967. - A study of agroclimatology of the semi-arid areas south of the Sahara in West Africa. 325 p., Techn., FAO/Unesco/WMO interagency project on Agroclimatol. Rome, Paris et Geneva.

DANCETTE (C.), 1977. - Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. 41 p. multigr., Inst. sénég. de rech. agron., Bambey, Sénégal. et *L'Agronom. trop.*, XXXIX 4 : 331-335, 1979.

DANCETTE (C.), 1978. - Besoins en eau et adaptation du mil la saison des pluies au Sénégal. 17 p. *multigr.*, Inst. sénég. de rech. agron., Bambey, Sénégal.

DANCETTE (C.) et HALL (A. E. L), 1979. - Agroclimatology applied to water managment in the sudanian and sahelian zones of West Africa. *In* A.E. Hall, G.H. Cannell et H.W. Lawton, edits : Agriculture in semi-arid environments : 98-118, *Ecological Studies*, vol. n° 34, Springer Verlag, Heidelberg, W. Germany.

DANIN (A.) et PLITMANN (U.), 1987. - Revision of the plant geographical, territories of Israel and Sinaï. *Pl. Syst. Evol.*, 156 : 43-53.

DAVY (E. G.), MATTEI (F.) et SOLOMON (S. I.), 1976. - An evaluation of climate and water resources for the development of agriculture in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. 289 p., *Special Report* n° 9, WMO, Geneva.

DE MIRANDA (E. E.) et OLIVEIRA (C. A.), 1981. - Um metodo simples para estimar as precipitaçaoes anuais em calides sem pluviometro no tropico semi- arido do Brasil. 36 p., Doc. n° 9, Centr. de Pesq. Agropec. do tropico semi-arido, Embrapa, Petrolina, Brasil.

DUBIEF (J.), 1968. - Le climat du sahara. vol. II, 275 p., 107 cartes, 234 phot.. Mem. H. S., Inst. météorol. et phys. du Globe, univ. d'Alger, Algérie.

FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. ORSTOM,* n° 150, Paris, 544 p.

FLORET (C.), LE HOUÉROU (H.-N.) et PONTANIER (R.), 1987. - Climatic hazard and management : a comparison of the arid zones north and south of the Sahara. 35 p., Proceed. Internat. Conf. Medecos V, Springer Verlag, *in Press.*

FRÈRE (M.), POPOV (G. F.), CRABBÉ (M.) et GOMMES (R.), 1984. - Agroclimatological data : Africa. 2 vol., *Plant production and protection series,* n° 22, FAO, Rome.

GLOVER (J.) et HENDERSON (J. P.), 1954. - Provisional maps of reliability of rainfall in East Africa. *Oug. J. Met. Soc.*, 80 : 602.

GLOVER (J.) et ROBINSON (P.), 1953. - A simple method of calculating the reliability of rainfall. *East Afr. Agric. J.* : vol. XIX, 1.

GLOVER (J.) et TAYLOR (J.), 1955. - Assessing the reliability of rainfall if monthly falls are not independant. *J. Agric. Sc.*, vol. 46, 4 : 387.

GOLFARI (L.) et CASER (R. L.), 1977. - Zoneamento ecologico da regiao nordeste para eperimentaçao florestal. 116 p., Centr. de Pesq. Florest. da Regiao do Cerrado, Belo Horizonte, Brasil.

GRIFFITHS (J. F.), 1958. - Climatic zones of East Africa. *E. Afr. Agr. J.*, XXIII, 3.

GRIFFITHS (J. F.), 1958. - An initial investigation of the annual rainfall in East Africa. *E. Afr. Met. Dept. Mem*, vol. III : 5.

GRIFFITHS (J. F.), 1961. - Some rainfall relationships in East Africa. Inter-Afric. Conf. on Hydrology, CCTA, Nairobi.

GRIFFITHS (J. F.) et HEMMING (C. F.), 1963. - A rainfall map of eastern Africa and Southern Arabia. 42 p., 9 fig., 1 map. *E. Afr. Met. Dept. Mem.*, vol. II : 10.

HARGREAVES (G. H.), 1973. - Monthly precipitation probabilities for the states of Maranha, Ceara and Piaui in North-East Brazil. 154 p., Dept. of Agric. et Irrigation Engineering, Utah State Univ., Logan, Ut., USA.

HARGREAVES (G. H.), 1974a. - Precipitation dependability and protential production in North-East Brazil. 123 p., Embrapa, Petrolina, Brazil et Utah State Univ. Logan, Ut., USA.

HARGREAVES (G. H.), 1974b. - Climate zoning for agriculturaol production in North-East Brazil. 6 p., 1 map. Utah State Univ. Logan, Ut., USA.

KATSNELSON (J.), 1956. - The variability of rainfall in Palestine and the statistical methods of its measurment. *Met. Dept. Notes, sér. E,* n° 4.

KATSNELSON (J.), 1964. - The variability of annual precipitation in Palestine. *Arch. Meteor. Geoph. Bioklimat.* sér. B, 13,2 : 163-172.

KATSNELSON (J.) et KOTZ (S.), 1957. - On the upper limits of some measures of variability. *Arch. Meteor., Geoph. Bioklimat* B 8, 103.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1958. - Contribution à l'étude écologique de l'olivier en Tunisie. 89 p. *multigr.*, Cartes : 7 feuilles au 1/200 000. Délég. Génér. à la productivité, Paris et Tunis.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1959a. - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. vol I, 281 p., 33 tabl. h.-t., 4 cartes h.-t., Mém. H.S. Inst. rech. sahar. Univ. d'Alger.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1959b. - Écologie, phytosociologie et productivité de l'olivier en Tunisie méridionale. *Bull. Cartes Phytogeogr.*, sér. B, IV : 7-72, CNRS, Paris.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1962. - Les pâturages naturels de la Tunisie aride et désertique. 106 p., XII pl., 4 cartes h.-t., Inst. sces écon. appl., Paris et Tunis.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1969. - La végétation de la Tunisie steppique. *Ann. Inst. nat. rech. agron.*, 42, 5 : 1-624, 40 fig. 40 phot. 1 carte coul. 1/500 000 (128 000 km^2), XXII tabl. h.-t.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1980. - Rapport de mission aux iles du Cap Vert. 25 p., div. des Ress. forest., FAO, Rome.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1982. - The arid bioclimates in the mediterranean isoclimatic zone. *Oecol. Mediterr.*, VIII, 1-2 : 103-114.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1982-1984. - An outline of the bioclimatlogy of Libya. *Act. Bot. Soc. Bot. de Fr.* (2/3/4) : 213-247.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1984. - Rain-Use Efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *J. Ar. Envir.*, 7 : 1-35.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1985. - The impact of climate on pastoralism. *In* R. W. Kates, J. H. Ausubel et M. Berberian, edits : Climate Impact Assessment. CH. 7 : 155-186. Scope Study n° 27, J. Wiley et Sons, N-Y., USA.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1986-1989. - La variabilité de la pluviosité annuelle dans quelques régions arides du monde : ses conséquences écologiques : B. Bret, ed., 1989 : Les hommes face aux sécheresses ; Nordeste brésilien et Sahel africain : 127-137. *Collection Travaux et Mémoires,* n° 42, Inst. htes études de l'Amér. latine, Paris.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1988a. - Recherches bioclimatiques sur la Basse Californie du Nord (Mexique) : rapport préliminaire. 15 p. ; Cepe, CNRS. Montpellier, France.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1988b. - Le climat, la végétation naturelle, les forêts, les pâturages, l'occupation des terres et l'érosion. Conséquences écologiques de la mise en eau du barrage de la kompienga (Burkina Faso). Développement agricole, aménagement et gestion de l'espace rural. 70 p., *In* : Schéma directeur de l'aménagement du bassin versant de la Kompienga (Burkina Faso). Agrotechnik. Frankfürt/Main, Allemagne de l'Ouest et min. de l'Hydraul. Ouagadougou, Burkina Faso.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1988c. - International variability of rainfall and its ecological and managerial consequences on natural vegetation, crops and livestock. *Proc. 5th Int. Conf. on Mediterranean Ecosystems* «Time Scales and Water Stress» (di Castri, Floret, Rambal, Roy eds.) IUBS, 32-346.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1989. - The grazing lands ecosystems of the african Sahel : 282 p., 50 tab., 152 fig., *ecological Studies.* n° 75 Springer Verlag, Heidelberg, West Germany.

LE HOUÉROU (H.-N.), BINGHAM (R. E.) et SKERBEK (W.), 1984.- Towards a probabilistic approach to rangeland development planning. 35 p., 2 nd Intern. Ranglds Congr., Adelaïde, S. Australia.

LE HOUÉROU (H.-N.), BINGHAM (R. E.) et SKERBEK (W), 1988. - Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands. *J. Ar. Envir.*, 15 : 1-18.

LE HOUÉROU (H.-N.), CLAUDIN (J.) et POUGET (M.), 1977. - Étude bioclimatique des steppes algériennes. *Bull. Soc. hist. nat. Afr. du Nord*, 3-4 : 33-74, 3 cartes h.-t. 1/1 000 000.

LE HOUÉROU (H.-N.), DUMANCIC (D.) et ESKILEH (M.), 1983. - Energy intake and liveweight change in dry fat-tail barbary ewes. 72 p. *multrigr.*, 11 fig. Techn. Doc. n° 48, FAO/UTFN Lib 018 et Agric Res. Centre, Tripoli, Libya.

LE HOUÉROU (H.-N.) et NORWINE (J. R.), 1985-1988. - The ecoclimatology of South Texas. In : E. E. Whitehead, C. F. Hutchinson, B. N. Timmermann et R. G. Varady, edits : Arid Lands Today and Tomorrow. *Proceed. Internat. Res. et Developt. Confer.*, Oct. 20-25, 1985, Tucson, Arizona : 417-443, Westview Press Boulder, Col., USA.

LE HOUÉROU (H.-N.) et POPOV (G. F.), 1981. - An ecoclimatic classification of intertropical Africa. 40 p. 3 cartes. *Plant Prod. Paper* n° 31, AGP, FAO, Rome, Italy.

Mc MAHON (J. A.) et WAGNER (F. H), 1985c - The Mojave, Sonoran and Chihuahuan deserts of North America. *In* : M. Evenari, I. Noy-Meir and D. W. Goodall : Hot deserts and arid shrublands, vol. A, ch. 5 : 105-202. Ecosystems of the world, vol. 12A, Elsevier publ., Amsterdam, The Netherlands.

MATTEI (F.), 1979. - Climatic variability in agriculture in the semi-arid tropics. *Proceed. World Climate Conf.* : 475-509, WMO, Geneva.

MAWSON (W. F. Y.), HUNTER (H. C. D.), ROBINSON (I. B.) et DAWSON (N. H.), 1974. - Current land-use in western arid region. Land-use study, part - I. *Techn. Bull.* n°12, Div. of Land Utilization, Queensland Dept of Primary Industries, Brisbanes, Qsld., Australia.

NAAMI (M. S.), 1987. - Statistiques pluviométriques en Tunisie. Doc non publié., Serv. météor. min. Trav. Publ., Tunis, Tunisie.

NEUMAN (J.), 1956. - On the incidence of dry and wet years. *Israel Expl. J.*, 6,1 : 58-63.

NICHOLSON (S. E.), 1979. - The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Month. Weath. Rev.*, 108,4 : 473-487.

NICHOLSON (S. E.), JEEYOUNG (K.) et HOOPINGARNER (J.), 1988. - Atlas of african rainfall and its interannual variability. 237p, Dept of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida.

POPOV (G.-F.), GOMMES (R.) et CRABBÉ (M.), 1987, - Agroclimatological data : Asia., 2 vol. FAO, Rome, *Plant production and protection series*, n° 25.

SELTZER (P.), 1946. - Le climat de l'Algérie. 219 p., *Trav. Inst. Météor. et Phys. du Globe*, univ. Alger, Algérie.

SHARON (D.), 1972. - The spottiness of rainfall in a desert area. *J. of Hydrol.* 17 : 161-175.

SLATYER (R. O.) et MABUTT (J. A.), 1964. - Hydrology of arid and semi-arid regions *in* V.T. Chow, edit. : Handbook of applied hydrology : 24-29.

SNEYERS (R.), 1981. - La pluviométrie des pays du Sahel : Mauritanie, Sénégal, Mali et Haute Volta. La sécheresse des années 1971, 1972 et 1973. 107 p. OMM, Genève et Office royal de météorologie de Belgique, Bruxelles, Belgique.

VARNEY (B. M.), 1925. - Seasonal precipitation in California and its variability. *Month. Weath. Rev.*, 53 : 4-5.

VIRMANI (S. M.), REDDY (S. J.) et BOSE (M. N. S.), 1980. - A handbook on the rainfall and climatology of West Africa : data for selected locations. 54 p., Icrisat, Pantacheru, India.

WADHAM (S. M.), WILSON (R. K.) et WOOD (J.), 1964. - Land Utilization in Australia. 295 p., Melbourne Univ. Press., Melbourne, Vict. Australia.

WALLÈN (C. C.), 1958. - Variability of precipitation in Sweden. *Arch. Met. Geoph. Bioklimat.*, B 9, 113.

WALLÈN (C. C.) et BRICHAMBAUT (G. Perrin De), 1962. - A study of agroclimatology in semi-arid and arid zones of the Near East. 335 p. 6, maps, FAO/Unesco/WMO Interagency Project on Agroclimatology, Rome, Paris et Geneva.

Jean-Claude LEPRUN

Étude de quelques brousses tigrées sahéliennes :

structure, dynamique, écologie

INTRODUCTION

CLOS-ARCEDUC a employé pour la première fois, en 1956, l'expression «brousse tigrée» pour désigner l'aspect singulier, visible sur photographies aériennes, de certaines formations végétales sahéliennes contractées, où l'alternance en parallèle de bandes boisées sombres avec des bandes dénudées claires évoquait le pelage d'un tigre. Ces formations arbustives xérophytes et herbeuses couvrent une grande partie des zones sahélo-saharienne et sahélienne de l'Afrique occidentale et de l'Afrique orientale, mais elles sont également présentes en Australie et en Amérique centrale (*cf.* cet ouvrage, CORNET : 245-265) ; elles ont donné lieu à quelques travaux (CLOS-ARCEDUC, 1956 ; AUDRY et ROSSETI, 1962 ; BOALER et HODGE, 1962 ; BOULET *et al.*, 1964 ; CLOS-ARCEDUC, 1964 ; HEMING, 1965 ; WHITE, 1970 ; WICKENS et COLLIER, 1971 ; GALLAIS, 1975 ; JANKE, 1976 ; LEPRUN, 1978, 1979 ; CORNET *et al.*, 1983 ; LEPRUN, 1983 ; etc.). Parmi les différents facteurs incriminés dans la formation de ces bandes de végétation alternées, il a été évoqué successivement l'action des termites, la péjoration climatique progressive de la zone sahélienne et les années de sécheresse calamiteuse, le surpâturage, le drainage réduit, certaines conditions édaphiques, etc. Les causes et leurs effets ont été souvent confondus. Il apparaît opportun de tenter une synthèse de nos recherches sur ces formations qui constituent des écosystèmes originaux dans lesquels les relations sol-eau-plante ont une importance prépondérante.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données présentées ici proviennent de travaux sur le terrain dans la boucle du fleuve Niger, dans la partie septentrionale du Mali et dans le nord du Burkina Faso, durant cinq années consécutives ; ils s'inscrivaient dans le cadre d'une action complémentaire coordonnée (ACC) de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), intitulée *Lutte contre l'aridité en milieu tropical*. Les données puisent également dans les observations recueillies au cours de nombreuses tournées effectuées dans toute la frange sahélienne, de la Mauritanie jusqu'au Niger, de 1967 à 1979. La méthode d'étude de la toposéquence a été utilisée pour rechercher les relations édaphiques et écologiques des brousses tigrées. Dans le cas présent, la toposéquence est une ligne de fosses pédologiques et de relevés de la végétation, qui, suivant la ligne de plus grande pente, joint le point haut de l'interfluve élémentaire au point le plus bas, en recoupant perpendiculairement une bande nue et une bande boisée.

Les 7 toposéquences étudiées s'échelonnent suivant un gradient latitudinal entre les 16e et 14e degrés de latitude nord. L'étude de chacune de ces toposéquences, sur le terrain et au laboratoire, comprend :

- la description des facteurs du milieu (localisation, orientation, pente, climat et, en particulier, pluviométrie et direction des vents, nature de la roche, activité biologique, etc.) ;
- un relevé, le plus complet possible, des espèces végétales ;
- la description détaillée des profils pédologiques creusés au niveau de chaque faciès de la coupe ;
- le prélèvement et les analyses physique et chimique, qui comptent environ 25 déterminations pour chaque horizon du sol. La fabrication de lames minces et l'examen micromorphologique de certains échantillons sont effectués. Le profil topographique de la toposéquence est levé à l'aide d'un niveau à bulle ; les hauteurs et les distances mesurées ont une précision de l'ordre du millimètre.

Les 7 séquences choisies, parmi la douzaine de celles qui ont été étudiées et rangées dans l'ordre de pluviométrie croissante et de latitude décroissante, sont les suivantes :

- GOS II, située à 17,5 km de Gossi, en direction de Gao, à 15° 49′ de latitude nord et 1° 17′ 10″ de longitude ouest, sur des schistes argileux zonés. Cette station, qui reçoit un peu plus de 200 mm de pluies par an en moyenne, est orientée NE-SO ; étendue sur 82 m avec une dénivellation de 1,3 m entre son point le plus haut et son point le plus bas, elle comporte 16 fosses pédologiques (fig. 1) ;
- GOS III, située à 2,6 km de Gossi, en direction de Hombori, à 15° 16′ 10″ de latitude nord et 1° 10′ 40″ de longitude ouest, sur des schistes gréseux fins ferruginisés (formation Y1b de Reichelt, 1972). La pluviométrie y est la même qu'à GOS I ; cette station, orientée NNE-SSO, d'une longueur totale de 77,4 m avec une dénivellation de 4,05 m, compte 10 fosses pédologiques (fig. 2) ;
- ANS, située à 119 km de Ansongo, en direction de Menaka, à 15° 53′ 30″ de latitude nord et 1° 35′ 15″ de longitude ouest, sur les grès argileux cuirassés continental terminal, est soumise à une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 225 mm (Menaka). Orientée NNO-SSE, d'une longueur de 171,6 m avec une dénivellation de 2,25 m, elle comporte 4 fosses pédologiques ;
- NDA, située à 43 km de Gossi, sur la piste de N'Daki, à 15° 34′ 40″ de latitude nord et 1° 5′ de longitude ouest, sur la formation schisteuse Y1b de Reichelt, reçoit environ 300 mm de pluies par an. Orientée ENE-OSO, elle s'étend sur 165 m, accuse une dénivellation de 1,5 m et comporte 4 fosses pédologiques (fig. 3) ;
- KER, située au sud de la piste Hombori-Douentza, à proximité du village de Kerano, à 14° 58′ 40″ de latitude nord et 2° 39′ 30″ de longitude ouest, sur schistes micassés entièrement cuirassés, reçoit une pluviométrie annuelle de l'ordre de 450 mm. L'orientation de la coupe est NNE-SSO ; d'une longueur de 188 m avec une dénivellation de 1,65 m, la station comporte 4 fosses (fig. 4) ;
- ZAM I et II, situées à 11 km au nord de la mare d'Oursi, à 14° 46′ 20″ de latitude nord et 0° 30′ 10″ de longitude ouest, sur les grès de bordure (Ducelier, 1963), cuirassés, reçoivent une pluviométrie annuelle d'environ 450 mm et sont orientées SE-NO. Respectivement, leurs longueurs sont de 69,5 et de 140 m, et leurs dénivellations de 0,60 et de 0,85 m ; ZAM I comporte 4 fosses et ZAM II, 5 (fig. 5) ;
- TEN est située au sud de Douentza, près du village de Teri, à 96 km de Korro, à 14° 25′ 30″ de latitude nord et 2° 36′ de longitude ouest, sur les grès cuirassés du continental terminal. La coupe est orientée NNO-SSE ; la station a une longueur de 84 m, une dénivellation de 1,35 m, et comporte 4 fosses (fig. 6).

Toutes ces toposéquences sont situées au Mali, à l'exception de ZAM I et II qui se trouvent en territoire burkinabé.

RÉSULTATS

Toposéquence GOS II (fig. 1)

Organisation morphologique

On peut subdiviser cette toposéquence en 3 parties distinctes :

- une microdune sableuse alignée en cordon, qui constitue le point haut, colonisée par un couvert herbacé ;
- un versant ou glacis nu à surface du sol plus limoneuse ou argileuse glacée ;
- une zone basse qui forme collature limoneuse à argilo-sableuse boisée et qui butte sur une termitière.

Pédologie

La microdune est constituée de sols minéraux bruts sableux d'apport sans différenciation en horizons, mais formés de couches lamellaires de sables (profils 20a et b, 20, 21). Le glacis nu se compose de sols bruns subarides tronqués à griffes d'érosion et petits gravillons en surface dont le matériau des horizons profonds est en discontinuité sur les schistes. Ce matériau porte les restes d'une ancienne et intense activité biologique (vieilles racines, nids de termites abandonnés). La collature supporte des sols peu évolués, à faciès hydromorphe, assez bien différenciés et structurés.

Végétation

La microdune est exclusivement colonisée par une végétation de graminées éphémères. Le glacis est totalement dépourvu de végétation vivante, mais il possède quelques chicots d'arbustes morts. La collature est le siège d'une bande boisée de brousse tigrée orientée perpendiculairement à la direction de la toposéquence et composée de graminées vivaces et d'arbustes hauts. La termitière située au niveau des fosses 29b, c, d, est issue de la coalescence d'édifices vivants et morts du genre *Bellicositermes*.

Collature (profils 29 et 29b)		Microdune (profil 20)	
Strate arbustive		Strate herbacée	
(Recouvrement 20 %)		(Recouvrement 50 %)	
Acacia erhenbergiana	3	*Schoenefeldia gracilis*	3
Acacia ataxantha	1	*Aristida mutabilis*	2
Acacia laeta	1	*Dactyloctenium aegyptium*	+
Acacia raddiana	1	*Cenchrus biflorus*	+
Ziziphus mauritiana	+	*Leptadenia pyrotechnica*	+
Balanites aegyptiaca	+	*Tetrapogon cenchriformis*	+
Commiphora africana	+	*Chloris prieuri*	+
Boscia senegalensis	+	*Eragrostis pilosa*	+
Strate herbacée			
(Recouvrement 40 à 50 %)			
Andropogon gayanus	2		
Panicum laetum	2		
Schoenefeldia gracilis	2		
Zornia glochidiata	+		
Eragrostis pilosa	2		

PHOTO 1 - *Toposéquence GOS II. Vue amont. A : microdune sableuse ; C : glacis nu.*

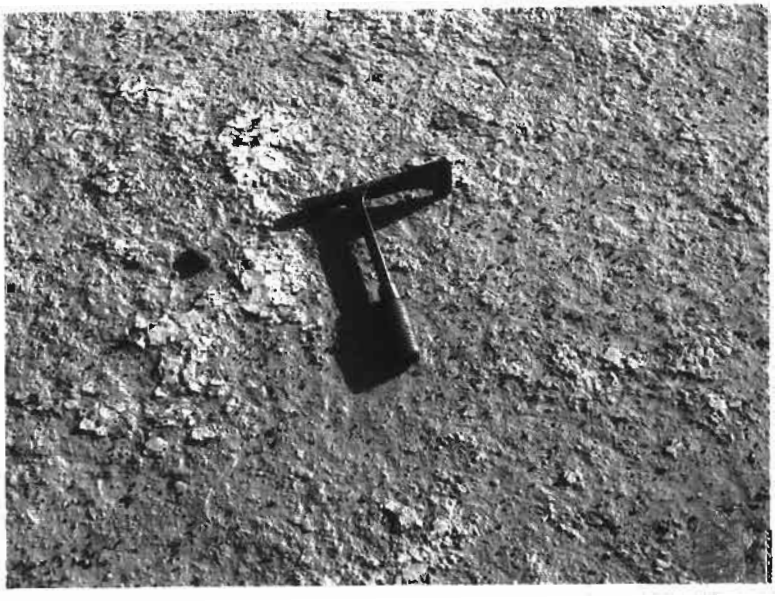


PHOTO 2 - *Toposéquence GOS II. Détail de la surface du glacis nu.*

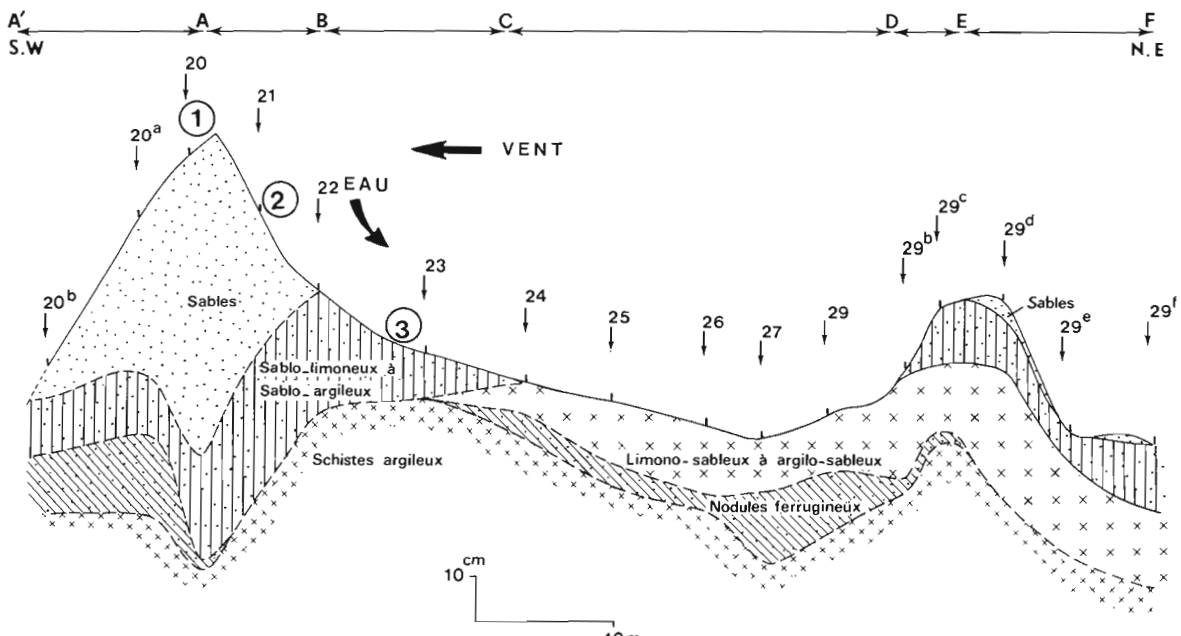


FIGURE 1 - *Chaîne de sols GOS II , brousse tigrée.*

Toposéquence GOS III (fig. 2 et photo 3)

ORGANISATION ET PÉDOLOGIE

Cette toposéquence a été prolongée et elle comprend une microdune centrale, sans différenciation pédologique notable, qui sépare 2 zones dépressives, l'une nue, l'autre boisée, et 2 affleurements rocheux extrêmes. Les 2 zones dépressives sont constituées de sols peu évolués structurés sablo-argileux à argilo-sableux. Le sol du glacis dénudé ne possède pas d'horizon de surface, mais des horizons profonds perturbés par une faune aujourd'hui disparue (galeries, turricules de vers, etc.) et riches en débris racinaires décomposés.

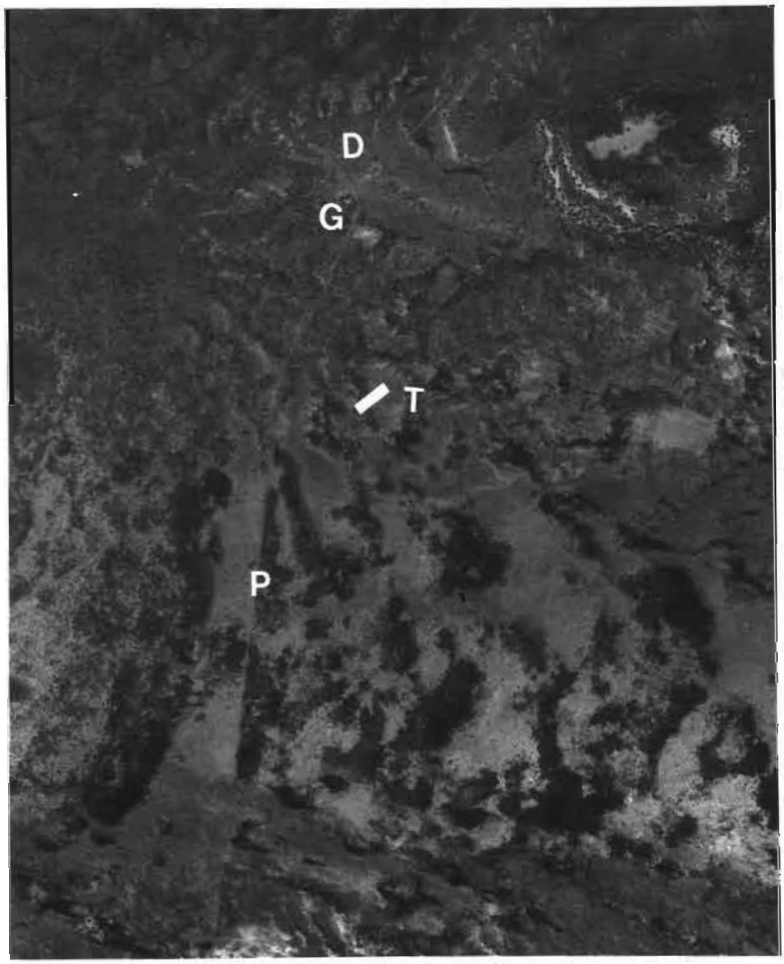


PHOTO 3 - *Photographie aérienne de la toposéquence GOS III. D : dunes sableuses. G : village de Gossi. T : toposéquences ; P : piste Hombori-Gossi.*
Cliché : *IGN, 095 ND 30 XXIII*

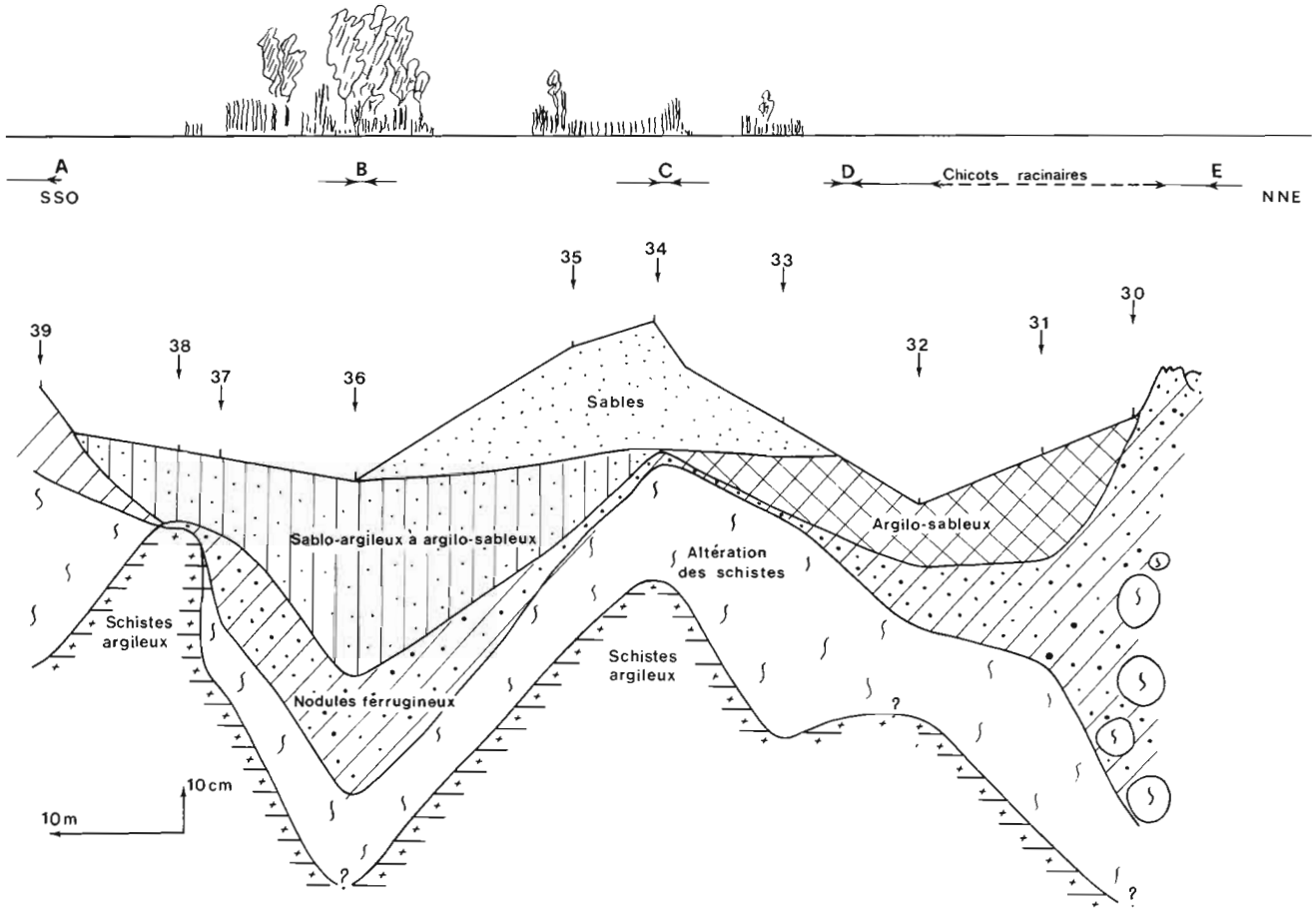


FIGURE 2 - *Chaîne de sols GOS III, brousse tigrée.*

Végétation

La microdune sableuse porte une strate herbacée dense : *Aristida mutabilis, A. funiculata, Schoenefeldia gracilis* et quelques petits *Acacia erhenbergiana* morts. Sur le glacis nu, on ne relève que la présence de rares chicots racinaires et de dômes termitiques abandonnés, en partie érodés et déterrés. Dans la collature, se localise la strate herbacée (*Panicum laetum, Aristida funiculata, Andropogon gayanus*, etc.) et arbustive dense (*Acacia senegal, A. erhenbergiana, Grewia flavescens*, etc.) de la bande boisée dont le recouvrement est supérieur à 100 %.

Toposéquence ANS

Organisation et pédologie

Les bandes boisées sont courtes, contractées du fait des ondulations du modelé des grès cuirassés. Le point haut est représenté par un affleurement de cette cuirasse sur lequel repose un mince placage sableux éolien. La bande nue intermédiaire présente une surface glacée, dure, à petits gravillons épars. Le sol, de 25 cm de profondeur, qui repose en discontinuité sur la cuirasse ferrugineuse, est peu évolué argilo- à limono-sableux. La cuvette boisée est constituée d'un sol profond de 90 cm, très bien structuré, argileux, lourd et humide en profondeur de type peu évolué hydromorphe.

Végétation

Des relevés phytosociologiques complets ont été effectués (Coulibaly, 1979). Nous nous bornerons à citer les principales espèces. Sur le placage sableux, une strate herbacée d'un recouvrement de 80 % comprend :

- *Aristida mutabilis*, 3 ;
- *Schoenefeldia gracilis*, 2 ;
- *Dactyloctenium aegyptium*, + ;
- *Cenchrus biflorus*, + ;
- *Pennisetum violaceum*, + ;
- *Eragrostis ciliaris*, + ;
- *Alysicarpus ovalifolius*, 1 ;
- *Tribulus terrestris*, 1 ;
- *Cassia torra*, + ;
- *Zornia glochidiata*, + ;
- 2 jeunes arbustes de 20 à 30 cm de haut :
    - *Maerua crassifolia*,
    - *Commiphora africana*.

Le centre de la zone boisée comprend une strate herbacée de 60 % de recouvrement :

- *Aristida adscensionis*, + ;
- *Amaranthus* spp., 1 ;
- *Tribulus terrestris*, 1 ;
- *Chloris prieurii*, + ;
- *Cyperus rotundus*, 1 ;
- *Panicum laetum*, 1 ;
- *Achyranthes aspera*, 3 ;
- *Dactyloctenium aegyptium*, + ;
- *Andropogon gayanus*, +.

Une strate arborée et arbustive de 30% de recouvrement constituée de :

- *Acacia senegal*, 1 ;

- *Commiphora africana*, 1 ;
- *Grewia villosa*, 1 ;
- *Boscia senegalensis*, 1 ;
- *Balanites aegyptiaca*, + ;
- etc.

Toposéquence NDA (fig. 3)

Organisation

Elle comprend une zone basse boisée AB argilo-limoneuse, une zone nue BC de même texture, à surface pelliculaire écailleuse blanche qui comporte une troncature érosive en contrebas de la microdune, une microdune sableuse CD de 1 m d'amplitude et une nouvelle zone boisée DE.

Les sols

L'examen de la coupe de la figure 3 indique que toute la séquence est recouverte d'un horizon argilo-sableux nodulaire qui provient en grande partie des schistes cuirassés sous-jacents démantelés. En revanche, seule la partie CE comporte un mince horizon limoneux recouvert par des sables peu cohésifs. Les sols de la zone déprimée sont des sols bruns subarides structurés et solonetziques. Les sols de la zone amont sont des sols bruns subarides tronqués recouverts par des sols peu évolués sur sables éoliens meubles.

La végétation

Les relevés suivants indiquent les compositions floristiques très différentes des 2 zones, argileuse basse et sableuse haute.

Zone basse (profil 1)

Strate arborée et arbustive
(Recouvrement 40 %)

Grewia bicolor	3
Dichrostachys cinerea	1
Commiphora africana	+
Grewia flavescens	1
Acacia laeta	+
Boscia senegalensis	+
Maerua crassifolia	+

Strate herbacée
(Recouvrement 30 %)

Tephrosia purpurea	+
Achyranthes aspera	1
Aristida mutabilis	2
Panicum laetum	3
Pennisetum pedicellatum	+
Eragrostis pilosa	+
Andropogon gayanus	+

Microdune (profil 3)

Strate herbacée
(Recouvrement 80 %)

Aristida mutabilis	3
Schoenefeldia gracilis	2
Chloris prieuri	+
Tragus racemosus	+
Cenchrus biflorus	+
Tetrapogon cenchriformis	+
Blepharis lineariifolia	1
Corchorus tridens	+
Borreria filifolia	+
Zornia glochidiata	+

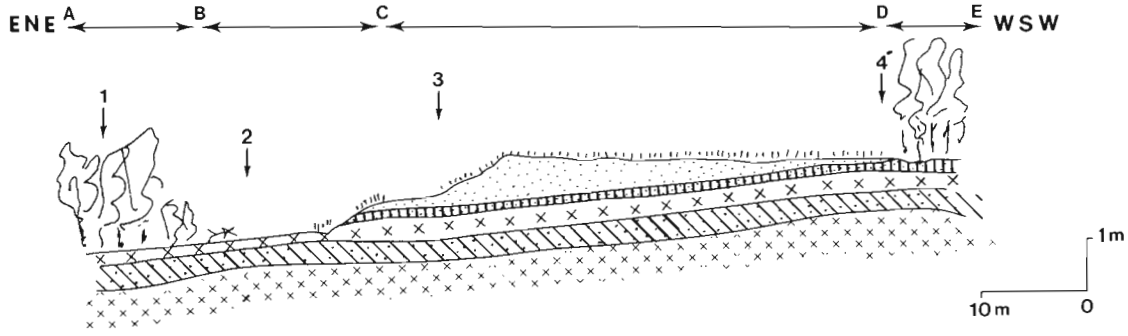
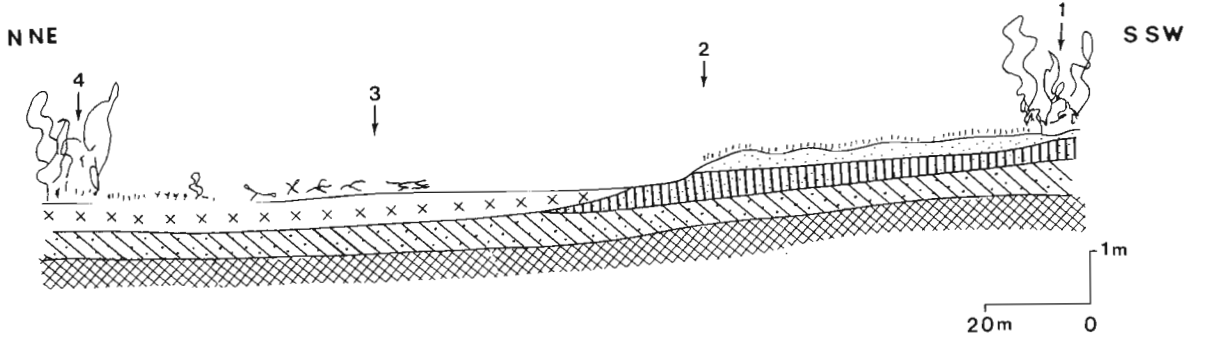


FIGURE 3 - *Chaîne de sols NDA, brousse tigrée.*



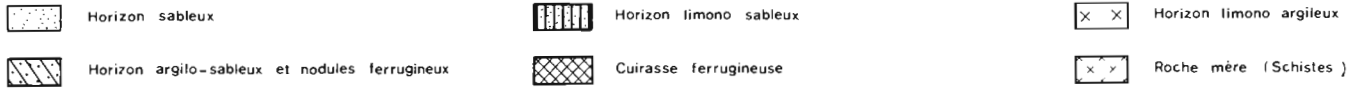


FIGURE 4 - *Chaîne de sols KER, brousse tigrée.*

Toposéquence KER (fig. 4)

Organisation

Elle rappelle beaucoup celle de la toposéquence précédente : mêmes orientations des rides sableuses et des bandes boisées, mêmes emplacements des bandes boisées nues et sableuses, mêmes supports pédologiques, même troncature érosive, même inclinaison du substrat cuirassé. Les seules différences notables concernent la largeur de la zone nue à nombreux arbustes morts et la présence mieux marquée d'une zone de passage à espèces herbacées et arbustives pionnières entre cette dernière et la zone boisée.

Végétation

Elle est également très semblable. La ride sableuse est colonisée par des graminées, parmi lesquelles *Schoenefeldia gracilis* domine à plus de 80 %, une germination d'arbustes (*Boscia senegalensis*) et quelques repousses mortes. Dans la bande boisée apparaissent des ligneux nouveaux, *Combretum micranthum* et *Pterocarpus lucens*, et de nombreuses graminées hautes et très vivaces malgré la date avancée de l'observation en saison sèche : *Andropogon gayanus* et *Pennisetum pedicellatum*. On note la présence de termitières en activité ; l'espèce en cause appartient au genre *Bellicositermes*.

Toposéquences ZAM I et II (fig. 5 et 6)

Organisation et pédologie

Les bandes nues et boisées s'élargissent beaucoup, mais elle ne sont présentes que sur les reliefs tabulaires sans exutoire. Les bourrelets sableux persistent, mais ils s'amincissent ; les bandes nues sont souvent des affleurements de cuirasses ferrugineuses à gravillons épars. Les sols, plus épais, s'assimilent à des sols peu évolués à faciès ferrugineux, sur les glacis nus ou sur les placages sableux, et à des sols peu évolués hydromorphes à pseudo-gley, dans les bandes boisées.

Végétation

Sur les voiles sableux, prolifèrent *Cenchrus biflorus, Aristida mutabilis, Zornia glochidiata*, quelques *Schoenefeldia* et quelques repousses de ligneux vers l'aval. La strate ligneuse des bandes boisées comprend *Combretum micranthum, Boscia senegalensis et Boscia angustifolia, Acacia ataxacantha, Balanites aegytiaca, Maerua crassifolia, Commiphora africana, Pterocarpus lucens, Grewia bicolor, Guiera senegalensis*. Les principales graminées sont : *Cenchrus biflorus, Aristida mutabilis, Andropogon gayanus, Pennisetum pedicellatum*. Les grandes termitières rouges (*Bellicositermes bellicosus*) en activité sont nombreuses dans la zone boisée, mais elles sont abandonnées et érodées au milieu de la bande nue.

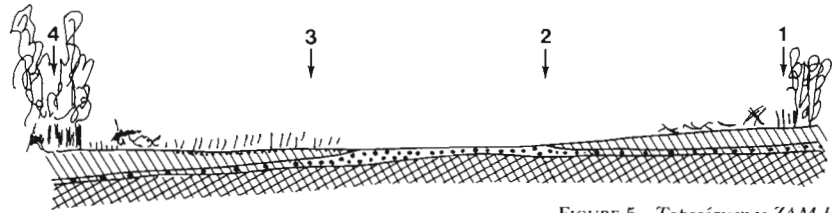
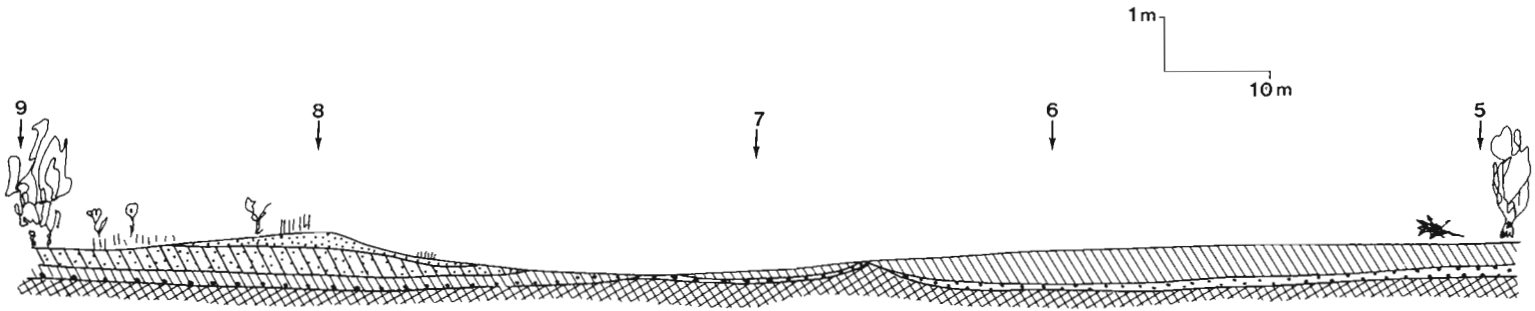


FIGURE 5 - *Toposéquence ZAM I.*



Horizon sableux

Horizons S A à sablo-limoneux

Horizon argilo-sableux

Gravillons de cuirasse ferrugineuse démantelée

Cuirasse ferrugineuse

FIGURE 6 - *Toposéquence ZAM II.*

Toposéquence TEN (fig. 7)

Organisation

L'organisation n'est plus celle en bandes alternées des brousses tigrées précédentes ; elle se présente sous forme de taches ou de ponctuations d'arcs concentriques liées aux dépressions circulaires du modelé des grès cuirassés. Le passage entre les bandes allongées et les bandes concentriques est rapide, mais visible ; les bandes allongées se raccourcissent, leurs extrémités s'infléchissent, puis se courbent. Ce passage se produit lorsque l'épaisseur du matériau meuble (sables, sols sablo-argileux) situé au-dessus de la cuirasse diminue. Les replats sont constitués par la cuirasse affleurante ou par des gravillons issus de son démantèlement. Les dépressions circulaires de 30 à 50 m de diamètre et de 1 à 2 m de profondeur sont dues aux effrondements de la cuirasse en ses points de faiblesse par soutirage interne (Leprun, 1979).

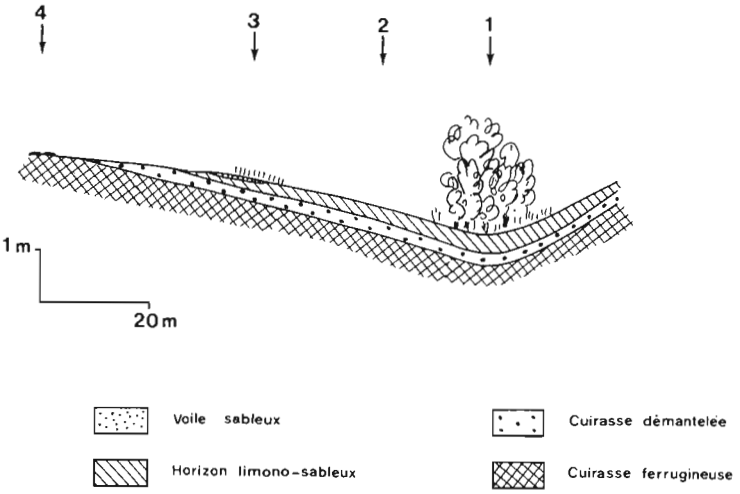


Figure 7 - *Toposéquence TEN.*

Les sols

Réduits à leur plus simple expression lorsque la cuirasse affleure (sols minéraux bruts), les sols sont minces lorsque la cuirasse est démantelée (sols peu évolués gravillonnaires) et ils ne deviennent épais que dans le fond des dépressions. Le matériau de ces sols, peu évolués à faciès ferrugineux, provient de l'accumulation des éléments fins issus des zones hautes et entraînés par les eaux de ruissellement. Les voiles sableux sont minces ou absents.

Végétation

Les relevés floristiques sont les suivants :

Strate arborée et arbustive (Recouvrement 60 %)		Strate herbacée (Recouvrement 10 %)	
Combretum micranthum	3	*Loudetia togoensis*	3
Acacia ataxacantha	2	*Schoenefeldia gracilis*	2
Grewia bicolor	1	*Eragrostis tremula*	+
Pterocarpus lucens	1	*Schizchyrium* spp	+
Piliostigma reticulatum	1	*Aristida mutabilis*	+
		Zornia glochidiata	1
		Brachiaria xantholeuca	+
		Cassia mimoscoides	+

Strate herbacée (Recouvrement 40 à 50 %)	
Andropogon gayanus	3
Panicum laetum	1
Pennisetum pedicellatum	2
Eragrostis tremula	1

Les analyses pédologiques et leur utilisation

Ces analyses sont trop nombreuses pour figurer dans cet article. Toutefois, pour illustrer la composition différente des sols et des matériaux superficiels des 3 zones distinctes (microdune, glacis et dépression), communes à toutes les toposéquences étudiées, 2 séries de résultats analytiques seront présentées :

- l'une, qui a trait à la toposéquence GOS II, est consignée dans le tableau I ;
- l'autre est traitée et interprétée par une analyse en composantes principales (Tomassone, 1975) (tabl. II, III, IV, V, VI et fig. 7 et 8).

Le tableau I fournit quelques déterminations analytiques qui permettent de différencier l'horizon de surface de 0 à 20 cm de 3 zones particulières de la toposéquence GOS II (fig.1) :

- la zone 1, sur la microdune, fosse 20 ;
- la zone 2, sur la partie amont du glacis, fosse 22 ;
- la zone 3, sur la partie aval du glacis, fosse 23.

Les résultats des analyses de la tranche superficielle des sols de la séquence GOS II (fig. 1), regroupés dans le tableau I, mettent en évidence l'entraînement par les eaux de ruissellement des éléments fins et des éléments nutritifs de l'amont vers l'aval.

À partir des données du tableau II, ont été calculés les paramètres statistiques élémentaires : moyennes et écarts-types de toutes les variables (tabl. III), et la matrice des corrélations de ces variables entre elles (tabl. IV).

On aboutit alors, par l'étude des individus (tabl. V) et des variables (tabl. VI), au cercle des corrélations de la figure 8. On vérifie, grâce à la grandeur et à la direction des vecteurs des différentes variables, que l'azote (N) est très bien représenté dans le plan principal des axes 1 et 2 ($r^2 = 0,89$) ; que l'argile (arg), la porosité (por), la matière organique (mo), le pF 4,2 (p4,2) et la capacité d'échange (t) sont bien représentés ($0,65 < r^2 < 0,80$) ; que le phosphore (pho) et les sables grossiers (sgr) sont moyennement représentés ($r^2 < 0,60$) ; que l'eau utile (h_2o) est médiocrement représentée ($r^2 < 0,40$).

L'axe 1 horizontal, sur lequel se lient la quasi-totalité des variables et en particulier la granulométrie et les caractères chimiques, peut être désigné «axe granulométrie».

Tableau I - Résultats analytiques de l'horizon de surface de 3 zones de la toposéquence GOS II (fig. 1)

Déterminations	Microdune (1)	glacis nu amont (2)	glacis nu aval (3)
Argiles + limons fins %	3,4	47,4	78,1
Limons grossiers %	0,4	2,6	4,1
Sables %	96,1	47,3	15,9
Carbone %	0,70	4,44	3,40
Azote %	0,18	0,55	0,46
Somme des cations méq/100 g	0,86	3,22	12,64
Phosphore total %.	0,16	0,31	0,64

Tableau II - Données d'analyse de l'horizon de surface des sols de toutes les toposéquences étudiées employées dans une analyse statistique en composantes principales

	N°	arg %	sgr %	mo %	n %.	pho %.	s méq	t méq	por	p4,2	h_2o util
Microdune											
GOS 20	001	1,4	53,7	0,1	0,18	0,16	0,86	0,10	36,2	0,89	0,55
GOS 34	002	2,7	45,4	0,2	0,22	0,27	1,52	1,73	36,6	6,02	6,06
ANS 4	003	5,1	66,2	1,0	0,33	0,20	2,59	9,70	37,1	3,30	0,90
NDA 3	004	12,4	32,5	0,7	0,56	0,22	3,33	6,61	29,7	5,20	4,90
KER 2	005	13,8	62,4	0,6	0,38	0,23	0,64	5,82	31,9	4,00	3,60
ZAM 3	006	14,7	27,7	0,5	0,26	0,18	0,63	1,21	31,7	2,30	7,10
TEN 3	007	6,1	36,7	1,6	0,69	0,21	3,01	6,10	32,4	3,90	1,50
Glacis nu											
GOS 24	008	19,7	29,4	0,1	0,41	0,25	3,82	4,04	35,3	3,18	12,67
GOS 32	009	21,4	17,7	0,6	0,58	0,51	5,85	4,98	34,9	6,57	13,08
ANS 2	010	5,8	65,1	1,1	0,52	0,60	3,65	4,10	32,5	4,30	3,90
NDA 2	011	31,6	18,4	1,0	0,82	0,76	15,42	15,47	30,4	11,3	5,90
KER 3	012	23,5	60,9	0,5	0,39	0,31	1,63	6,92	29,6	5,7	3,10
ZAM 2	013	9,9	26,7	0,5	0,26	0,37	0,83	1,03	39,9	2,5	5,40
TEN 2	014	32,6	17,5	2,0	0,67	0,40	3,40	15,30	28,5	10,1	3,70
Dépression boisée											
GOS 29	015	34,5	8,0	1,1	1,25	0,47	4,45	8,82	34,2	22,9	9,10
GOS 36	016	21,3	24,8	3,0	1,61	0,66	7,28	15,30	44,1	5,68	21,05
ANS 3	017	8,6	62,7	1,5	0,60	0,51	4,75	7,60	37,2	4,9	4,90
NDA 1	018	23,3	18,8	2,9	1,88	0,60	14,93	16,62	38,1	11,5	7,60
KER 4	019	35,2	32,6	0,8	0,63	0,49	2,50	13,38	36,5	13,1	7,50
ZAM 1	20	8,7	19,7	1,0	0,58	0,60	2,50	4,21	24,3	3,4	5,30
TEN 1	021	24,3	12,5	4,8	1,77	0,52	5,01	13,3	42,6	10,5	5,50

arg = argile ; sgr = sables grossiers ; mo= matière organique ; n = azote ; pho = phosphore ; s = somme des cations ; t = capacité totale d'échange ; por = porosité ; p4,2 = pF4,2 ; h_2o util = eau utile.

Tableau III - Statistiques élémentaires

VARIABLES	MOYENNES	ÉCARTS-TYPES DE LA SÉRIE
arg	16,981	10,5439
srg	35,210	18,7852
mo	1,219	1,1155
n	0,695	0,4921
pho	0,406	0,1773
s	4,219	3,9496
t	7,737	5,1622
por	34,462	4,6446
p4.2	6,726	4,9188
h_20u	6,348	4,5647

Tableau IV - Corrélations

	arg	srg	mo	n	pho	s	t	por	p4.2	h_20u
arg	0,1000									
srg	-0,610	-1,000								
mo	0,306	-0,382	1,000							
n	0,501	-0,552	0,871	1,000						
pho	0,463	-0,412	0,477	0,610	1,000					
s	0,442	-0,418	0,431	0,658	0,705	1,000				
t	0,700	-0,372	0,682	0,744	0,592	0,693	1,000			
por	-0,009	-0,045	0,459	0,440	0,119	0,143	0,201	1,000		
p4,2	0,784	-0,540	0,327	0,582	0,453	0,426	0,593	0,067	1,000	
h_20u	0,389	-0,482	0,209	0,442	0,433	0,316	0,260	0,417	0,206	1,000

L'axe 2 vertical, dont ne se rapproche qu'une seule variable, peut être appelé «axe de la porosité».

La figure 9, qui représente la répartition des individus à partir de leurs coordonnées sur les axes principaux et d'indices calculés, permet de regrouper les 3 domaines différents du tableau II. Le premier, qui rassemble les observations de 1 à 7, lie donc les microdunes au caractère sables grossiers, ce qui est évident. Le deuxième, qui réunit les observations numérotées de 8 à 14 et qui concernent donc les zones de glacis nus, lie ces glacis au facteur argile et à l'humidité à pF4,2 qui lui est dépendant, ce qui est patent compte tenu de ce qui a été dit à propos des analyses du tableau I. Enfin, le troisième domaine regroupe quelques observations qui concernent les dépressions boisées et les rattachent aux facteurs matière organique (et azote qui lui est lié) et eau utile, ce qui est tout à fait logique puisque ce sont des dépressions où se concentrent l'eau et la plus grande partie de la biomasse.

Différentes mesures sur le déplacement des brousses tigrées

Plusieurs méthodes de mesure ont été employées pour tenter d'estimer le déplacement des bandes boisées. La première s'est appuyée sur le déplacement par rapport à certaines bornes astronomiques de l'Institut géographique national (IGN), implantées

Tableau V - Étude des individus

1e colonne : coordonnées des individus sur les axes principaux
2e colonne : cosinus carres (qualité de la représentation)

INDIVIDUS	AXE 1		AXE 2	
001	3,4407	0,8937	-0,7755	0,0454
002	2,1971	0,7384	-0,5615	0,0482
003	2,0248	0,4839	-1,0131	0,1211
004	1,1884	0,4795	0,6730	0,1538
005	2,1354	0,7837	0,1169	0,0023
006	1,3439	0,4247	-0,3150	0,0233
007	2,0444	0,6296	0,3563	0,0191
008	0,8432	0,1350	-0,0366	0,0003
009	-0,6327	0,0911	0,2796	0,0178
010	1,2939	0,2691	-0,4452	0,0319
011	-3,0867	0,5067	1,9143	0,1949
012	1,5035	0,4153	1,0373	0,1977
013	-1,3357	0,2170	1,8224	0,4040
014	1,6335	0,4125	-0,8777	0,1191
015	-2,7946	0,4462	1,8790	0,2017
016	-3,8353	0,5655	-2,6443	0,2688
017	0,5714	0,0854	-1,1314	0,3347
018	-4,3019	0,8284	-0,6853	0,0210
019	-1,3977	0,2912	1,0512	0,1647
020	-3,6309	0,5903	-1,8937	0,1606
021	0,7953	0,0740	1,2494	0,1827

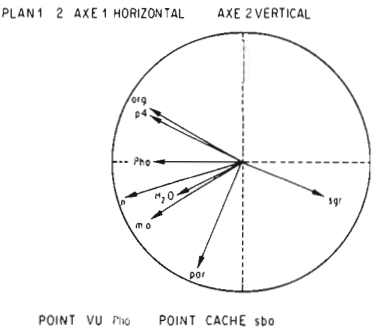


FIGURE 8 - *Analyse en composantes principales. Cercle des corrélations. Grandeur et direction des vecteurs des différentes variables, plan principal (axes 1 et 2).*

Tableau VI - Étude des variables

1e colonne : corrélations entre les variables et les axes principaux
2e colonne : corrélations au carré

VARIABLES	COMPOSANTES PRINCIPALES			
	Axe 1		Axe 2	
arg	-0,7524	0,5661	0,4831	0,2334
srg	0,6807	0,4634	-0,2620	0,0686
m.o	-0,7296	0,5324	-0,4347	0,1889
n	-0,9058	0,8205	-0,2628	0,0690
pho	0,7580	0,5745	0,0382	0,0015
s	-0,7597	0,5772	0,0376	0,0014
t	0,8515	0,7251	0,0491	0,0024
por	-0,3350	0,1122	-0,8035	0,6457
p4.2	-0,7236	0,5236	0,4226	0,1786
h_20u	-0,5380	0,2894	-0,2279	0,0519

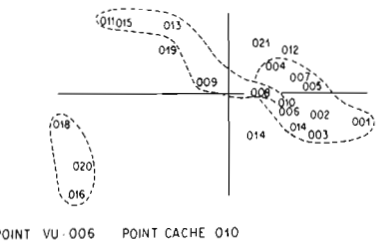


FIGURE 9 - *Analyse en composantes principales. Diagramme des relevés (axes 1 et 2).*

dans la région du Gourma malien en 1955-56 après triangulation sur un point fixe. 2 bornes ont été choisies à l'intérieur de brousses tigrées. L'une est la borne d'altitude 273 m, située près du village de Tega au sud de Hombori, à 14° 59' de latitude nord et 2° 05' de longitude ouest, carte IGN au 1/200 000 ND 30 XVII. Cette borne a été retrouvée ensevelie sous une bande nue à 15,8 m de la bande boisée dégradée où elle avait été cimentée vingt et un ans auparavant par les villageois du hameau proche de Taabi. La vitesse moyenne de déplacement calculée est de 0,75 m par an. Une seconde borne, implantée par l'IGN la même année sur la piste Gossi-N'daki à 42 km à partir du pont de la piste Gossi-Gao, a servi à mesurer le déplacement de la brousse tigrée NDA (fig. 3). Il s'agit de la borne astronomique d'altitude 303 m et de coordonnées 15° 34' 20" de latitude nord et 1° 01' 10" de longitude ouest triangulée sur un repère marqué proche d'une bande boisée. En vingt et un ans, cette bande a parcouru 5,2 m, soit une moyenne annuelle de 25 cm. D'autres mesures annuelles réalisées grâce à des repères cimentés dans le sol des toposéquences GOS II et III ont fourni des mouvements de l'ordre de 20 cm par an.

DISCUSSIONS

Structure et environnement des formations de brousses tigrées

Toutes les coupes transversales des formations de brousses tigrées représentées par les figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6 indiquent qu'elles peuvent être subdivisées en 3 parties distinctes :

- une partie haute sableuse herbeuse ;
- une partie médiane argilo-sableuse à limono-sableuse nue ;
- une partie basse sablo-argileuse à limono-sableuse boisée.

Ces 3 parties correspondent à des bandes, grossièrement parallèles entre elles, qui se succèdent toujours dans le même ordre, perpendiculairement à la direction nord-est des vents dominants de saison sèche, alizés et harmattan. Ces bandes, à peu près rectilignes dans les zones septentrionales de l'étude, s'incurvent à leurs extrémités et peuvent donner alors naissance à des formes complexes en mouchetures et en rosaces vers les régions méridionales. On passe des brousses tigrées au nord aux brousses ponctuées au sud. En même temps, la largeur de ces formations, mesurée sur les toposéquences, varie avec la latitude ; elle passe par un maximum autour de 15° de latitude et elle diminue de part et d'autre de ce parallèle. La largeur de chacune des bandes peut varier au sein d'un même ensemble de brousse, mais généralement la largeur des bandes nues diminue vers l'intérieur où il arrive que l'on puisse observer un télescopage des bandes herbeuses et boisées, la bande nue n'étant plus présente.

La pente moyenne de la plupart des brousses observées est de 1 à 2 %. Sur le flanc de quelques massifs gréseux et dans le cas des brousses ponctuées, cette pente peut atteindre 4 à 5 %.

Les formations géologiques impliquées sont toujours des roches sédimentaires peu pentées, schistes ou grès argileux non cuirassés au nord, cuirassés au sud. La schistosité ou l'orientation de ces roches, lorsqu'elles en présentent une, est celle de l'allongement des bandes, soit nord-est - sud-ouest. C'est le cas de l'ensemble des formations du Précambrien supérieur du Gourma malien, telles qu'elles ont été cartographiées par REICHELT (1972) et où se localise l'essentiel de nos observations.

Le modelé où s'installent les brousses tigrées, c'est-à-dire en dehors des zones dunaires et des massifs ou des reliefs rocheux nus, est plat ou peu penté. Sur ces sur-

faces substructurales, le réseau hydrographique hiérarchisé est totalement absent. L'eau stagne dans les collatures des bandes boisées et l'endoréisme est la règle.

Les sols des 3 types de bandes ne sont guère différents du nord au sud. Sur les microdunes et sur les placages sableux, on trouve des sols peu évolués d'apport ; sur les glacis, des sols subarides tronqués ou des sols peu évolués ; dans les dépressions, les sols sont peu évolués ou bruns subarides structurés ou hydromorphes. Il n'y a donc pas, comme cela s'observe la plupart du temps, d'accentuation de la pédogenèse avec l'accroissement de la pluviométrie, vers le sud.

Les sols sont azonaux. Un net gradient granulométrique est toujours observable de part et d'autre de la zone nue qui est la plus argileuse ou la plus limoneuse : vers la dépression, il y a un mélange de sables, d'argile et de limons, vers le haut, ce sont les sables qui dominent.

En revanche, il y a un changement notable de la composition des strates de la végétation du nord vers le sud, où les espèces à affinité soudanienne deviennent dominantes.

Hypothèse de formation des brousses tigrées sahéliennes

À l'aide des éléments qui précèdent, on peut tenter de reconstituer les processus de formation des brousses tigrées sahéliennes. On peut imaginer au départ une végétation uniforme ou éparse non contractée qui colonise un sol brun constitué d'un horizon d'altération argilo-sableux à nodules ferrugineux, issu de schistes cuirassés ou non, et d'un horizon limono-sableux (toposéquences NDA et KER, fig. 3 et 4). Par suite de la péjoration du climat, la zone devient endoréique. L'apparition de phénomènes érosifs hydriques lamellaires et en griffes, fréquents sous climat semi-aride, amène à l'ablation progressive de l'horizon argilo- ou limono-sableux de surface qui, tronqué, se termine alors en biseau pour former la partie haute du glacis. Le glacage de surface, dû à l'érosion, empêche l'infiltration de l'eau et l'installation de la végétation. Le matériel érodé grossier est déposé en bas du glacis par le ruissellement de saison des pluies. Les éléments fins colmatent la surface du glacis ou se déposent en croûte plus bas. Durant la saison sèche, les vents du nord-est reprennent les sables du matériel grossier érodé et les déposent en croûte au sommet du glacis. Le phénomène se poursuit année après année et la végétation ligneuse originelle se modifie. Celle atteinte par la troncature érosive meurt et ses racines ainsi que les nids termitiques abandonnés restent enfouis ou en partie déterrés. Celle de la zone basse transformée en collature où se concentrent les eaux se densifie. En avant de cette zone boisée, les plages de sables issues de l'érosion et non reprises par le vent sont colonisées par des espèces graminéennes pionnières. Il en est de même pour la crête sableuse. Les 3 plages qui constituent une unité élémentaire de brousse tigrée sont alors en place.

Évolution et dynamique

Le processus se poursuit. La microdune ou le bourrelet sableux s'accroît, avance et peut ainsi rejoindre une bande boisée contiguë en l'ensevelissant, comme c'est le cas dans les séquences de NDA et KER (fig. 3 et 4). Simultanément, la destruction du glacis par l'érosion hydrique modifie la zone basse, où s'accumule l'eau de ruissellement, et détermine l'épandage de sables ; ces derniers, rapidement, sont colonisés par les graminées éphémères ou par les germinations de ligneux en début de saison sèche ; cependant, plus tard, ils sont remis en mouvement par le vent. La bande boisée suit ce mouvement. Sa partie arrière, qui ne reçoit plus assez d'eau ou qui est rejointe par le

sable de la microdune contiguë, meurt et avec elle la mésofaune de termites et d'insectes divers qui vivait sous son couvert. La figure 1 de la séquence GOS II illustre cette dynamique. En particulier, on peut reconstituer dans l'espace l'ablation de tout l'horizon sablo-limoneux à sablo-argileux entre les profils 22 et 29c, et on peut montrer que la destruction de cet horizon conduit à un enrichissement en éléments fins en bas de pente et en sable en haut de pente, gradient prouvé par les chiffres du tableau I.

On assiste donc à une translation continue des sols et de la végétation sous les effets cumulés et complémentaires des érosions, hydrique et éolienne, successives. Il arrive, comme c'est le cas pour les séquences septentrionales, que la faible épaisseur des horizons et l'agressivité érosive se conjuguent pour mettre en mouvement l'ensemble du sol meuble jusqu'à atteindre la roche peu altérée (fig. 1 et 2). Dans les autres cas, seuls les horizons supérieurs du sol sont remis en mouvement et transitent au-dessus des horizons d'altération de la roche ou de la cuirasse plus ou moins démantelée. Ceci explique le fait que les sols des brousses tigrées soient azonaux et peu différenciés quelle que soit leur latitude.

La nécessité de la conjonction des 2 formes d'érosion, hydrique et éolienne, pour que les brousses tigrées sahéliennes se forment et évoluent, explique pourquoi on ne les trouve pas au nord du 16e parallèle, limite au-delà de laquelle la pluviométrie annuelle tombe en dessous de 200 mm et devient insuffisante pour assurer l'ablation érosive hydrique. De même, en position méridionale avancée, vers 14° 30' de latitude nord, où la pluviométrie annuelle tourne autour de 500 mm, c'est l'action du vent qui devient le facteur limitant.

Il convient de moduler cette affirmation par les exigences édaphiques des brousses tigrées qui sont limitées, au nord du 16e parallèle, par l'extension des champs et des cordons dunaires et, en dessous de 14° 30' de latitude sud, par la disparition des formations sédimentaires et leur remplacement par les roches cristallines du socle. La disparition des formations de brousses tigrées suit exactement la limite entre les grès et le socle au Burkina Faso (fig. 10). Mais, en Mauritanie, les conditions édaphiques favorables font remonter ces formations végétales jusqu'au 17e degré de latitude nord ; au Niger, celles-ci atteignent, sur les grès argileux du continental terminal, le 12e degré de latitude nord.

Au sud, la disparition des brousses tigrées correspond également à l'apparition d'un système de drainage hiérarchisé des têtes des premiers tributaires du Beli et de la Volta blanche. Lorsque l'eau des collatures boisées ne s'accumule plus mais s'écoule vers les marigots, la bande boisée contractée ne peut se maintenir et la dynamique de l'ensemble perd un de ses principaux moteurs.

Écologie

En position septentrionale à faible pluviométrie, les bandes boisées ne peuvent se mettre en place et persister que grâce à la concentration des eaux de ruissellement issues des glacis nus dans la collature. L'eau qui se rassemble dans cette partie déprimée sans exutoire peut s'infiltrer à la faveur de la structure développée, de la porosité élevée et de la teneur en éléments fins des matériaux de ces sols dont la capacité en eau est élevée (300 $mm.m^{-1}$ contre 30 $mm.m^{-1}$ aux sols sableux amont). L'évaporation, réduite du fait du feutrage organique de surface et de la couverture végétale, permet la conservation de l'humidité quatre à cinq mois après la fin des pluies. Elle permet aussi la présence et le maintien d'espèces herbacées et ligneuses vivaces bien au nord de

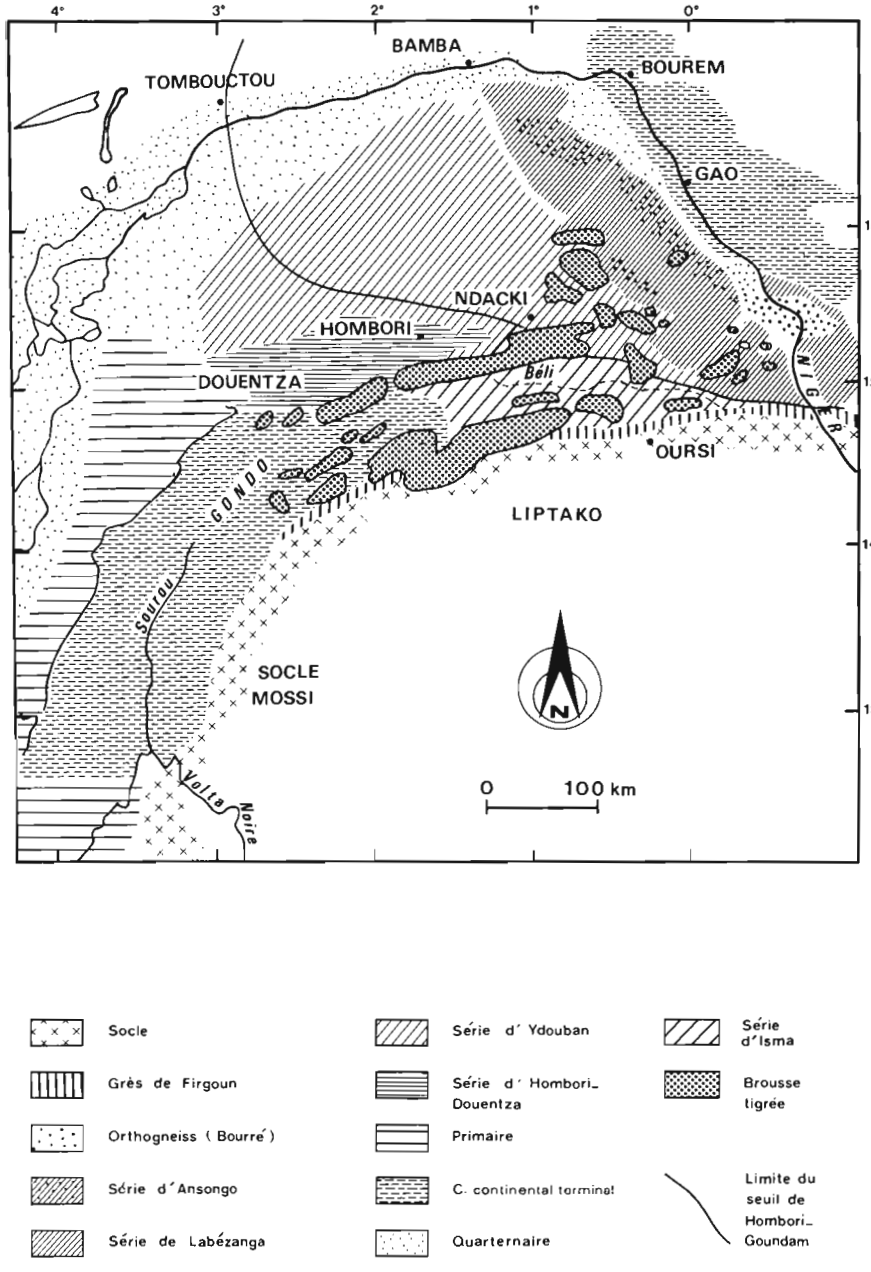


FIGURE 10 - *Extension de la brousse tigrée par rapport aux formations géologiques* (d'après *schéma géologique de J.* GALLAIS).

leurs aires habituelles. Il en est ainsi de *Andropogon gayanus* et de *Pennisetum pedicellatum*, pour les graminées, de *Pterocarpus lucens*, de *Combretum micranthum* et de *C. glutinosum*, pour les espèces ligneuses.

Il en est de même des espèces de termites, du genre soudano-sahélien *Bellicositermes*, qui remontent loin en latitude à la faveur des bandes boisées humides et argilo-limoneuses de brousses tigrées. Les bandes boisées humides abritent également un certain nombre d'espèces d'insectes, de lépidoptères, de rongeurs et d'oiseaux dont les habitats se situent beaucoup plus au sud.

Les bandes boisées de brousses tigrées étudiées constituent donc des jalons contractés et avancés d'espèces à affinité sud-sahélienne et soudanienne au sein de régions nord-sahélienne et saharo-sahélienne. Les espèces à écologie plus humide retrouvent, dans le biotope privilégié que constituent les bandes boisées, des conditions de milieu qui équivalent à celles dont elles disposent plus au sud.

Nouvelles lignes de recherches

Les résultats et les interprétations consignées ci-dessus ne découlent que des études des brousses tigrées sahéliennes localisées dans le Gourma malien et au nord du Burkina Faso. Il conviendrait d'étendre l'étude de ces formations en Mauritanie et au Niger pour pouvoir confirmer ou réduire les conclusions du présent travail. De nouvelles recherches pourraient être entreprises sur les sites déjà étudiés. Il serait nécessaire de mesurer les pertes en terre et le ruissellement tout au long de la séquence grâce à des parcelles ou à l'aide d'un minisimulateur de pluie de manière à chiffrer le volume des sols mis en mouvement et le volume d'eau qui se concentre dans les dépressions. De même, l'érosion éolienne pourrait être estimée. Enfin, des études biologiques concernant la biocénose de ces formations pourraient être entreprises dans des zones à évolution «normale» et dans les mises en défens.

CONCLUSIONS

L'étude détaillée et pluridisciplinaire de différentes séquences de brousses tigrées en zones saharo-sahélienne et sahélienne du Mali et du Burkina Faso conduit aux principaux résultats suivants :

- toutes ces formations végétales sont constituées de 3 bandes alternées différentes :
  - une microdune sableuse herbeuse,
  - un glacis argileux nu,
  - une dépression sablo-argileuse boisée dense ;
- la formation, la persistance et l'évolution des brousses tigrées sont sous la dépendance de plusieurs facteurs qui sont :
  - une pluviométrie annuelle supérieure à 200 mm et inférieure à 500 mm,
  - la nature sédimentaire du substrat et la pente du plancher de ce substrat rocheux, qui est nulle ou inférieure à 4 %,
  - la faible épaisseur de la couverture de sols juvéniles au-dessus de ce plancher (inférieur à 1 m, et absent sur dunes épaisses),
  - la direction des vents dominants de saison sèche, qui est perpendiculaire à l'orientation des bandes ;
- l'ensemble de la formation est animé d'une dynamique rapide. Sous l'action des eaux de pluies, le matériel fin du glacis nu s'érode et vient se déposer dans la collature de la bande boisée. L'accumulation des eaux à ce niveau permet la germination et

l'avancée des espèces de cette bande sur le glacis. Au cours de la saison sèche suivante le sable resté en surface de ce glacis est repris par le vent et il est déposé sur la micro-dune herbeuse qui va se déplacer elle aussi dans le sens du vent ;

- la vitesse de ce déplacement conjoint des sols et de la végétation varie de 20 à 70 cm par an. Cette dynamique, rapide au nord, se ralentit au sud et s'arrête lorsque les conditions, édaphiques en particulier, ne sont plus réunies ;

- la brousse tigrée représente un écosystème sahélo-soudanien en milieu subaride, et la bande boisée est une niche écologique humide et riche au sein d'une région sèche semi-aride. Les espèces végétales et animales qui y subsistent sont alors placées aux limites septentrionales de leurs aires de répartition géographique et elles sont donc vitalement tributaires des variations climatiques et, en particulier, des longues périodes de sécheresse ;

- si les observations ne militent pas en faveur de la formation des brousses tigrées sahéliennes par la sécheresse et par le surpâturage, ceux-ci sont cependant responsables des modifications floristiques et peuvent être à l'origine de la disparition des témoins les plus septentrionaux.

J.-C. Leprun : *pédologue*,
représentation ORSTOM, CP 09747, 70001 Brasilia, Brésil

Bibliographie

AUDRY (P.) et ROSSETTI (Ch.), 1962. - Observations sur les sols et la végétation en Mauritanie du sud-est et sur la bordure adjacente du Mali (1959 à 1961). *Rapp. multigr.* 24067/F/1 FAO, Rome.

BOALER (S. B.) et HODGE (C. A. H.), 1962. - Vegetation stripes in Somaliland. *J. Écol.*, 50 : 465-474.

BOULET (R.), GAVAUD (M.) et BOCQUIER (G.), 1964. - Étude pédologique du Niger Central. *Rapp. multigr.* ORSTOM, Dakar, 211 p.

CLOS-ARCEDUC (M.), 1956. - Étude sur photographies aériennes d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée. *Bull. Ifan*, Dakar, 18 (3) : 677-684.

CLOS-ARCEDUC (M.), 1964. - La géométrie des associations végétales en zone aride. Actes de la conférence Unesco : explorations aériennes et études intégrées. Toulouse : 419-421.

CORNET (A.), DELHOUME (J.-P.) et MONTANA (C.), 1983. - Vegetation patterns and soils in the Mapimi Bolson (Chihuahuan Desert- Mexico). I. Vegetation arcs. Second Chichuahuan Desert Symposium, Alpine, Texas, USA, 19 p.

COULIBALY (M.), 1979. - Approche phyto-écologique et phytosociologique de pâturages sahéliens au Mali (région du Gourma). Thèse doct. spc. univ. Nice, 149 p.

DUCELIER (J.), 1963. - Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute-Volta. Mém. BRGM, 10, Paris.

GALLAIS (J.), 1975. - Pasteurs et paysans du Gourma. La condition sahélienne. *Mém. Centre Et. Géogr. Trop.* CNRS, Paris, 239 p.

HEMING (C. F.), 1970. - Vegetation arcs in Somaliland. *J. Écol.*, 53 : 57-67.

JANKE (B.), 1976. - Zum problem der Vegetationsstreifen (Brousse tigrée) im demiariden Afrika. Geookologische Untersuchungen in West- Niger. *Die Erde*, 107 : 31-46.

LEPRUN (J.-C.), 1978. - Étude de l'évolution d'un système d'exploitation sahélien au Mali. Compte-rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de «brousse tigrée» dans le Gourma. *Rapp. multigr.*, ORSTOM, Paris, 45 p.

LEPRUN (J.-C.), 1979. - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Thèse doct. État, univ. Strasbourg et *Mém. Sc. Géol.*, 58, Strasbourg, 224 p.

LEPRUN (J.-C.), 1983. - Sols et relations sol-végétation. Étude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. *Rapp. multigr.* DGRST ed. Paris, 114 p.

REICHELT (R.), 1972. - Géologie du Gourma (Afrique occidentale). Un seuil et bassin du Précambrien supérieur. *Mém. BRGM*, 53, 213 p., carte au 1/500 000 h. t.

TOMASSONE (R.), 1975. - L'analyse en composantes principales. *Rapp. multigr.* Laboratoire de biométrie du CNRS.

WHITE (H.), 1970. - Brousse tigrée patterns in Southern Niger. *J. Soil Sci.*, 58 : 549-53.

WICKENS (C. E.) et COLLIER (F. W.), 1971. - Some vegetation patterns in the republic of Sudan. *Geoderma* : 43-59.

Antoine CORNET

Relations entre la structure spatiale des peuplements végétaux et le bilan hydrique des sols de quelques phytocénoses en zone aride

INTRODUCTION

Dans les écosystèmes arides et semi-arides, les variations de la disponibilité en eau des sols constituent une des causes principales de l'hétérogénéité spatiale des communautés végétales (OLSWIG-WHITTAKER *et al.*, 1983). Ces variations dépendent elles-mêmes de l'hétérogénéité de la couverture pédologique et de la redistribution de l'eau à l'échelle des versants sous l'action du ruissellement. Ce phénomène, important en zone aride, est conditionné par les états de surface des sols (VALENTIN, 1981 ; CASENAVE et VALENTIN, 1988 ; ESCADAFAL, 1989). La structure spatiale de la végétation intervient elle-même dans la redistribution de l'eau ; sa dynamique naturelle, ou provoquée, engendre soit un renforcement des processus existants, soit une évolution vers des modes de fonctionnement nouveaux.

À partir de la caractérisation du régime hydrique des sols de deux toposéquences situées l'une en formation de brousse tigrée dans le nord du Mexique, l'autre en modelé dunaire ancien dans le Ferlo sénégalais, le présent travail se propose de relier la répartition spatiale de la végétation à la disponibilité des ressources en eau. Les conséquences de l'hétérogénéité spatiale du fonctionnement en termes d'utilisation de l'eau par la végétation, de productivité et de dynamique de la couverture végétale, seront aussi discutées.

SITES D'ÉTUDE

Le premier site d'étude est situé dans la réserve de la biosphère de Mapimi, localisée dans la partie centrale de la zone aride du nord du Mexique. C'est une zone de bassins endoréiques, d'altitude moyenne (1 100 m). Elle appartient à la zone biogéographique du désert de Chihuahua (SCHMIDT, 1979).

Le climat est tropical aride d'altitude (CORNET, 1987) avec une pluviométrie moyenne annuelle de 264 mm et un coefficient de variation de 42 % (station de Ceballos, 1956-1983). L'essentiel des précipitations se produit en été, les pluies de juin à septembre inclus représentent 71 % du total annuel. La moyenne annuelle des températures est de 20,8 °C, la moyenne des *minima* du mois le plus froid est de 3,9 °C en janvier et la

moyenne des *maxima* du mois le plus chaud est de 36,1°C en juin. L'indice d'aridité (UNESCO, 1977), qui est de 0,16, correspond à un climat aride.

Les différents types de sol de la réserve se distinguent essentiellement par le type de matériau dans lequel ils se développent et par le mode de mise en place de ce matériau. Il s'agit surtout d'alluvions et de colluvions dont la répartition dans le paysage est fonction de la géomorphologie (DELHOUME, 1987). En zone de glacis à faible pente où est localisé le site d'étude, les sols sont des Yermosols et des Xérosols modaux (classification FAO-Unesco, 1974) sur alluvions fines et moyennes qui reposent à moyenne profondeur sur un matériau calcaro-marneux autochtone.

La végétation est constituée par un matorral désertique microphylle (RZEDOWSKI, 1981) ; celui-ci, dominé par *Larrea tridentata*, présente divers faciès suivant la plus ou moins grande abondance d'espèces crassulescentes. Il occupe les reliefs, leurs piémonts et une partie des hauts glacis. Les glacis médians supportent une végétation en mosaïque dans laquelle les faciès de brousse tigrée dominent (CORNET *et al.*, 1987). Les bas-fonds et les plaines alluviales sont occupés par une steppe subarbustive à halophytes et à graminées vivaces (*Atriplex* spp., *Suaeda* spp., *Hilaria mutica*, *Sporobolus airoides*) (nomenclature *d'après* CORRELL et JOHNSTON, 1979).

Le second site d'étude, la station de Fété-Olé, est situé en zone sahélienne sénégalaise, dans la partie nord du Ferlo sableux. D'un point de vue géologique, la région appartient au bassin sénégalo-mauritanien. Au Quaternaire, l'alternance de périodes humides et de périodes sèches a entraîné l'altération des dépôts du continental terminal et la formation de matériau sableux dunaire. On distingue généralement la formation de 3 ergs principaux successifs (LEPRUN, 1971). Ces formations sableuses donnent à la région un modelé dunaire particulier et différent suivant leur ancienneté. La station de Fété-Olé correspond à l'erg ancien avec un modelé de petit système dunaire non orienté (BILLE *et al.*, 1972).

Le climat est tropical sec de type sahélien, caractérisé par une courte saison des pluies estivale, des étés chauds et des hivers chauds et secs. La moyenne des précipitations annuelles est de 300 mm (300,3 mm à Podor entre 1931 et 1971) avec un coefficient de variation de 40,4 % (CORNET, 1981). La moyenne annuelle des températures est de 28,2 °C, la moyenne des *minima* du mois le plus froid est de 15,8 °C en janvier, la moyenne des *maxima* du mois le plus chaud est de 40,9 °C en juin. L'indice d'aridité (UNESCO, 1977), de 0,14, correspond à un climat aride.

Le relief, bien que peu accentué (pentes inférieures à 3 %), joue un rôle dans l'évolution des sols dont la différenciation est due pour l'essentiel aux dynamiques interne et externe de l'eau le long des toposéquences. La répartition des sols selon la topographie est la suivante :

- sur les sommets de dunes, sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à horizon A peu développé et à horizon B de couleur brun rouge ;
- sur les pentes, sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à horizon B épais différencié par la couleur et la texture peu argileuse ;
- en bas-fonds, sols hydromorphes, soit à hydromorphie d'ensemble, soit à pseudogley de profondeur seulement (BOULET et LEPRUN *in* BILLE, 1977).

La végétation est constituée par une steppe arbustive (BOURLIÈRE, 1978) dont la strate ligneuse est clairsemée et dont la strate herbacée, floristiquement pauvre, comprend une large majorité d'espèces annuelles. Le microrelief et les différents types de sol entraînent d'importantes variations locales de présence et d' abondance des espèces végétales.

STRUCTURE DE LA VÉGÉTATION

Formation de brousse tigrée

Ce type de formation apparaît dans la partie médiane des toposéquences. Dans la réserve de Mapimi, nous avons étudié un transect de 1 000 m dans le sens de la pente (CORNET *et al.*, 1987).

La végétation de brousse tigrée présente une alternance de bandes parallèles de végétation et de zones dénudées à très faible couverture végétale (inférieure à 4 %). Les bandes de végétation dense sont disposées perpendiculairement à la ligne de plus grande pente ; leur largeur varie de 20 à 70 m pour une longueur de 100 à 300 m. Les bandes les plus larges sont celles situées vers le bas de la toposéquence. Le rapport global entre la largeur des bandes et celle des zones dénudées varie de 24 à 30 %. Sur ces dernières, la surface du sol est lisse, compacte et très peu poreuse ; elle favorise un fort ruissellement en nappe (DELHOUME, 1987). La pente moyenne des bandes de végétation est de 0,55 %, alors que la pente moyenne des zones dénudées est de 0,65 %. En fait, la pente au niveau des bandes n'est pas régulière ; nulle à la marge supérieure, elle présente un décrochement brusque de 8 à 10 cm à l'aval.

Au niveau de chaque bande de végétation apparaît une zonation marquée qui nous a conduit à distinguer 5 zones (CORNET *et al.*, 1987) (fig. 1B). De l'amont à l'aval, nous distinguons :

- une zone de front (I), presque plate, qui présente en surface des dépôts pelliculaires d'éléments fins, fissurés en polygones. Elle est colonisée par une végétation basse et diffuse. Elle est caractérisée par l'abondance d'une graminée vivace de petite taille, *Tridens pulchellus* ; cependant de nombreuses espèces, de graminées annuelles et

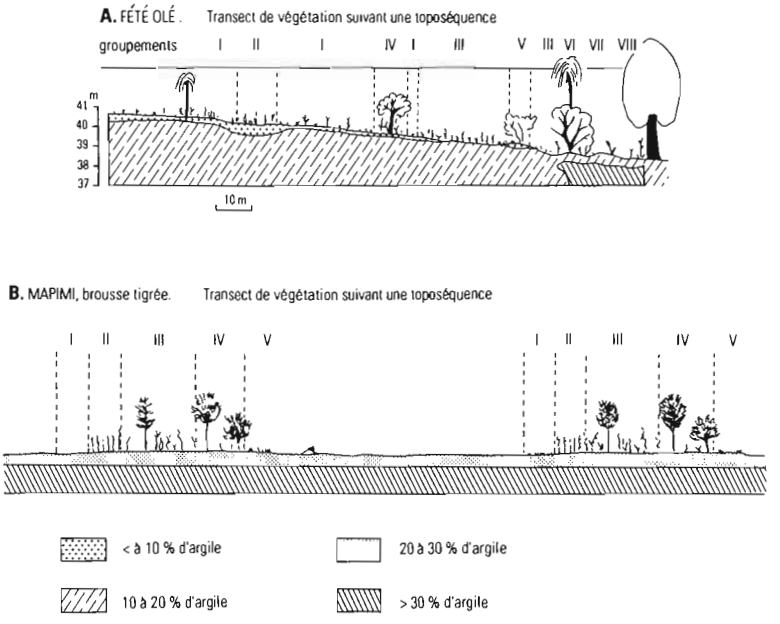


FIGURE 1 - *Structure de la végétation dans les transects étudiés.*

d'herbacées vivaces, sont présentes et forment une frange pionnière de végétation. Quelques graminées vivaces et quelques espèces ligneuses qui appartiennent à la bande de végétation sont présentes au stade juvénile ;

- la zone précédente est limitée à l'aval par un rideau de végétation (II) constitué par une strate arbustive dense de *Flourensia cernua*, de 1 à 1,5 m de hauteur, qui domine une strate herbacée à touffes vivaces de *Hilaria mutica* de 15 à 60 cm de hauteur.

- en arrière de ce rideau de *Flourensia cernua*, on trouve une zone arbustive (III), d'une hauteur de 1,5 à 2,5 m, qui surmonte la strate herbacée à *Hilaria mutica* et qui présente une diversité floristique plus grande, avec *Prosopis glandulosa, Aloysia gratissima, Lippia graveolens, Parthenium incanum*, etc. C'est dans cette zone que se rencontrent des espèces plus mésophiles, propres à ces formations.

- on trouve ensuite une zone à strate arbustive lâche (IV), plus pauvre en espèces, composée essentiellement de *Prosopis glandulosa* de plus grande taille et de *Acacia constricta* ; elle domine la strate herbacée à *Hilaria mutica*. La bande de végétation se termine par une zone occupée par de vieilles touffes dépérissantes de *Hilaria* et par quelques arbustes.

- à l'aval de la bande de végétation, la zone dénudée (V) comporte quelques cactacées et des restes d'arbustes morts plus ou moins déchaussés.

Cette zonation de la végétation (fig. 1B), qui semble traduire une dynamique de la bande, se retrouve dans toutes les bandes de végétation observées, mais les dimensions de chaque zone sont variables. Dans les nombreuses descriptions des formations à brousse tigrée africaines les auteurs signalent également l'existence de zonation (WORRAL, 1959 ; HEMMING, 1965 ; WHITE, 1970 ; AMBOUTA, 1984).

La couverture pédologique ne présente pas de discontinuité ou d'hétérogénéité majeure pour l'ensemble de l'unité, mis à part quelques variations dans la partie supérieure du sol. C'est essentiellement sous l'influence de la végétation que se modifient certaines caractéristiques de la partie supérieure du sol. Celle-ci, par ses apports périodiques de litière, donne au sol une plus forte teneur en humus laquelle, combinée à l'abondance des racines, favorise l'existence d'une structure à tendance grumeleuse. Cette structure amène une plus grande porosité et augmente la perméabilité (DELHOUME, 1987).

Formation sahélienne sur modelé dunaire

La végétation sahélienne, à petite échelle, ne présente pas de discontinuité brusque, mais une variation progressive du nord au sud. Elle se présente comme une formation herbeuse claire piquetée d'arbres et d'arbustes. La strate herbacée se caractérise par la dominance d'espèces annuelles, qui représentent 75,3 % des espèces présentes à Fété-Olé (CORNET et POUPON, 1978). La végétation ligneuse se concentre dans les dépressions et sur leur pourtour, en formant de véritables fourrés dominés par quelques arbres. Sur les dunes au contraire, les arbres ou les arbustes épars ne forment jamais une strate continue. La densité des ligneux est 10 fois moindre sur les dunes que dans les cuvettes et les surfaces terrières évoluent de 1 à 15 (POUPON, 1980).

Un transect de 120 m, qui recoupe une dune, son versant et un bas-fond, a été étudié en détail (CORNET et POUPON, 1978 ; CORNET, 1981). L'analyse de la composition floristique de la strate herbacée nous a conduit à distinguer 8 groupements élémentaires de végétation le long de cette toposéquence (fig. 1A) :

- un groupement des dunes et des pentes hautes (I), à *Aristida mutabilis, Aristida funiculata, Schoenefeldia gracilis, Blepharis linariifolia, Polycarpea linearifolia* (nomenclature *d'après* LEBRUN, 1973). Ce groupement est constitué de plantes espacées qui recouvrent assez faiblement le sol (15 à 25 % de recouvrement global) et de quelques

ligneux, 296 individus par hectare avec une surface terrière de 0,59 $m^2.ha^{-1}$ (POUPON, 1980), essentiellement *Balanites aegyptiaca* et *Commiphora africana*.

La surface du sol est composée d'un système en mosaïque qui comprend :

- des taches plus ou moins étendues dépourvues de végétation et encroûtées. Elles résultent de la disparition du couvert herbacé et de la transformation de la croûte de dessication en croûte structurale superficielle sous l'effet de l'impact des pluies. Les microhorizons sableux subissent en saison sèche l'action érosive du vent ; seule affleure alors la pellicule plasmique (VALENTIN, 1985). Ces zones sont fréquemment envahies par la formation d'un bioderme dû à des algues cyanophycées associées à des filaments mycéliens (CORNET, 1981). Signalé par divers auteurs en zone sahélienne (BARBEY et COUTE, 1976 ; DULIEU *et al.*, 1977), ce bioderme diminue encore la perméabilité et favorise le ruissellement,
- des microbuttes sableuses enherbées, édifiées avec le sable érodé des zones nues, piégé par la végétation en place.

L' abondance relative des diverses espèces herbacées et le recouvrement global de la végétation dépendent de la pluviosité de l'année. Ce groupement occupe environ 60 % de la surface ;

- le groupement des replats (II) et des ensellements comblés par un matériau sableux non encroûté et à bilan hydrique plus favorable. Il est caractérisé par *Cenchrus prieurii, Cenchrus biflorus, Alysicarpus ovalifolius, Merremia pinnata, Borreria stachydea*. Le recouvrement global est de 30 à 60 %. Il occupe entre 5 et 10 % de la surface. La végétation ligneuse est plus abondante, 1 004 individus par hectare qui représentent une surface terrière de 2,04 $m^2.ha^{-1}$. Elle est essentiellement constituée de *Commiphora africana* et de *Acacia senegal* ;
- le groupement de bas de pente (III) qui comprend *Shoenefeldia gracilis, Alysicarpus ovalifolius, Aristida mutabilis, Dactyloctenium aegyptium, Brachiaria xantholeuca, Panicum laetum, Chloris prieurii*. Ce groupement a une végétation plus dense, avec 40 à 70 % de couverture globale. Il représente environ 20 % de la surface. La strate ligneuse comprend 1 497 individus par hectare avec une surface terrière de 3,85 $m^2.ha^{-1}$. Le sol présente une teneur en éléments fins plus élevée (argile et limons fins, 5 à 8 % en surface) ; il est généralement peu encroûté ;
- un groupement d'ombrage (IV), en dehors des dépressions. Ce groupement, localisé sous la couronne des ligneux, occupe environ 7 % de la superficie. Il comprend *Achyranthes argentea, Brachiaria deflexa, Digitaria horizontalis, Commelina forskalaei*, espèces plus mésophiles. Le sol, riche en matière organique, présente une bonne porosité ;
- un groupement très réduit (V), qui forme une frange autour de la zone dénudée des termitières, comprend *Tripogon minimus, Aristida funiculata, Bulbostylis barbata* ;
- un groupement sciaphile des couronnes de mares et de bas-fonds boisés (VI) qui comprend *Diheteropogon hagerupii, Pennisetum pedicellatum, Indigofera astragalina, Hibiscus sidiformis, Ipomoea eriocarpa, Brachiaria ramosa*. Pour ces espèces mésophiles, ce groupement constitue un refuge en zone nord-sahélienne. Le recouvrement global est proche de 100 %. La strate ligneuse, dense, est quasi continue avec, comme espèces principales, *Grewia bicolor, Guiera senegalensis, Acacia senegal* et quelques arbres, tel *Sclerocarya birrea*, qui atteignent ou dépassent 5 m de haut. Le nombre d'individus par hectare est de 3 499 et il représente une surface terrière de 8,77 $m^2.ha^{-1}$. Le sol est hydromorphe en profondeur ; l'horizon de surface est riche en matière organique et il présente une bonne porosité liée à l'enracinement et à la microfaune ;
- un groupement des surfaces non boisées et non inondées de bas-fond (VII) qui comprend *Panicum laetum, Aristida adscensionis, Digitaria argilacea, Zornia glochidiata, Indigofera secundiflora* ;

- un groupement de zones temporairement inondées (VIII) avec *Panicum walense, Echinochloa colona, Aeschynomene indica, Cyperus* spp. Le sol est hydromorphe dès la surface ; en saison sèche, il présente de nombreuses fentes de retrait. L'ensemble des groupements VI à VIII représente 5 % de la surface.

Cette organisation spatiale de la végétation se répète de façon constante d'une séquence à l'autre, avec cependant des fluctuations interannuelles dans les limites de répartition des groupements herbacés.

ÉTUDE DU BILAN HYDRIQUE DU SOL

Au niveau de la brousse tigrée

De 1983 à 1986, le suivi de l'humidité du sol a été réalisé (DELHOUME, 1988 ; CORNET *et al.*, 1988) le long d'un transect orienté dans le sens de la pente et qui recoupait perpendiculairement une bande de végétation. Des tubes d'accès d'humidimètre neutronique ont été implantés dans les zones caractéristiques :

- zone dénudée amont ;
- zone pionnière (I) ;
- à différents niveaux de la bande de végétation :
    - amont (II),
    - partie médiane (III),
    - partie aval (IV).

Les mesures ont été réalisées tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 120 cm, environ tous les dix jours en période humide et mensuellement en saison sèche. Afin de déterminer l'importance du ruissellement, qui n'a pas pu être mesuré directement, des mesures d'humidité du sol ont été réalisées à différentes reprises, avant et après averses, pour connaître les quantités infiltrées dans chaque site.

Le stock d'eau du sol est calculé à partir de l'humidité pondérale et de la densité apparente sèche mesurée. Or, le sol est argileux, avec une prédominance d'argiles smectiques, lesquelles lui confèrent des propriétés d'expansion et de rétraction en fonction de sa teneur en eau. Une étude (DELHOUME, 1988) réalisée sur des sols très voisins montre que «globalement, tous niveaux confondus, la densité apparente du matériau argileux passe de 1,4 à 1,7 lorsque l'humidité pondérale du sol varie de 30 à 5 %». D'une manière générale, on surestime le stock hydrique en utilisant la densité apparente sèche pour le calcul, et cela d'autant plus que l'humidité du sol est plus élevée. Ces résultats nous amènent à considérer les valeurs obtenues dans la présente étude comme relatives, mais ils ne modifient en rien les conclusions quant au type de fonctionnement.

Nous avons simulé le bilan hydrique des sols aux divers niveaux de la séquence en utilisant une version simplifiée du modèle Bijou (CORNET, 1981 ; CORNET et RAMBAL, 1981). Le modèle est basé sur la relation de récurrence suivante, qui traduit la conservation de l'eau dans une couche de sol :

$$RSJ = RSj\text{-}1 + Pj - Rj - Dj - ETRj$$

dans laquelle :
RSj = la réserve du sol le jour j en mm ;
Pj = les précipitations pour la même date ;
Rj = les pertes ou les apports par ruissellement ;
Dj = les pertes par drainage ;
ETRj = les pertes par évapotranspiration.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle est effectué dans le modèle à partir de la relation empirique de EAGLEMAN (1971), qui prend en compte les valeurs de l'ETP calculée (ETP Penmann), du recouvrement de la végétation et de l'humidité relative du sol. L'absence de mesure ne permet pas de connaître le ruissellement pour chaque site. Nous considérons, à la suite des travaux de DELHOUME (1988), que toute pluie inférieure ou égale à 4 mm ne ruisselle pas. Pour chaque site, l'ETR étant calculée, nous recherchons pas à pas une valeur de Rj telle que la valeur du stock d'eau calculée sur l'ensemble du profil soit égale à la valeur mesurée. Le drainage en dessous de 120 cm n'a été observé qu'une fois, en un seul site, nous le considérons donc comme négligeable à l'exception de ce site.

RÉSULTATS

Le tableau I montre l'étude de la recharge en eau du sol pour 5 épisodes pluvieux caractéristiques et pour 5 positions dans la séquence. On note que la profondeur humectée est toujours très faible dans les zones dénudées amont et aval, alors quelle est importante sous la bande de végétation. Les quantités d'eau accumulées dans les zones dénudées ne représentent que 10 à 27 % de la pluie incidente et 60 à 150 % dans la zone pionnière. C'est la partie amont de la bande de végétation qui accumule le plus d'eau, entre 170 et 530 % de la lame d'eau incidente. Dans ces chiffres, il n'est pas tenu compte des pertes par évapotranspiration entre les mesures, cependant, leur prise en compte ne viendrait que renforcer les différences. Les valeurs supérieures à 100 % indiquent qu'un apport d'eau par ruissellement contribue à la constitution des réserves. Le ruissellement dans les zones dénudées représente 70 à 90 % des précipitations. Cette eau est arrêtée au niveau de l'arc de végétation où elle s'infiltre.

Les figures 2A et B montrent la répartition de l'humidité des sols au travers de la bande de végétation par la représentation des lignes isoplèthes de teneur en eau. En 1984, (fig. 2A) les situations représentées correspondent à 3 séries de mesures qui encadrent un épisode pluvieux :

- le 26 juin avant la pluie ;
- le 7 juillet après 33,2 mm de pluie en 3 jours ;
- le 14 juillet après une semaine de dessèchement.

En 1985, (fig. 2A) le 6 mars correspond à la pleine saison sèche et le 19 août se situe en période humide, après une pluie de 50,2 mm le 16 août.

On constate une double hétérogénéité dans la répartition de l'humidité du sol :

- d'une part une discontinuité liée à l'existence de la bande de végétation qui joue par ses caractéristiques physiques (obstacle à l'écoulement) et hydrodynamiques (perméabilité) sur la redistribution de l'eau et son stockage dans le sol ;
- d'autre part la discontinuité texturale qui existe dans le profil vers 60-70 cm entraîne une faible pénétration de l'eau et une grande stabilité des taux d'humidité en profondeur (zone 80-120 cm), excepté à l'amont de la bande de végétation. Cette discontinuité texturale correspond à la transition entre les matériaux superficiels allochtones à texture moyenne et le matériau en place à texture fine (teneur en argile supérieure à 40 %). Toutefois, cette discontinuité ne semble pas suffisante pour entraîner des mouvements latéraux de l'eau dans le sol.

C'est seulement dans la partie supérieure de la bande de végétation que se reconstituent, après les épisodes pluvieux, les réserves en eau du sol. À ce niveau, l'infiltration dépasse la discontinuité texturale, permet le stockage de l'eau en profondeur et parfois un drainage en dessous de 120 cm. Excepté dans l'horizon superficiel, l'humidité du sol est toujours supérieure sous la bande de végétation.

La figure 3 montre, pour une partie de 1984, l'évolution de l'humidité des sols en fonction de la profondeur et du temps pour 3 sites :

Tableau I - Étude de la recharge en eau du sol pour cinq épisodes pluvieux caracteristiques. Les jours sont exprimés en quantièmes. Les valeurs supérieures à 100% indiquent un apport par ruissellement

DATE DES MESURES	160-167	1984 181-189	196-200	1985 132-139	1986 146-148
Intervalle entre les mesures	7 j	8 j	4 j	7 j	2 j
ETP en mm	67,9	43,2	29,2	51,1	12,0
Précipitations en mm (P)	37,7	33,3	7,5	24,7	6,0
A/ ZONE NUE AMONT					
Profondeur humectée en cm	40	20	20	20	20
Variation de stock en mm	6,6	7,1	2,0	2,6	0,9
Variation de stock en % de P	17,5	21,3	26,7	10,5	15,0
B/ ZONE PIONNIÈRE					
Profondeur humectée en cm	40	40	20	20	40
Variation de stock en mm	23,2	30,2	6,3	15,1	9,5
Variation de stock en % de P	61,5	90,7	84,0	61,1	158,3
C/PARTIE AMONT DE LA BANDE					
Profondeur humectée en cm	80	40	20	80	60
Variation de stock en mm	81,2	60,0	13,2	66,6	31,8
Variation de stock en % de P	215,4	180,2	176,0	269,6	530,0
E/ PARTIE AVAL DE LA BANDE					
Profondeur humectée en cm	80	40	0	80	60
Variation de stock en mm	62,2	53,9	-1,1	51,8	10,7
Variation de stock en % de P	165,0	161,9		209,7	178,3
F/ ZONE NUE AVAL					
Profondeur humectée en cm	40	20	0	20	20
Variation de stock en mm	10,2	8,8	- 0,9	7,2	2,9
Variation de stock en % de P	27,1	26,4		29,1	48,3

- zone dénudée amont (A) ;
- zone pionnière (B) ;
- partie supérieure de la bande de végétation (C).

On note à nouveau, le rôle de la discontinuité texturale dans le profil, qui entraîne une grande stabilité de l'humidité dans la couche 8O-120 cm pour la zone dénudée et pour la zone pionnière.

Sur la figure 4, pour 1985 (période du 39e au 252e jour), nous avons représenté les précipitations et l'évolution simulée des stocks d'eau du sol dans la zone dénudée amont, et dans la partie supérieure de la bande de végétation. Les points figurés représentent les valeurs mesurées du stock d'eau du sol.

Le tableau II donne, pour cette même période, les valeurs calculées des principaux termes du bilan hydrique. La valeur négative traduit un apport par ruissellement.

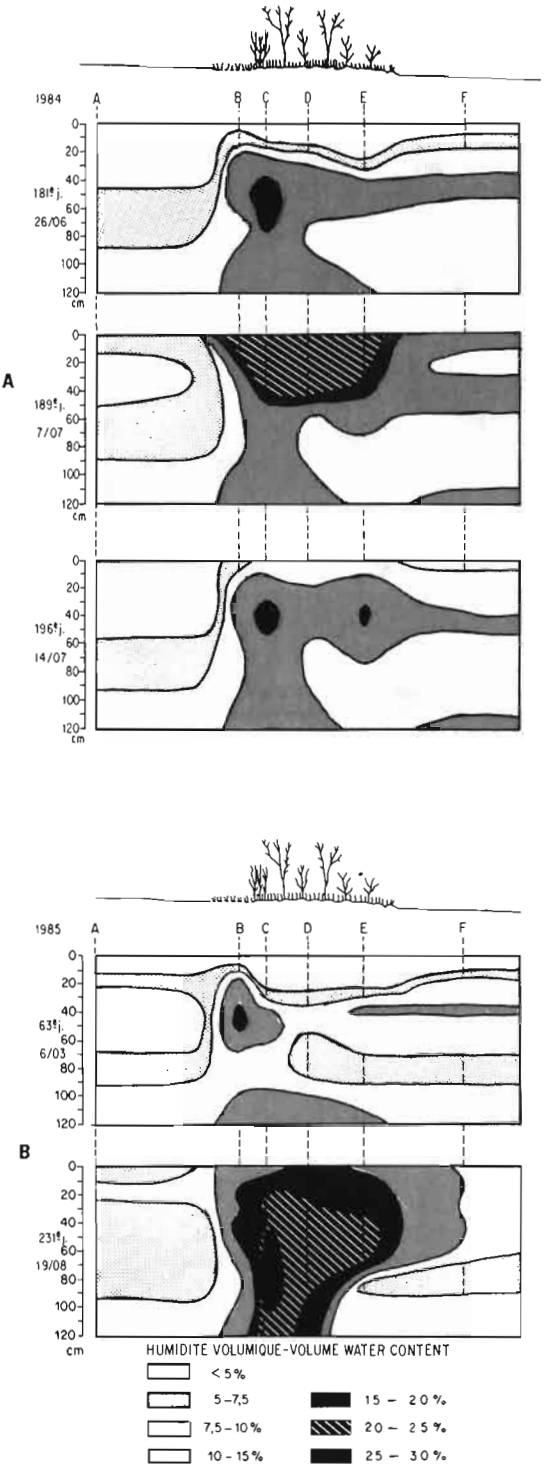


FIGURE 2 - *Répartition de l'humidité des sols, au travers de la bande de végétation (brousse tigrée, MAPIMI). Les figurés représentent les isoteneurs exprimées en % volumique. A à F situent les points permanents de mesure.(2A) représente 3 dates de 1984 : le 26-06, le 7-07 et le 14-07 ; (2B) représente pour 1985, les dates de : le 6-03, au maximum de la saison sèche, et le 19-08, au milieu de la période humide.*

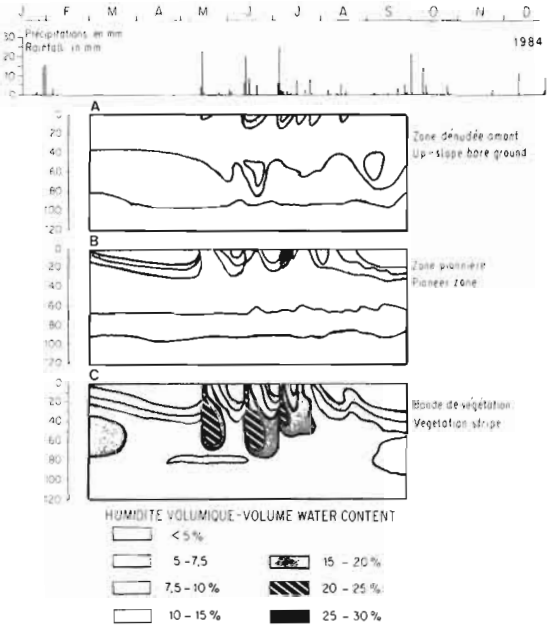


FIGURE 3 - *Évolution de l'humidité du sol à différentes profondeurs, entre mars et septembre 1984 pour : (A) zone dénudée amont, (B) zone pionnière, (C) partie supérieure de la bande de végétation. (Brousse tigrée, MAPIMI).*

Tableau II - Valeurs calculées des principaux termes du bilan hydrique, exprimées en mm, pour la période du 8 février au 9 septembre 1985.

		ZONE DÉNUDÉE	BANDE DE VÉGÉTATION
Précipitations*		227,7	227,7
ETP		1 353	1 353
Stock initial (sur 120cm)*		72,7	106,9
Stock final (sur 120 cm)*		75,2	178,2
ETR	en mm	138,7	654,3
	en % de P	60,9 %	287 %
Ruissellement	en mm	+ 86,5	- 497,9
	en % de P	38 %	219 %

* Valeurs mesurées

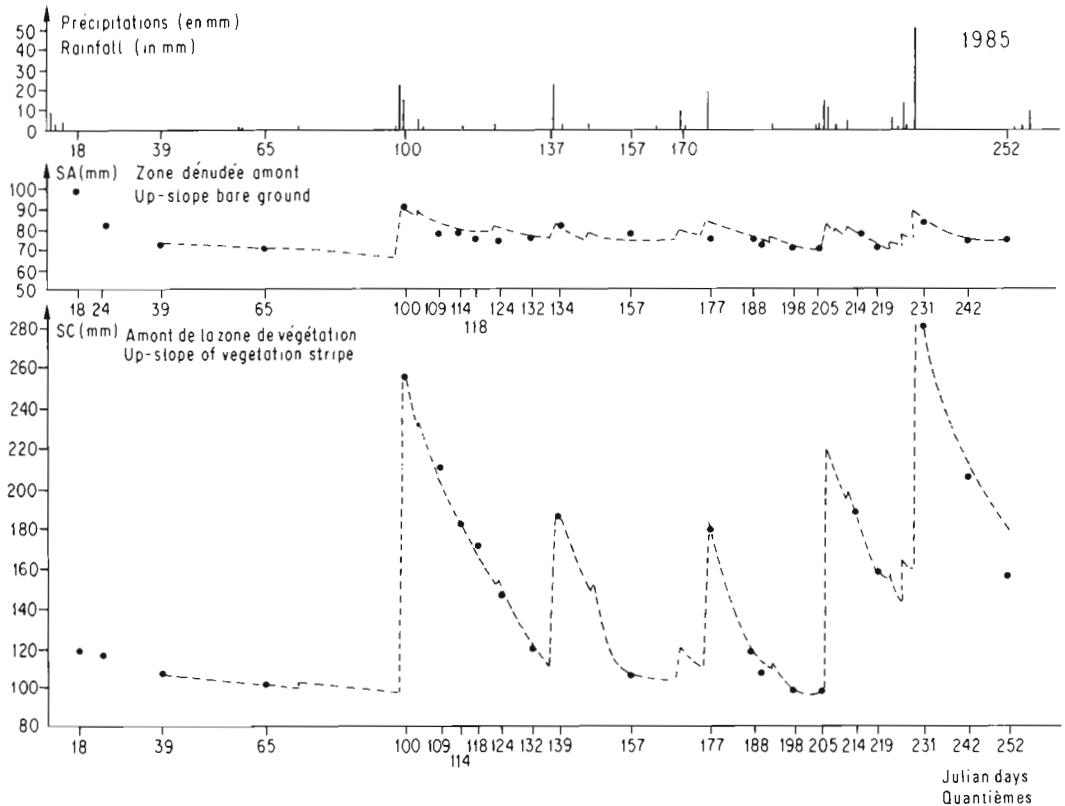


Figure 4 - Évolution simulée des stocks d'eau du sol dans la zone dénudée amont et la partie supérieure de la bande de végétation. Les points figurés représentent les valeurs mesurées. (Brousse tigrée, MAPIMI).

DISCUSSION

La saison des pluies à Mapimi ne constitue pas un phénomène continu, mais elle se présente comme une succession d'épisodes pluvieux toujours séparés par des périodes sèches intercalaires (CORNET, 1987). La dynamique de l'eau, pour cet élément de toposéquence, s'explique par la structure de la végétation et par l'état de surface du sol qui conditionnent le ruissellement et le stockage différentiel de l'eau.

Dans la zone dénudée, l'encroûtement de la surface du sol empêche la pénétration de l'eau en profondeur ; en raison de la faible pente, il se produit un ruissellement en nappe. Le bilan hydrique très défavorable et l'entraînement en saison sèche des semences par le vent empêchent l'installation de la végétation. Ces zones jouent le rôle d'impluvium pour les zones situées plus en aval.

Dans la zone d'arrivée (zone pionnière), la diminution de la pente et la fissuration de la surface du sol ralentissent la lame d'eau ruisselée et favorisent son infiltration. Cette zone bénéficie des apports d'éléments fins et de l'accumulation d'une partie de l'eau ruisselée. Ceci permet le développement d'une végétation d'espèces pionnières, adaptées à des sols riches en éléments fins, qui ont une croissance rapide durant les courtes périodes de bilan hydrique favorable et un fort pouvoir de survie durant les périodes sèches intercalaires. Peu à peu, l'enracinement de ces espèces et leurs apports de matière organique améliorent la porosité du sol et les possibilités d'infiltration. Elles sont progressivement remplacées par des espèces plus exigeantes et par de jeunes ligneux .

L'amont de la bande de végétation constitue un barrage aux flux d'eau de ruissellement. L' infiltration et le stockage de l'eau dans le sol sont favorisés par la porosité des horizons de surface et par la densité d'enracinement. Le stock d'eau du sol permet l'existence d'une période de végétation continue durant la saison humide. L'évapotranspiration correspond à 1,8 à 3 fois la valeur des précipitations. La partie aval de la bande de végétation ne reçoit que très épisodiquement des apports d'eau par ruissellement. La végétation y dispose donc seulement d'une quantité d'eau égale ou à peine supérieure aux précipitations, ce qui conduit, notamment en année sèche, à une diminution de la densité du couvert.

Ce fonctionnement s'accompagne d'une dynamique orientée de la végétation (CORNET *et al.*, 1988) qui correspond à une migration lente des bandes vers l'amont. Le phénomène est irrégulier, tributaire des années à pluviométrie favorable. En l'absence de surexploitation par le pâturage, les formations de brousse tigrée présentent une stabilité remarquable en dépit des périodes de sécheresse (TOUTAIN et DE WISPELAERE, 1979). AMBOUTA (1984) note que les successions d'années sèches ou d'années humides se traduisent par des variations de la largeur des bandes.

Au niveau d'une formation sahélienne sur modelé dunaire

L'humidité des sols a été étudiée de 1975 à 1978 par l'établissement périodique de profils hydriques le long de la toposéquence en dunes, haut de pente, pente, bas de pente et bas-fond. Les prélèvements étaient effectués à la tarière tous les 10 cm, jusqu'à 3 m. Sur chaque site de la toposéquence, 3 points de prélèvement étaient choisis au hasard. L'humidité des échantillons est déterminée par la méthode pondérale. La fréquence des prélèvements est décadaire en saison des pluies et mensuelle en saison sèche.

RÉSULTATS

La figure 5 montre l'analyse de la reconstitution des stocks d'eau pour 3 épisodes pluvieux caractéristiques. Tout d'abord, une averse isolée de début de saison des pluies (3 juillet 1975) de 14,8 mm (fig. 5A). La pluie tombe sur un sol desséché ; l'examen des profils hydriques montre que l'infiltration est comparable pour les 3 sites, dune, pente et bas de pente, l'averse n'a pas ou peu ruisselé. L'humectation pénètre peu profondément ; la lame d'eau stockée un jour après la pluie est faible, 4 à 6 mm. Une forte proportion de la pluie incidente a été perdue par évaporation. Ceci montre le peu d'efficacité, pour la reconstitution des réserves et la végétation, des pluies de faible importance en début de saison.

La figure 5B représente les profils hydriques établis avant et après 3 averses rapprochées, en août 1976 : 37 mm le 14, 27 mm le 16 et 13 mm le 17. On constate que la dune et la pente ont contribué, par ruissellement, à alimenter partiellement le bas de pente. Cependant, le front d'humectation atteint 220 cm en dune et 250 cm en pente. La succession d'averses de moyenne importance a donc permis, malgré le ruissellement, la reconstitution des réserves dans ces 2 sites.

Le troisième épisode (fig. 5C) concerne une période de fortes précipitations de début août 1978 : 93,5 mm le 3, 20 mm le 5 et 30 mm le 7. Les profils établis le 20 juillet et le 10 août montrent une très mauvaise infiltration des pluies en dune et en pente où le front d'humectation atteint seulement 100 cm, et une forte concentration de l'eau en bas de pente et dans la mare temporaire qui est remplie. Le profil établi le 21 août montre l'importance et la rapidité des pertes par évapotranspiration qui affectent les 100 premiers centimètres de sol. En dune et en pente, la partie inférieure des profils a peu évolué. En bas de pente au contraire, on note une augmentation des teneurs en eau entre 120 et 300 cm. En l'absence de pluie importante et de transfert d'eau à partir de l'amont, on assiste donc à une alimentation en eau, en profondeur, du bas de pente à partir du bas-fond.

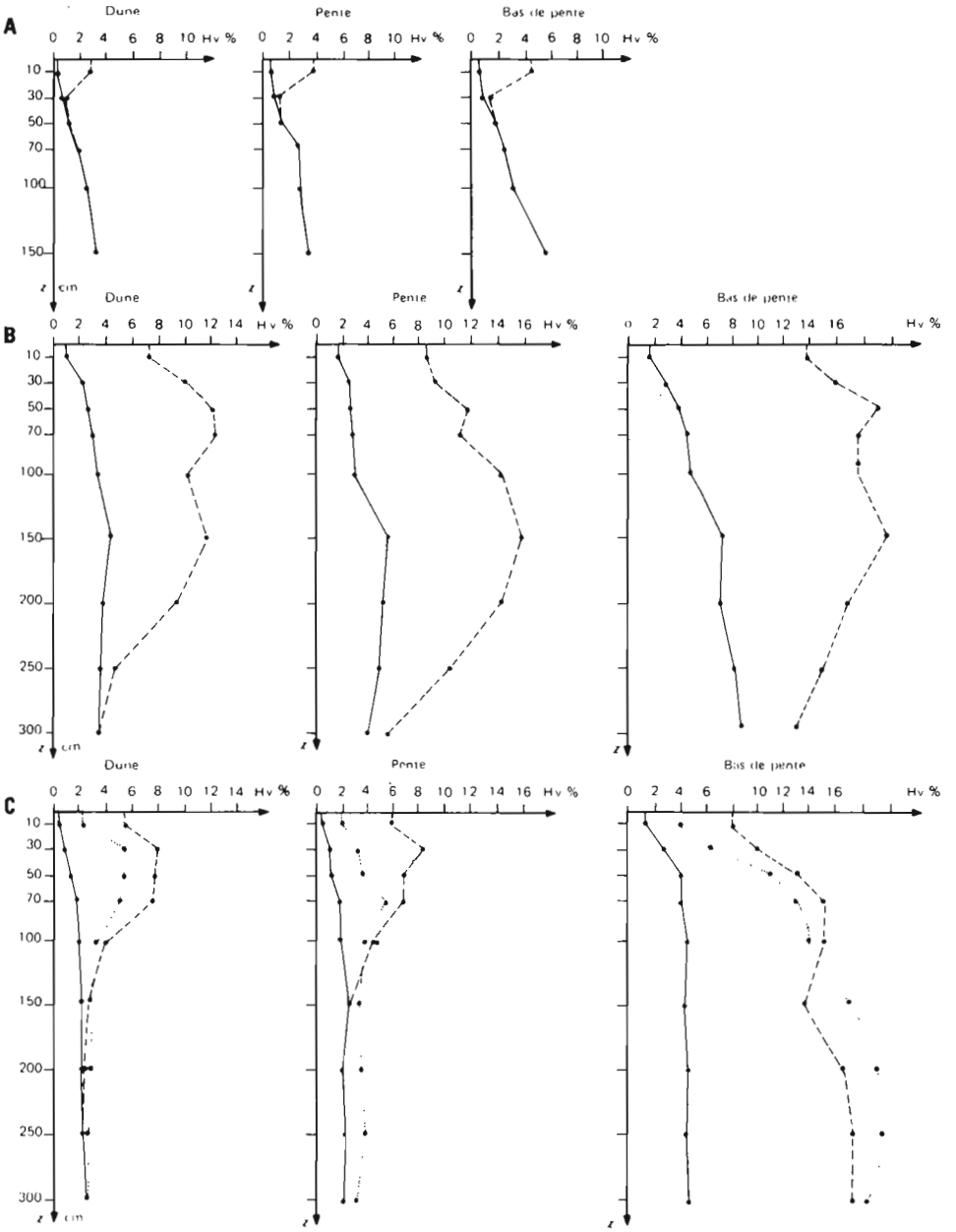
La figure 6 représente la répartition de l'humidité du sol le long de la toposéquence pour 3 dates caractéristiques : début de saison des pluies, fin de saison des pluies et milieu de la saison sèche. On constate une grande hétérogénéité liée à la redistribution superficielle de l'eau.

Le tableau III donne les périodes durant lesquelles l'eau disponible est présente dans le sol pour les différents niveaux de la toposéquence.

Grâce à quelques hypothèses simplificatrices basées sur les observations, nous avons effectué le calcul approché du bilan hydrique pour l'ensemble de la toposéquence. Pour les périodes du 1er juin 1975 au 1er juin 1976, nous avons les résultats suivants :

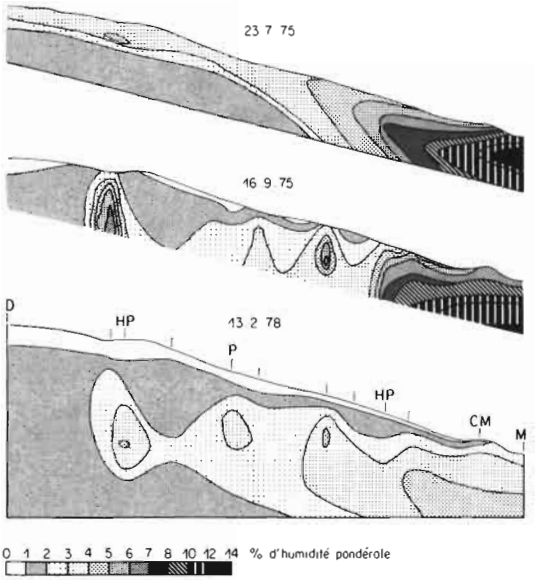
- précipitations = 314,6 mm ;
- ETP calculée = 2 893 mm ;
- ETR replat = 315 mm ;
- ETR pente = 224 mm ;
- ETR bas de pente = 495 mm ;
- drainage bas de pente = 75 mm ;
- ETR + drainage + redistribution en bas-fond = 746 mm.

La figure 7 montre la répartition de la végétation et la représentation des flux d'eau le long de la toposéquence. Les flèches ont une largeur proportionnelle aux flux mesurés en année moyenne. La répartition de la végétation est très liée à la redistribution



(A) pluie le 3-7-75 : 14,8 mm
profils le 27-6 et le 4-7-1975
(B) pluies le 14-8 : 37 mm, le 16-8 : 27 mm, le 17-8-1976 : 13 mm
profils le 3-8 et le 18-8-1976
(C) pluies le 3-8 : 93,5 mm, le 5-8 : 20 mm, le 7-8 : 3O mm, le 5-8-1978 : 5 mm
profils le 20-7, le 10-8 et le 20-8-1978.

FIGURE 5 - *Profils hydriques et reconstitution des réserves en eau du sol pour trois épisodes pluvieux caractéristiques à Fété-Olé.*



D = dune, HP = haut de pente,
P = pente, BP = bas de pente,
CM = couronne de mare,
M = mare temporaire.

FIGURE 6 - *Répartition de l'humidité du sol le long de la toposéquence à Fété-Olé pour trois dates cartactéristiques : début et milieu de la saison des pluies, milieu de la saison sèche. Les figurés représentent les isoteneurs exprimées en % pondéral.*

Tableau III - Périodes durant lesquelles il existe une réserve d'eau disponible dans le sol à Fété-Olé

ZONE CONSIDÉRÉE	ANNÉE	PÉRIODES OÙ RU > 0	PÉRIODES SÈCHES INTERCALAIRES	NOMBRE DE JOURS OU RU > 0
Dunes	1975	03-7 au 05-10	0	94
et	1976	18-7 au 10-10	25-7 au 02-8	76
Pentes	1977	13-8 au 25-09	05-9 au 13-9	35
0-300 cm	1978	11-6 au 05-10	27-6 au 03-8	
		27-8 au 02-09	68	
	1975	03-7 au 31-12	0	181
Bas de pente	1976	18-7 au 20-10	25-7 au 02-8	86
0-100 cm	1977	13-8 au 20-10	0	43
	1978	11-6 au 15-10	27-6 au 03-8	89
	1975	07-7 au 31-12		177
Bas de pente	1976	01-1 au 31-12		366
100-300 cm	1977	01-1 au 01-10	30-1 au 26-8	65
	1978	03-8 au 15-10		73

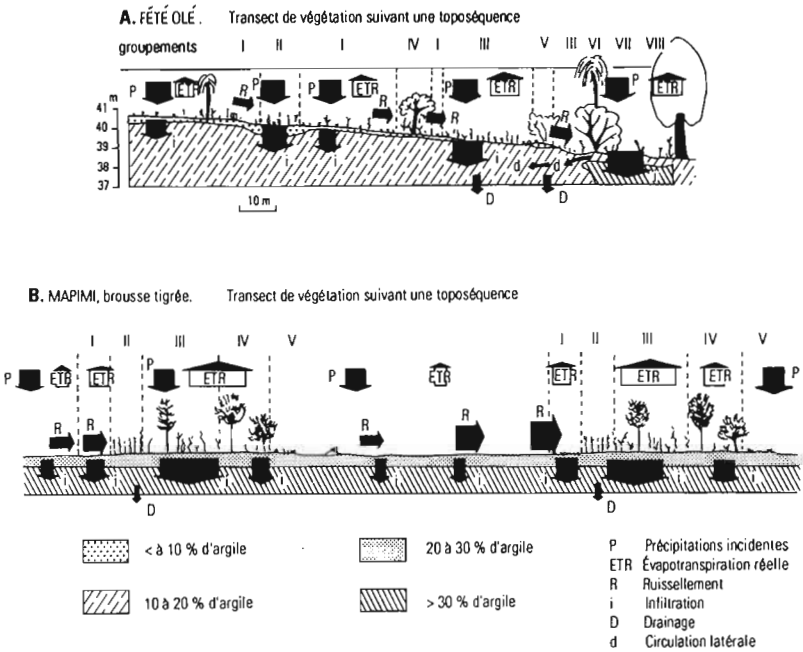


Figure 7 - Représentation de la structure de la végétation et des principaux éléments du bilan hydrique le long de la toposéquence à Fété-Olé (A) et à Mapimi (B). La largeur des flèches est proportionnelle aux valeurs des flux en année moyenne.

superficielle de l'eau, à ceci correspond une végétation de type contracté avec des différences de groupements très marquées ; la richesse floristique est assez importante (122 taxons).

DISCUSSION

De ces différentes observations, il ressort un certain nombre de caractéristiques générales du régime hydrique des sols à Fété-Olé. Tout d'abord, il existe en saison sèche un profil d'équilibre nettement inférieur à l'humidité pF 4,2 sur l'ensemble des sites et très semblable d'une année à l'autre. Par ailleurs, la reconstitution des réserves du sol à une valeur proche de la capacité de rétention est rarement observée en dune et en pente en saison des pluies ; en revanche, elle est fréquente en bas de pente. En dune et en pente, on a une mauvaise pénétration de l'eau, liée à la dispersion des éléments fins en surface et à un encroûtement fréquent, qui favorise le ruissellement. On constate de grandes différences de répartition de l'eau en fonction de la topographie et des états de surface des sols, entraînant un important phénomène de concentration de l'eau vers les bas de pente et les bas-fonds. La durée durant laquelle il existe une réserve d'eau utile en dune et en pente est généralement faible. Elle varie considérablement en fonction des précipitations de l'année et de leur répartition. En bas de pente et en bas-fond, au contraire, quelle que soit l'année, le bilan hydrique est plus favorable, et l'existence de réserve en profondeur est propice au développement des ligneux.

La diminution de la couverture végétale, sous l'action d'années sèches successives ou du surpâturage, entraîne un accroissement de la sensibilité de la surface des sols à

l'action mécanique des pluies, qui conduit à un accroissement des croûtes structurales et des surfaces dénudées. Cette modification de l'état de surface des sols, qui augmente le ruissellement, entraîne ainsi la mort de nombreux ligneux sur les parties hautes de la toposéquence et la diminution du couvert herbacé. Nombre d'espèces annuelles parmi les plus mésophiles vont trouver refuge dans les dépressions. Des successions d'années humides et la mise en défens permettent la reconstitution progressive de la couverture herbacée à partir des microbuttes sableuses. Cette recolonisation des parties hautes est lente, mais elle s'accompagne d'une restauration des propriétés hydrodynamiques des sols. En ce qui concerne les populations ligneuses, l'effet de la sécheresse des années 1972-73 a conduit, en relation avec l'augmentation des phénomènes de ruissellement, à un accroissement des contrastes entre les parties hautes des toposéquences, de plus en plus déboisées, et les dépressions où se forment de véritables fourrés. La comparaison des photographies aériennes de 1955 et de celles de 1978 confirme ce fait pour une grande partie du Ferlo (De Wispelaere, 1980).

DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

En zone aride, les sols sont généralement pauvres en matière organique et peu protégés de l'action des pluies par la couverture végétale peu dense. L'action mécanique des pluies et les alternances humectation - dessèchement conduisent à une désorganisation de la structure des couches superficielles des sols et à la création d'organisations pelliculaires de surface qui diminuent la perméabilité (Valentin, 1985 ; Casenave et Valentin, 1988 ; Escadafal, 1989). Il en résulte un ruissellement important, conditionné essentiellement par l'état de surface du sol et par l'importance de la couverture végétale. Cette dernière est à son tour dépendante des capacités de stockage de l'eau du sol et de la redistribution de l'eau de pluie. L'analyse de la structure spatiale de la végétation dans diverses zones arides a démontré (Yair et Danin, 1980 ; Wierenga *et al.*, 1987) les relations qui existent entre propriétés physiques, états de surface du sol, redistribution de l'eau et répartition de la végétation.

La présente étude nous permet de mettre en évidence, liée aux phénomènes de ruissellement, la grande variabilité spatiale de la disponibilité en eau pour les plantes et ses conséquences sur l'hétérogénéité du couvert et la diversité de fonctionnement des différents éléments de la phytocénose. Les données sur la dynamique de l'eau du sol, couplées avec celles de la structure spatiale de la végétation, montrent qu'il existe des relations fonctionnelles entre elles et qu'il en résulte des équilibres dynamiques locaux entre l'hétérogénéité de la végétation et la redistribution des eaux de pluie le long des versants.

La structure hétérogène de la végétation et la diversité des fonctionnements locaux ont un certain nombre de conséquences sur l'écologie des phytocénoses relativement au maintien de la diversité, à la production primaire, à l'utilisation de l'eau et à la dynamique de la végétation.

L'existence en zone aride de sites bénéficiant d'apport d'eau permet le développement localisé d'espèces plus mésophiles, souvent à la limite de leur aire de distribution. C'est le cas, notament, dans les formations de brousse tigrée de *Viguieria stenoloba, Parthenium incanum* au Mexique (Cornet *et al.*, 1987), ou de *Gardenia sokotensis* et de *Pennisetum pedicellatum* au Niger (Ambouta, 1984). De même, dans les bas-fonds et dans les dépressions de la zone sahélienne, on rencontre *Pennisetum pedicellatum, Diheteropogon hagerupii* et des arbres tels que *Anogeissus leiocarpus* ou *Sterculia setigera* de tendance soudanienne. Lors des périodes de sécheresse prolongée, ces mêmes milieux, qui servent de refuge à un certain nombre d'espèces annuelles, assu-

rent ainsi leur survie et maintiennent l'existence d'un stock semencier qui permettra leur expansion nouvelle au retour de conditions favorables. Ce fut le cas, par exemple, pour *Chloris pilosa* et pour *Panicum laetum* à Fété-Olé, lors de la sécheresse de 1972-73 (BILLE, 1977 ; CORNET, 1981). D'une manière générale, la diversité des conditions de milieu liée à l'hétérogénéité de la distribution des ressources en eau permet la coexistence, dans une même phytocénose, d'espèces de type biologique et d'exigences écologiques divers, ce qui accroît la diversité de la végétation et ses facultés de répondre aux perturbations (OLSWIG-WHITTAKER *et al.*, 1983).

La quantité d'eau disponible pour les plantes conditionne leur production ; celle-ci est corrélée avec la quantité d'eau transpirée (PENNING DE VRIES et DJITEYE, 1982). Selon FISCHER et TURNER (1978), la redistribution de l'eau et sa concentration, dans des zones où la perméabilité est bonne et le couvert végétal important, conduisent à une augmentation de l'efficience de son utilisation. En effet, le couvert végétal et la litière protègent l'eau du sol de l'évaporation directe et le rapport transpiration/évapotranspiration est augmenté. Ainsi le microrelief, à travers le ruissellement et l'accumulation d'eau, peut augmenter la production globale de prairies méditerranéennes à annuelles en réduisant l'évaporation du sol (EVENARI *et al.*, 1971 ; *in* FISCHER et TURNER, 1978)

LE HOUÉROU *et al.* (1988) soulignent l'effet de la redistribution spatiale de l'eau sur la variabilité de la production primaire. Dans les sites où il y a accumulation d'eau par ruissellement, la variabilité de la production serait en général plus faible que la variabilité des pluies. À Fété-Olé, les données de BILLE (1977), pour la période 1969-1975, montrent que, pour un coefficient de variation (CV) des précipitations annuelles de 52,4 %, le CV de la production herbacée aérienne est respectivement de 66,2 % en dune et de 44,9 % en bas-fond. En revanche, HIERNAUX (1984), au Mali, pour la période 1976-1983, avec un CV des précipitations de 36 % obtient des CV de production de 45,1 % en dune et de 61,7 % en bas-fond.

L'hétérogénéité du couvert végétal et sa structure en mosaïque de taches sont sous la dépendance de 3 catégories de facteurs :

- les contraintes microenvironnementales, liées à l'hétérogénéité de distribution des variables du milieu, par exemple les disponibilités hydriques ;
- les processus biologiques tels que dispersion des semences, dynamique des populations, compétition, etc. (WATT, 1947) ;
- les perturbations naturelles ou anthropiques.

La figure 8 donne une représentation simplifiée des relations entre les processus qui déterminent la redistribution de l'eau et la dynamique de la végétation.

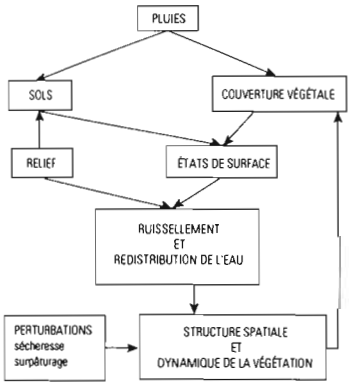


FIGURE 8 - *Schéma simplifié des relations entre les processus qui déterminent la redistribution de l'eau et la dynamique de la végétation dans les phytocénoses des zones arides.*

En fonction de la distribution spatiale des variables environnementales et, notamment, de l'eau disponible, la dynamique du couvert végétal dans les zones étudiées se présente comme la résultante de la dynamique particulière des différents éléments de la mosaïque, par exemple : avancée de la zone pionnière en brousse tigrée, dynamique des microbutes sableuses enherbées en dune ou envahissement des bas-fonds par les ligneux. On n'a pas une formation en équilibre stable, mais une mosaïque de taches de dimensions différentes, à des stades évolutifs variables, qui tendent localement à un équilibre avec leur microenvironnement. Cependant, si les évolutions sont différentes en divers points de l'espace, il existe des corrélations entre elles, liées au contrôle à une autre échelle des flux d'eau, de matière et d'espèces entre les différents éléments de la mosaïque. La compréhension des phénomènes au niveau de ce système organisé se fera à partir d'une approche hiérarchisée (URBAN *et al.*, 1987 ; LEFEUVRE et BARNAUD, 1988). DI CASTRI *et al.* (1988) soulignent le rôle des écotones sur la régulation des flux au niveau du paysage. Une nouvelle approche de la dynamique de ces phytocénoses nécessite la prise en compte de la structure spatiale de la végétation et des variables du milieu, et une analyse hiérarchique qui conduit à la définition d'espaces fonctionnels hétérogènes.

A. CORNET : *phytoécologiste,*
ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

BIBLIOGRAPHIE

AMBOUTA (K.), 1984. - Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest Nigérien. Thèse doc. ing. Univ. Nancy-I, 116 p.

BARBEY (C.-H.) et COUTE (A.), 1976. - Croûtes à cyanophycées sur les dunes du sahel mauritanien. *Bull. IFAN*, 38, A, 4.

BILLE (J.-C.), 1977. - Etude de la production primaire d'un écosystème sahélien. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 65, 82 p.

BILLE (J.-C.), LEPAGE (M.), MOREL (G.) et POUPON (H.), 1972. - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : Présentation de la région. *La Terre et la Vie*, 26 : 333-350.

BOURLIÈRE (F.), 1978. - La savane sahélienne de Fété Olé, Sénégal. In Problèmes d'écologie: structures et fonctionnement des écosystèmes terrestres. Masson éd., Paris : 187-229.

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1988. - Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. Rapport scientifique CEE, ORSTOM, Paris, 202 p.

CORNET (A.), 1981. - Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse doc. ing. USTL Montpellier, 353 p.

CORNET (A.), 1987. - Principales caractéristiques climatiques de la Réserve de la Biosphère de Mapimi. *In* Montana C. (Editeur) Estudio integrado de los recursos vegetacion, suelos y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimi. I - Ambiente natural y humano.Instituto de Ecologia, Mexico : 45-76.

CORNET (A.) et POUPON (H.), 1978. - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. *Bull. IFAN*, 39, A, 2 : 241-302.

CORNET (A.) et RAMBAL (S.), 1981. - Simulation de l'utilisation de l'eau par une phytocénose de la zone sahélienne au Sénégal. Test de deux modèles. Actes du colloque Informatique et Biosphère, Paris : 156-179.

CORNET (A.), DELHOUME (J.-P.) et MONTANA (C.), 1987. - Vegetation patterns and soils in the Mapimi Bolson (Chihuahuan Desert, Mexico). I-Vegetation arcs. Contributed papers of the Second symposium on resources of the Chihuahuan desert region, ALPINE, Texas,20-23 oct.1983, series of the CDRI 13, 18 p.

CORNET (A.), DELHOUME (J.-P.) et MONTANA (C.), 1988. - Dynamics of striped vegetation patterns and water balance in the Chihuahuan Desert .In Diversity and pattern in plant communities Ed. H. J. During, M. J. A. Werger and J. H.Willems SPB Academic Publishing ; The Hague. The Netherlands : 221-231.

CORRELL (D. S.) et JOHNSTON (M. C.), 1979. - Manual of the vascular plants of Texas. Univ. of Texas at Dallas, 1881 p.

DELHOUME (J.-P.), 1987. - Distribution spatiale des sols le long d'une toposéquence représentative de la Réserve de la Biosphère de Mapimi. *In* Montana C. (Editeur) Estudio integrado de los recursos vegetacion, suelos y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimi. I -Ambiente natural y humano. Instituto de Ecologia, Mexico : 135-167.

DELHOUME (J.-P.), 1988. - Contribution à l'étude des relations eau-sol-végétation en zone aride du nord du Mexique. Rapport scientifique ATP Piren CNRS, ORSTOM, Inra, Cirad. 38 p. *multigr.*

DE WISPELAERE (G.), 1980. - Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais. *Cah. ORSTOM, Sér. Sc. Hum.*, vol. XVII, 3-4 : 155-166.

DI CASTRI (F.), HANSEN (A. J.) et HOLLAND (M. M.), 1988. - A new look at ecotones. *Biology International, Special issue* n° 17, IUBS Paris, 163 p.

DULIEU (D.), GASTON (A.) et DARLEY (J.), 1977. - La dégradation des pâturages de la région de N'Djamena (République du Tchad) en relation avec la présence de cyanophycées psamophiles. Étude préliminaire. *Rev. Élev. Méd. Vét. Pays Trop.*, 30, 2 : 181-190.

EAGLEMAN (J. R.), 1971. - An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorology*, 8 : 385-394.

ESCADAFAL (R.), 1989. - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. *Études et Thèses,* ORSTOM, Paris, 317 p.

EVENARI (M.), SHANAN (L.) et TADMOR (N.), 1971. - The negev : The challenge of a desert. Cambridge, Mass. Harvard Univ. Press 345 p. (*In* Fischer and Turner, 1978).

FAO-UNESCO, 1974. - Soils map of the World, 1/5 000 000 vol. I Legende Unesco Paris, 59 p.

FISCHER (R. A.) et TURNER (N. C.), 1978. - Plant productivity in the arid and semi-arid zones. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 29 : 277-317.

HEMMING (C. F.), 1965. - Vegetation arcs in Somaliland. *J. of Ecology*, 53 : 57-68.

HIERNAUX (P.), 1984. - Distribution des pluies et production herbacée : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Document de programme N° AZ 98 Cipea Bamako, 46 p.

LEBRUN (J.), 1973. - Énumération des plantes vasculaires du Sénégal. IEMVT, Maisons-Alfort, *Étude Bot.* 2, 209 p.

LEFEUVRE (J.-C.) et BARNAUD (G.), 1988. - Ecologie du paysage: mythe ou réalité ? *Bull. Écol.*, 19, 4 : 493-522.

LE HOUÉROU (H.-N.), BINGHAM (R. L.) et SKERBEK (W.), 1988. - Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands. *J. of Arid Environments*, 15 : 1-18.

LEPRUN (J.-C.), 1971. - Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental. *Ass. Sén. Et. Quatern. Ouest Afr., Bull. Liaison*, 31 : 69-78.

OLSWIG-WHITTAKER (L.), SHACHAK (M.) et YAIR (A.), 1983. - Vegetation patterns related to environmental factors in a Negev Desert watershed. *Vegetatio* , 54 : 153-165.

PENNING DE VRIES (W. T.) et DJITEYE (M. A.), 1982. - La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. *Centre for Agric. Publ. and Doc.*,Wageningen, 525 p.

POUPON (H.), 1980. - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 115, 351 p.

RZEDOWSKI (J.), 1981. - Vegetacion de Mexico. Ed. Limusa Mexico, 432 p.

SCHMIDT (R. H. Jr.), 1979. - A climate delineation of the real Chihuahuan Desert . *J. of Arid Environments*, 2 : 243-250.

TOUTAIN (B.) et DE WISPELAERE (G.), 1979. - Étude de l'évolution des paysages pastoraux du nord de la Haute-Volta. *In* Paturages de l'ORD du Sahel et de la zone de délestage au nord-est de Fada N'Gourma. *Études Agropastorales* N°51 T. III IEMVT Maisons-Alfort.

UNESCO, 1977. - Carte de la répartition mondiale des régions arides. *Notes Techniques du Mab*, Unesco, Paris, 55 p.

URBAN (L. D.), O'NEILL, (R. V.) and SHUGART (H. H.), Jr., 1987. - Landscape ecology. A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *Bioscience*, 37, 2 : 119-127.

VALENTIN (C.), 1981. - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez, Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. *Études et Thèses*, ORSTOM, Paris , 259 p.

VALENTIN (C.), 1985. - Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the sahelian zone. In Soil erosion and conservation, Soil conservation Society of America edit. : 51-65.

WATT (A. S.), 1947. - Pattern and process in the plant community. *J. Ecol.*, 35 : 1-22.

WHITE (L. P.), 1970. - «Brousse tigrée» patterns in southern Niger. *J. of Ecology*, 58 : 549-553.

WIERENGA (P. J.), HENDRICKX (J. M. H.), NASH (M. H.), LUDWIG (J.) et DAUGHERTY (L. A.), 1987. - Variation of soil and vegetation with distance along a transect in the Chihuahuan Desert. *J. of Arid Environments*, 13 : 53-63.

WORRAL (G. A.), 1959. - The Butana grass patterns. *J. of Soil Science*, 10 : 34-53.

YAIR (A.) et DANIN (A.), 1980. - Spatial variations in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, Northern Negev, Israel. *Oecologia* (Berl.), 47 : 83-88.

Michel GROUZIS

Germination et établissement des plantes annuelles sahéliennes

INTRODUCTION

Le Sahel est une zone aride et semi-aride qui s'étend au sud du Sahara entre les isohyètes 100 et 600 mm. Large de 400 à 600 km, cette frange du continent africain s'étire, de l'océan Atlantique à l'ouest, à la mer Rouge à l'est, sur une longueur de l'ordre de 5 000 km. Cette région est caractérisée par des conditions spécifiques d'aridité qui se manifestent par une longue saison sèche (neuf à dix mois), une forte intensité de l'évaporation, une faiblesse des précipitations et une forte variabilité de la répartition spatio-temporelle des pluies (LE HOUÉROU, 1989). À ces conditions d'aridité climatique, s'ajoutent des conditions d'aridité édaphique liées au ruissellement intense et à la précarité des réserves en eau du sol.

La végétation, qui se présente physionomiquement sous la forme de savanes à épineux, est constituée d'une strate herbacée annuelle et d'une strate arbustive plus ou moins lâche. Thérophytes et phanérophytes, les 2 types biologiques qui traduisent la meilleure adaptation aux sévères conditions d'aridité du milieu, représentent respectivement 50 à 80 % et 10 à 20 % des taxons.

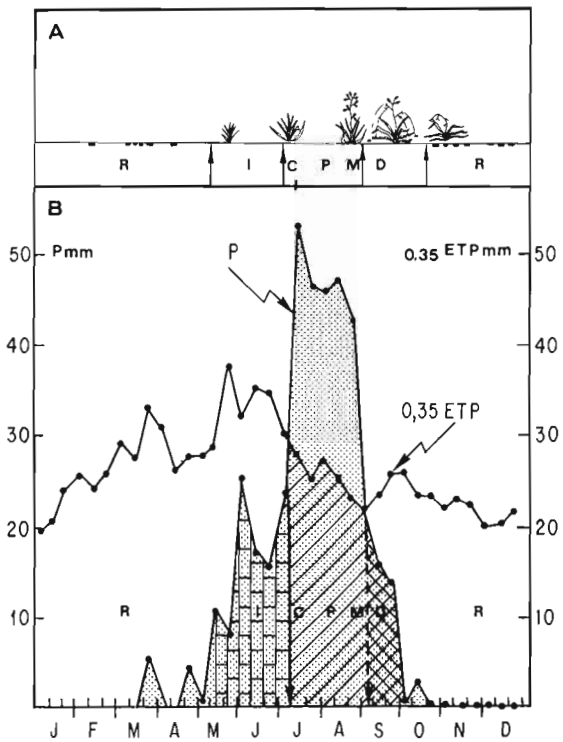
Les travaux réalisés sur la structure et sur le fonctionnement des systèmes écologiques sahéliens (BILLE, 1977 ; CORNET, 1981 ; PENNING DE VRIES et DJITEYE, 1982 ; BARRAL *et al.*, 1983 ; GROUZIS, 1988a) ont mis en évidence la grande variabilité interannuelle de la structure spécifique et de la production de la végétation herbacée. Cependant, les mécanismes mis en jeu restent imparfaitement établis. Certains auteurs (TOUTAIN et PIOT, 1980 ; GASTON, 1983 ; PEYRE DE FABRÈGUES et DALIBARD, 1990) privilégient l'influence du rythme des précipitations du début de la saison des pluies. D'autres mettent aussi l'accent sur les propriétés intrinsèques des semences (GRANIER et CABANIS, 1974 ; BREMAN *et al.*, 1980 ; BOUDET, *in* BARRAL *et al.*, 1983 ; GROUZIS *et al.*, 1986). Un certain nombre d'observations *in situ* (GASTON, 1976 ; BILLE, 1977 ; GROUZIS, 1979 ; CORNET, 1981 ; CISSÉ, 1986 ; N'DIAYE, 1986 ; CARRIERE, 1989 ; SEGHIERI, 1990) et en conditions expérimentales (MIEGE et TCHOUMÉ, 1963 ; GROUZIS *et al.*, 1986 ; GROUZIS, 1988a ; ELBERSE et BREMAN 1989 ; etc.) ont été conduites dans différents secteurs sahéliens pour analyser ces fluctuations. Les nombreux résultats sont difficilement généralisables, d'une part en raison des conditions spécifiques à chaque secteur du domaine sahélien telles que climat, flore, systèmes d'exploitation, d'autre part en raison de l'insuffisance des investigations sur certains aspects de la dynamique de la végétation sahélienne tels que stock semencier, transport et consommation des diaspores et compétition entre plantules (CARRIERE, 1989).

Après avoir replacé les étapes du cycle végétatif dans leur contexte climatique et défini un modèle de la mise en place du peuplement herbacé, nous nous proposons d'établir un bilan des connaissances sur la dynamique interannuelle de la végétation herbacée en milieu sahélien.

LE CYCLE VÉGÉTATIF DANS LE CONTEXTE CLIMATIQUE

Le régime climatique au Sahel est déterminé par les oscillations annuelles du front intertropical (FIT) qui représente la zone de contact de la masse d'air sec continental du nord-est (harmattan) et de la masse d'air humide du sud-ouest (mousson). Le passage du FIT à la latitude de la station d'Oursi (Burkina Faso), choisie comme exemple (fig. 1 [B]), s'effectue généralement au mois de mai et son retour vers le sud au mois de septembre, ce qui détermine une saison des pluies de quatre à cinq mois, sujette à de fortes irrégularités. La longue saison sèche s'installe dès le mois d'octobre. La période pluvieuse peut être divisée en 3 phases (fig. 1 [B]).

La première est la phase d'établissement du couvert herbacé (phase I). En théorie, elle débute avec des averses qui atteignent 10 à 20 mm. En effet, aussi bien en conditions contrôlées (SEGHIERI, 1990) qu'en conditions naturelles (CISSÉ, 1986), il a été démontré qu'un délai de deux jours est nécessaire pour faire apparaître des levées. Si l'on considère que l'évaporation est de 6 à 8 mm.j^{-1} à cette époque de l'année, cela correspond à une pluie de 12 à 16 mm (CHEVALLIER *et al.*, 1985). Cette période peut être considérée comme achevée lorsque les précipitations deviennent supérieures au



Saison des pluies

Saison sèche

I : phase d'installation : pluies discontinues ;
C : phase de croissance, de production et de maturation : pluies régulières ;
D : phase de dissémination et de dégénérescence ;
R : phase de repos.

FIGURE 1 - *Cycle végétatif (A) et bilan hydrique climatique (B) à la mare d'Oursi (Burkina Faso). Moyennes annuelles (1976-1981) de la pluviométrie (P) et de l'ETP Penman décadaires à la station climatologique de Jalafanka (14° 37' de latitude nord, 0° 29' de longitude ouest ; altitude 310 m).*

tiers environ (0,35) de l'évapotranspiration potentielle (ETP), limite qui correspond à l'évaporation d'un sol nu, et au-delà de laquelle toute l'eau est utilisable pour la croissance des végétaux (LE HOUÉROU et POPOV, 1981). Cette phase, qui s'étend de la mi-mai à la première décade de juillet pour la zone de référence, est généralement caractérisée par des précipitations irrégulières, séparées par des séquences sèches plus ou moins longues, au cours desquelles toutes les plantules issues d'une cohorte peuvent brutalement sécher et disparaître.

La seconde phase de végétation active (CPM, fig. 1, [A] et [B]) ou de croissance continue (CISSÉ, 1986) correspond à une période où les pluies sont suffisamment régulières et rapprochées pour permettre la croissance des végétaux sans qu'il y ait épuisement de la réserve hydrique du sol. Au cours de cette phase, les plantes croissent, fleurissent et fructifient.

La dernière phase (de la première décade de septembre à la deuxième décade d'octobre, période D, fig. 1, [A] et [B]) correspond à la diminution de la fréquence et de l'intensité des pluies. Il en résulte un épuisement progressif de la réserve hydrique du sol. C'est la phase de dessèchement des végétaux et de dissémination des diaspores. Les plantes passent alors la saison défavorable à l'état de semences (période R, fig. 1, [A] et [B]).

LE MODÈLE DE LA MISE EN PLACE DU PEUPLEMENT HERBACÉ EN MILIEU SAHÉLIEN

Les peuplements herbacés sahéliens sont donc largement dominés par les thérophytes. Cette caractéristique confère à la semence un rôle capital puisqu'elle constitue le seul lien entre 2 cycles végétatifs successifs.

Le premier facteur à prendre en considération dans l'étude de la dynamique de la végétation herbacée annuelle (fig. 2) est donc le stock semencier du début de saison des pluies (stock semencier final). Ce dernier résulte de l'évolution au cours de la saison sèche (R) du stock semencier initial (prélèvement par les consommateurs primaires, redistribution spatiale) ; il représente «la végétation potentielle» dont l'expression (ger-

I : installation ;
C: croissance ;
D : dégénérescence ;
R : repos.

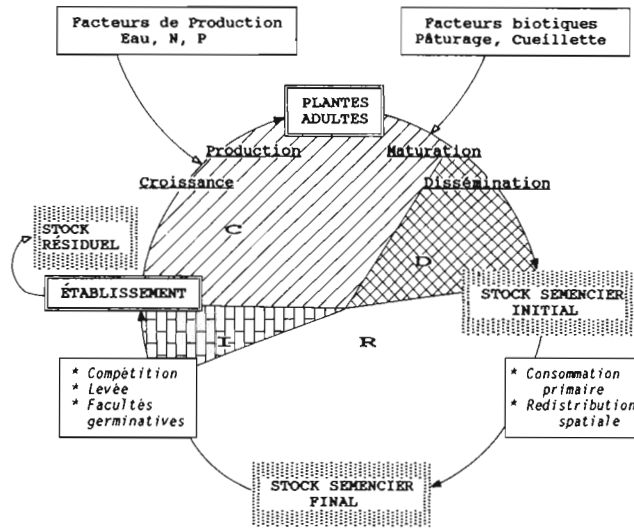


FIGURE 2 - *Modèle de la mise en place du peuplement herbacé (inspiré de CARRIÈRE, 1989)*

mination) est fonction des propriétés germinatives des semences et des caractéristiques des apports hydriques (fréquence et quantité des pluies) au cours de la phase d'établissement. Les pressions de sélection (compétition inter- et intraspécifique, pression des consommateurs primaires) exercées sur les levées successives au cours de la phase d'établissement (I) conduisent à la mise en place de jeunes plantes qui participeront à l'élaboration finale du couvert herbacé au cours de la phase de croissance continue (C). Le stock semencier initial, issu de cette phase de croissance et de production, dépendra, pour l'année considérée, de la qualité des facteurs de production et de l'importance des facteurs biotiques.

Ce sont les divers paramètres de ce modèle et les transformations au cours des périodes de végétation successives qui seront maintenant évalués à la lumière des différents travaux.

DE LA PLANTULE À LA PRODUCTION SEMENCIÈRE INITIALE

Les différentes étapes de cette phase du cycle végétatif, constituées par la croissance, la production, la maturation et la dissémination, prennent place au cours de la saison des pluies (C et D, fig. 1 et 2). Les facteurs qui déterminent la production de semences au cours de cette phase relèvent des facteurs abiotiques (eau, fertilité) et biotiques (pâturage, cueillette). En zone sahélienne, les valeurs de production globale de phytomasse herbacée par millimètre de pluie incidente atteignent 2 à 3 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$ (BILLE, 1977 ; LE HOUÉROU et HOSTE, 1977 ; CORNET, 1981 ; BOUDET, 1984 ; GROUZIS, 1988a ; LE HOUÉROU, 1989). Comme la fraction de production emmagasinée sous forme de graines représente 6 à 30 % de la phytomasse maximale (PENNING DE VRIES et DJITEYE, 1982 ; GROUZIS, 1988a) on peut estimer que la production de graines par millimètre de pluie incidente se situe :

- entre 0,12 et 0,6 $kg.ha^{-1}$ pour la valeur de 2 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$;
- entre 0,18 et 0,9 $kg.ha^{-1}$ pour la valeur de 3 $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$.

La répartition temporelle des pluies intervient également. Des périodes de déficit hydrique au cours de certaines phases critiques (montaison, maturation des semences) peuvent être particulièrement néfastes à la formation et à la production de semences fertiles. Cependant, au-delà d'un certain seuil, l'eau perd son caractère limitant au profit de la fertilité (FLORET et PONTANIER, 1978). PENNING DE VRIES et DJITEYE (1982) ont montré, notamment, que l'azote et le phosphore jouent un rôle déterminant dans la production, en raison de la relative pauvreté des sols sahéliens en ces éléments. CISSÉ (1986) rapporte que la fraction de biomasse investie dans l'appareil reproducteur est plus élevée sous fertilisation.

Au cours de cette phase de croissance et de production, les facteurs biotiques, notamment ceux liés à l'exploitation par les herbivores domestiques, peuvent jouer un rôle déterminant dans la production de semences. Une étude de l'effet du pâturage sur la productivité des herbages sahéliens (GROUZIS, 1988a et b) montre que la phytomasse épigée de parcelles mises en défens est 2 à 3 fois plus élevée que celles de parcelles normalement exploitées par les troupeaux. La production de semences est donc affectée par ce prélèvement, non seulement en quantité mais également en qualité. En effet, certaines espèces, sélectivement consommées avant maturation et dispersion des semences, voient leur potentiel de reproduction diminué. C'est notamment le cas des graminées sur les sols sableux, ainsi que des espèces comme *Aristida adscensionis* L., *Aristida hordeacea* Kunth, *Aeschynomene indica* L., dont la fréquence est significativement plus élevée dans les parcelles protégées que dans les témoins (GROUZIS, 1988a et b). Les activités de cueillette qui se déroulent avant la dispersion des semences contri-

buent également à diminuer le stock semencier de certaines espèces. Ces activités portent sur des produits alimentaires et se caractérisent par des prélèvements sporadiques (*Tribulus terrestris* L., *Cleome gynandra* L., *Cassia obtusifolia* L.) ou par de véritables récoltes (*Cenchrus biflorus* Roxb., *Panicum laetum* Kunth) (BERNUS, 1967 ; GROUZIS, 1988a). À titre d'exemple une personne est susceptible de récolter quotidiennement 3,75 kg de semoule de fonio sauvage, *Panicum laetum* (MILLEVILLE, 1980), ce qui représente environ 3 millions de caryopses sachant que le poids de 1 000 caryopses est de 1 215 mg (GROUZIS, 1988a).

De nombreuses espèces herbacées (*Cenchrus biflorus, Tragus berteronianus* Schult., *Tragus racemosus* (L.) All., *Tribulus terrestris, Zornia glochidiata* DC., etc.) possèdent des dispositifs (soies rigides spinescentes à denticules rétrorses, soies étalées, etc.) qui permettent aux semences d'être véhiculées par les animaux. Cependant, l'épizoochorie n'est importante qu'à la fin de la saison des pluies. Si l'endozoochorie est reconnue pour être un système de dissémination courant des ligneux (*Acacia* sp., *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Ziziphus mauritiana* Lam.), il semble que les diaspores des espèces herbacées ne supportent pas le transit intestinal (CARRIÈRE, 1989). Chez *Diheteropogon hagerupii* Hitchc., *Loudetia togoensis* (Pilger) C.E. Hubbard, l'arête permet à la diaspore de pénétrer le sol à la faveur d'une humidification (ELBERSE et BREMAN, 1989). Malgré l'existence de ces divers mécanismes, le vent et l'eau restent cependant les deux grandes forces qui provoquent le déplacement des diaspores (GILLET, 1968).

LES STOCKS SEMENCIERS

3 niveaux de stocks peuvent être distingués au cours du cycle : le stock semencier initial (SSi), le stock semencier final (SSf) et le stock semencier résiduel (SSr).

Le stock semencier initial (SSi)

Les productions semencières de quelques peuplements herbacés sahéliens (tabl. I) révèlent une grande variabilité entre les peuplements et, pour un même peuplement, d'une année sur l'autre. La comparaison de la production grainière à la phytomasse épigée permet d'estimer l'effort de reproduction. Pour les peuplements étudiés par GROUZIS (1979, 1988a) les graines représentent 6 à 31 % de la phytomasse maximale. À l'exception des résultats de BILLE (1977), ces proportions se rapprochent de celles observées par les autres auteurs. Tout comme les autres, les espèces annuelles sahéliennes, dérivent donc une part importante des photosynthétats dans la formation de graines.

La caractérisation des modalités de transformation semences/plantules au cours du cycle nécessite de raisonner en termes d'effectifs et non plus de masse. Au Burkina Faso, la production potentielle de semences, évaluée sur la base du nombre de fleurs, s'élève à 60 000/73 000 semences.m^{-2} pour 2 faciès à *Panicum laetum* (GROUZIS, 1988a). La production au sol de ces mêmes unités de végétation chute à 8 000/12 000 semences.m^{-2}. Au Tchad, GASTON (1976) rapporte des productions au sol de 20 000 à 120 000 semences.m^{-2}. CISSÉ (1986), en déterminant des densités au sol qui vont de 7 000 à 84 000 semences.m^{-2} sur les unités établies sur sables et des effectifs qui vont de 4 700 à 9 800 semences.m^{-2} sur les unités situées sur des sols argileux, indique ainsi que les densités varient avec la texture du sol. Dans la région de Kaedi, en Mauritanie, les densités moyennes observées par CARRIÈRE (1989) varient de 17 490 semences.m^{-2}, pour les épandages sableux à *Alysicarpus ovalifolius* (Schum. et Thonn.) J. Léon., à

Tableau I - Production semencière de quelques peuplements herbacés sahéliens (moyenne ± intervalle de confiance p = 0,05)

PAYS	PRODUCTION SEMENCIÈRE g.m^{-2}	FRACTION PHYTOMASSE MAX.	AUTEURS
Tchad Maltam	20,6 (1973) à 223,8 (1975)	25 à 40 %	GASTON (1976)
Sénégal Ferlo	1,4 à 13	3 %	BILLE (1977)
Burkina Faso Oursi	Unités : Semences : Graines		
	Cep : 147,5 ± 23,9 : 53,1 ± 8,6	31 %	GROUZIS (1979)
	Ams : 47,9 ± 9,4 : 20,1 ± 3,9	11 %	
	Ase : 16,4 ± 4,6 : 6,9 ± 1,9	11 %	
	Sgr : 7,7 ± 2,2 : 4,3 ± 1,2	6 %	
	Sgl : 12,2 ± 3 : 6,8 ± 1,7	8 %	
	Spt : : 9,5 à 14,6	8 à 9,4 %	(1988)a
Sénégal Centre	Zone boisée 26,2 (1978) à 23,9 (1979) Zone déboisée 35,7 (1978) à 26,6 (1979)		KAHLEM (1981)
Mali Centre nord	estimé à partir du nombre de graines par plante	6 à 16 % maximum à 31 %	PENNING DE VRIES et DJITEYE (1982)

175 890 semences.m^{-2}, pour les microcuvettes à *Panicum laetum*. Par ailleurs, cet auteur rapporte que les densités de semences décroissent rapidement avec la profondeur et que les profils de distribution conservent la même allure au cours de la saison sèche. Ces résultats révèlent une forte variabilité en fonction de l'état de surface du sol, du substrat édaphique, de l'unité de végétation et de l'année. À ces fluctuations liées aux facteurs du milieu s'ajoutent des variations dues aux méthodes de dénombrement qui peuvent être directes (BILLE, 1977 ; GROUZIS, 1988a) ou indirectes, comme la méthode des plantules émergentes (LE DOEUNFF, 1976) ou la méthode de corrélation effectif/biomasse (CISSÉ, 1986). Dans l'état actuel des recherches, il est donc difficile d'établir des normes relatives au stock des semences des sols en région sahélienne. Les réserves de début de saison sèche varient entre 10^4 et 10^5 semences.m^{-2} (CARRIÈRE, 1989).

Le stock semencier final (SSf)

Le stock semencier final (SSf) résulte de l'évolution au cours de la saison sèche du stock semencier initial (SSi). Il s'exprime par les relations suivantes :

$$SSf = SSi - C + R \quad (1)$$

$$R = I - E \quad (2)$$

dans lesquelles C représente la consommation primaire, R la redistribution spatiale, c'est-à-dire le bilan entre les apports (I) et les pertes (E). Ces déplacements de semences sont essentiellement dus à la déflation éolienne.

Globalement, on assiste à une réduction extrêmement marquée des réserves au cours de la saison sèche. Au Tchad, GASTON (1976) ne recense plus que 2 000 semences.m^{-2} à l'issue de la saison sèche alors que les densités enregistrées après la saison des pluies atteignaient 20 000 à 120 000 semences.m^{-2}. En Mauritanie, les pertes représentent un tiers à deux tiers des stocks initiaux et peuvent atteindre 90 % dans les microcuvettes (CARRIÈRE, 1989).

Bien que les auteurs s'accordent pour admettre le rôle des consommateurs primaires dans l'évolution globale du stock semencier, les avis sont partagés pour ce qui concerne la fraction consommée par les oiseaux, les rongeurs et les insectes divers. Pour LEPAGE (1972) et BILLE (1977), ce prélèvement s'élève au tiers environ du stock initial. Pour CARRIÈRE (1989), les déprédations causées par la faune peuvent intéresser jusqu'aux deux tiers des réserves. Ces valeurs diffèrent relativement de celles de Bourlière (1978), 10 %, et de celles de Noy-Meir (1980), 50 à 90 %, pour d'autres zones arides.

Les vents continentaux du nord-est, qui dominent d'octobre à mai, participent activement au brassage des réserves du sol, notamment dans les zones fortement piétinées par les troupeaux.

Le stock semencier résiduel (SSr)

C'est le stock semencier qui subsiste du cycle antérieur après l'établissement de la végétation (E), augmenté des quelques apports dus au ruissellement (I). Il s'exprime par la relation :

$$SSr = SSf + R \qquad (3)$$

CISSÉ (1986) atteste que le stock semencier résiduel représente 1 à 5 % du stock semencier initial. Cette quantité est faible mais, d'après cet auteur, elle est équivalente aux germinations efficaces, c'est-à-dire aux levées qui se maintiennent. Ce fait est confirmé par CARRIÈRE (1989). En effet, entre la reconstitution annuelle du stock semencier du sol et son utilisation pour la mise en place du peuplement herbacé au cours de la saison des pluies, la diminution des densités de semences représente 79 à 96 % des réserves du début de saison sèche. Les réserves résiduelles atteignent en moyenne, pour l'ensemble des unités étudiées, 12 500 semences.m^{-2}. Les flux semenciers, qui s'effectuent au cours de la saison des pluies grâce au ruissellement (1 400 à 18 985 semences pour *Schoenefeldia gracilis* Kunth, par exemple), varient en fonction de l'espèce et de la quantité des précipitations pendant la période considérée (CARRIÈRE, 1989). Ce déplacement de diaspores peut donc modifier sensiblement la nature du stock semencier et son expression au cours du cycle ultérieur.

L'ÉTABLISSEMENT

Les déterminants de l'établissement des annuelles sahéliennes se réfèrent :

- aux caractéristiques intrinsèques des semences notamment à leurs propriétés germinatives ;
- aux conditions écologiques qui prévalent au moment des levées ;
- aux phénomènes de concurrence qui s'établissent entre plantules au cours de la période de pluies irrégulières.

Les propriétés germinatives des semences

Les taux de viabilité (pourcentage de semences morphologiquement entières et théoriquement fertiles), établis par GROUZIS (1988a) par observation directe sur une dizaine d'espèces, sont relativement élevés pour la majorité des graminées (70 à 90 %). Chez les papilionacées, ces taux sont moins importants (*Zornia glochidiata*, 45 %). Ces valeurs sont confirmées par ELBERSE et BREMAN (1989) qui, en utilisant le test au tetrazolium, trouvent des taux au moins supérieurs à 50 % pour la trentaine d'espèces analysées.

Ces semences sahéliennes conservent d'ailleurs leur fertilité durant plusieurs années. Les tests de germination en fonction de la durée de conservation indiquent que la durée de vie des semences est généralement supérieure à l'année et que certaines d'entres elles (*Schoenefeldia gracilis, Zornia glochidiata, Aeschynomene indica*, etc.) ont une durée de vie de trois à quatre ans, tout au moins dans nos conditions de conservation : environ 30 °C, faible humidité atmosphérique, semences protégées par leurs téguments (GROUZIS, 1988a). Des durées de vie de quinze ans ont été observées chez certaines espèces ligneuses du genre *Acacia* (NONGONIERMA, 1978).

À quelques exceptions près comme *Aristida adscensionis* (GROUZIS, 1988a), *Chloris prieurii* (ELBERSE et BREMAN, 1989), *Pennisetum americanum* (ROUSSEL, 1978), le pouvoir germinatif des semences nouvellement disséminées, morphologiquement mûres et placées dans des conditions de température et d'humidité favorables à la germination, reste faible (0 à 20 %).

L'application aux semences d'un certain nombre de prétraitements tels que scarification, eau bouillante, acide sulfurique, chaleur sèche en continue et/ou en alternance, lavage (GRANIER et CABANIS, 1974 ; LEGRAND, 1979 ; GROUZIS, 1988a ; ELBERSE et BREMAN, 1989) permet d'améliorer significativement leurs capacités et leurs vitesses de germination en levant les barrières physiques, chimiques et physiologiques à la germination.

Ainsi la scarification, la dénudation des semences et leur traitement à la chaleur sèche, pendant une semaine, favorisent très nettement la germination de *Aristida mutabilis*, de *Panicum laetum* et de *Schoenefeldia gracilis*. Chez les légumineuses, la scarification et l'immersion des semences dans l'acide sulfurique augmentent et activent la germination (LEGRAND, 1979 ; GROUZIS *et al.*, 1986 ; GROUZIS, 1988a). ELBERSE et BREMAN (1989) montrent que la scarification augmente la capacité de germination de plus de 50 % des 30 espèces étudiées, tandis que le meilleur résultat est obtenu avec un lavage pendant 24 heures chez *Schoenefeldia gracilis* et chez *Eragrostis tremula*, ce qui suggère ainsi la présence de substances inhibitrices dans les glumelles de ces espèces. Ces résultats révèlent l'existence, chez un bon nombre de semences d'espèces sahéliennes, d'une inhibition de la germination due à l'imperméabilité des enveloppes séminales (péricarpes, téguments, glumelles des graminées). Cette inhibition exogène est facilement levée par tout prétraitement qui vise à diminuer la résistance des téguments.

Pour caractériser la levée de ces diverses inhibitions en milieu naturel, les variations mensuelles, au cours de la saison sèche, de la capacité de germination d'une dizaine d'espèces ont été suivies (GROUZIS, 1988a). À l'exception de *Panicum laetum*, une augmentation sensible de la capacité de germination des semences est enregistrée au cours de cette période. D'octobre à mai, la capacité de germination de *Zornia glochidiata*, par exemple, passe de 12 % à 90 %. Au cours de cette période, l'accroissement de la capacité de germination des caryopses nus de certaines espèces (*Cenchrus biflorus, Schoenefeldia gracilis*) suggère par ailleurs l'existence d'une dormance (absence de germination due à l'embryon) qui vient s'ajouter à l'inhibition exogène exercée par les glumelles. Les semences subissent donc au cours de la saison sèche une postmaturation. Cette maturation physiologique se produit postérieurement à la maturation morphologique qui est la phase d'élaboration des éléments constitutifs de la semence. Elle correspond à la levée d'une inhibition exogène (téguments, glumelles) et d'une dor-

mance pour certaines espèces. Cette levée est à mettre en relation soit avec l'apparition de fortes chaleurs (*Cenchrus biflorus*), soit avec de grosses averses (*Alysicarpus ovalifolius*), soit encore avec des alternances de phases sèches et de phases humides (GROUZIS, 1988a).

Il est d'ailleurs remarquable de noter que cette postmaturation peut aussi se manifester à l'échelle pluriannuelle. C'est notamment le cas de *Schoenefeldia gracilis*, qui voit sa capacité de germination augmenter (GROUZIS, 1988a) au fil des ans et se maintenir à plus de 93 % après douze années de conservation à la température du laboratoire (ELBERSE et BREMAN, 1989).

Des différences de comportement liées à l'hétérogénéité des semences ont été signalées par différents auteurs dans les régions qui subissent de fortes fluctuations des conditions écologiques (MAURYA et AMBASHT 1972 ; BASKIN et BASKIN, 1976 ; OLIVIERI et BERGER, 1985 ; GROUZIS *et al.*, 1986). C'est le cas notamment de *Aeschynomene indica*, de *Alysicarpus ovalifolius*, de *Cenchrus biflorus* et de *Tribulus terrestis*, dont les capacités de germination varient en fonction des types morphologiques de graines, la postmaturation ne se manifestant pas également pour ces différentes semences (GROUZIS, 1988a). De telles différences de comportement ne sont pas exceptionnelles et sont interprétées comme une stratégie d'adaptation à la pluviométrie erratique des régions désertiques (HARLAN *et al.*, 1973). Le suivi des variations saisonnières de la capacité de germination des gros et petits caryopses contenus dans le glomérule de *Cenchrus biflorus* permet d'illustrer ce type de comportement. Les grands caryopses atteignent une capacité de germination de 75 % dès le mois de janvier alors qu'il faut attendre le mois de juillet pour que les petits caryopses offrent les mêmes caractéristiques. Cette aptitude à germer précocement permet aux grandes semences de profiter des premières averses et d'occuper rapidement l'espace, ce qui facilite la compétition avec les autres taxons. En revanche, les petites semences germent tardivement et assurent la pérennité de la population en cas de déroulement très défavorable de la saison des pluies.

Les caractéristiques de la levée

C'est la quantité de pluies et son rythme qui constituent le stimulus de la levée des plantules. Dans ses études sur l'écologie des plantes désertiques, WENT (1955, 1979) rapporte que les annuelles ne germent que pour des pluies supérieures à 10-15 mm. Pour CORNET (1981), les conditions de levées dans les sols sableux des milieux sahéliens correspondent à des précipitations supérieures à 20 mm, ou bien à une pluie supérieure à 10 mm, suivie d'une deuxième décade qui comporte au moins 10 mm de pluie. Des résultats comparables sont donnés par PENNING DE VRIES et DJITEYE (1982). Dans la région de Niono, au Mali, CISSÉ (1986) note que 14 mm de pluie provoquent une levée, tandis que BOUDET (1986), dans la région de Kaedi en Mauritanie, montre que 10 mm de pluie suffisent à permettre la levée des semences. MC KEON *et al.*, (1985), en étudiant les populations de *Stylosanthes humilis* K. L. B. et de *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koel., montrent que la majorité des vagues de levées succède aux épisodes pluvieux de 10 à 20 mm. L'ensemble de ces résultats confirme que la quantité de pluie nécessaire à la levée doit compenser l'évapotranspiration du délai de germination qui, dans ces contrées, s'élève généralement à deux jours (CISSÉ, 1986 ; CARRIÈRE, 1989 ; SEGHIERI, 1990). Tout comme BEATLEY (1974) dans le désert de Chihuahua, il y a lieu de distinguer la quantité de pluie nécessaire à la levée, celle qui assure l'établissement des plantules et, *a fortiori*, celle qui permet la réalisation du cycle de vie des plantes.

Les variations, au cours du temps, de la densité de plantules, de la pluviométrie et de l'humidité de surface du sol d'une unité de végétation établie sur un piémont sableux au niveau de la mare d'Oursi, au Burkina Faso (fig. 3), vont nous permettre de

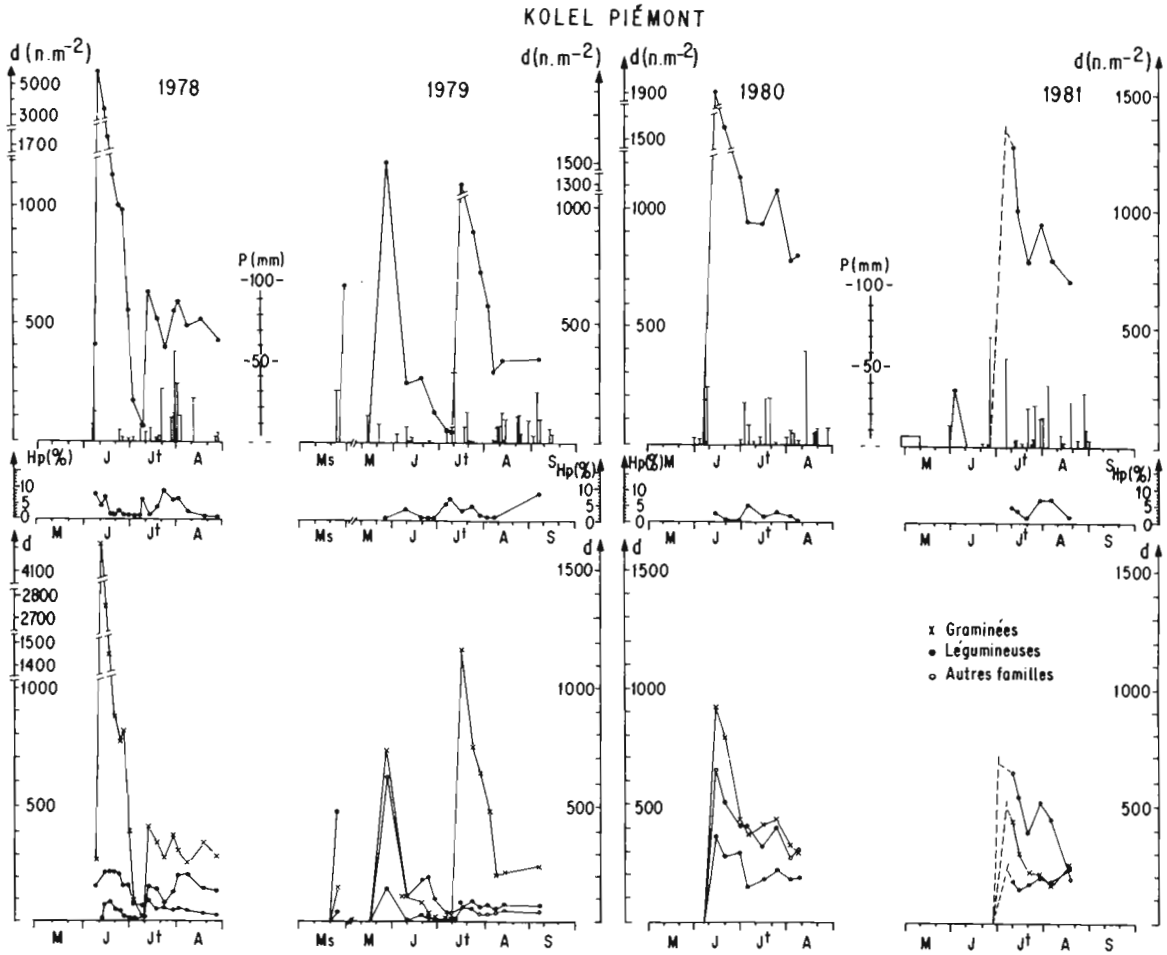


FIGURE 3 - *Évolution saisonnière de la densité de plantules (d) en relation avec la pluviosité journalière (P) et l'humidité de surface du sol (Hp). Groupement à* Cenchrus biflorus, Alysicarpus ovalifolius, Aristida mutabilis, Tribulus terrestris *sur sol sableux de piémont (mare d'Oursi, Burkina Faso).*

relever certaines caractéristiques de l'établissement en milieu sahélien. L'examen de la répartition pluviométrique des différentes années d'observation permet de distinguer les années 1978 et 1979 des années 1980 et 1981. Les 2 premières sont caractérisées par des pluies de début de saison peu abondantes (environ 30 mm) et des périodes de net déficit en eau. Si l'on ne tient pas compte de la première averse de 1981, trop isolée et vite évaporée, les années 1980 et 1981 présentent aussi des périodes sans précipitation (deuxième et troisième décades de juin, par exemple) ; cependant, le déficit en eau se manifeste peu au niveau de la végétation, car les pluies abondantes du début de saison (60 à 70 mm) permettent de satisfaire les pertes par évaporation.

Il apparaît qu'une douzaine de millimètres (11,8 mm) suffisent à provoquer une levée, mais les plantules issues de ces levées précoces (mars à mai), qui correspondent généralement à des événements pluvieux isolés, ne se maintiennent pas.

Cette levée s'effectue à la faveur de pluies qui amènent l'humidité de surface du sol à des taux de l'ordre de 6 à 9 %. La mortalité des plantules correspond aux périodes sans pluie pendant lesquelles l'humidité du sol s'abaisse à 0,5 %. Dans les sols lourds de bas-fond, 25 mm de pluie, qui correspondent à des humidités de surface de sol de 10 à 15 %, sont en moyenne nécessaires pour provoquer la levée (Grouzis, 1988a). En effet, il faut une plus grande quantité d'eau pour combler le déficit hydrique plus élevé de ce type de sol constitué par des argiles gonflantes.

La phase d'établissement se caractérise donc par des vagues successives de levées, très étroitement liées à chaque épisode pluvieux et à l'accroissement de l'humidité du sol. Ainsi, on en dénombre 2, 3 et 2, respectivement en 1978, en 1979 et en 1981 (fig. 3). Ces cohortes traduisent notamment :

- l'hétérogénéité des facteurs du milieu, distribution des averses, microvariations du substrat, qui engendrent des conditions hydriques différentes pour une même quantité de pluie tombée ;
- l'hétérogénéité de la position des semences dans le sol ; les premières plantules correspondent généralement à des semences enfouies, tandis que celles qui s'accumulent en surface germent plus tardivement. Ce caractère peut s'expliquer par le fait que les diaspores enfouies ne subissent pas de fortes variations de l'humidité. Elles peuvent aussi correspondre à des semences du cycle précédent plus aptes à germer ;
- l'hétérogénéité des semences ; les différents types morphologiques de semences d'un même taxon présentent des aptitudes différentes à la germination.

Ce n'est qu'au terme de ces fluctuations, qui se situent généralement dans la première décade de juillet, pour l'exemple choisi, que la végétation peut être considérée comme définitivement installée. Pour les 5 années observées, il est alors tombé en moyenne 70 mm de pluie, ce qui représente 20 % des précipitations annuelles. Des valeurs semblables ont été établies pour les sols lourds (Grouzis, 1988a).

Le nombre total de plantules ayant levé au cours du cycle de végétation (somme algébrique des densités maximales et minimales relatives à chaque flux) s'élève à 5 664 plantules.m^{-2}, en 1978, et à seulement 1 502 plantules.m^{-2}, en 1981, pour l'unité sur sables (fig. 3). Dans les bas-fonds argileux, le total annuel des levées est de 3 610 plantules.m^{-2} en moyenne, avec une amplitude de variation qui va de 2 427 plantules.m^{-2}, en 1979, à 4 726 plantules.m^{-2}, en 1978 (Grouzis, 1988a). Pour les 2 types de sols, le total annuel s'élève en moyenne à 3 500 plantules.m^{-2}, ce qui est comparable aux résultats de Carrière (1989) et correspond à des taux de germination (nombre de plantules/nombre de semences) de 0,4 à 25 % des réserves du sol, suivant les espèces.

Taux de survie. Phénomènes de concurrence

L'importante réduction de la densité de plantules au cours du temps suggère qu'une sévère sélection s'exerce sur les jeunes plantules sous l'action des contraintes hydriques. Dans notre exemple de la figure 3, le nombre des plantules qui atteignent le stade adulte ne représente que 8 à 10 % du nombre total de levées. En revanche, lorsque la levée résulte d'une pluie abondante, le niveau de stabilisation est plus élevée : 42 % en 1981. Sur les sols lourds, la quantité de plantules installées représente en moyenne 34 % du total des levées enregistrées au cours du cycle. Les valeurs sont assez variables selon les auteurs. CISSÉ (1986) rapporte des pourcentages qui vont de 33 à 50 % sur les sols sableux. Pour CARRIÈRE (1989), la proportion de plantules qui survivent varie selon les faciès de végétation étudiés, mais se situe en moyenne à 10 % du nombre de plantules recensées à la première pluie, ce qui explique son niveau relativement bas. À titre de comparaison, le pourcentage d'établissement des annuelles d'une steppe à *Artemisia herba-alba,* en Tunisie, varie de 0 à 16 % (D'HERBÈS, 1980). Ces taux de survie varient en général selon les espèces. Sur la figure 3, il apparaît que les espèces graminéennes ont en général une mortalité supérieure à celles des autres espèces. Les espèces à grosses semences, comme *Tribulus terrestris, Zornia glochidiata, Indigofera senegalensis, Alysicarpus ovalifolius,* présentent une meilleure aptitude à résister à une contrainte hydrique prolongée que les espèces à semences tenues, comme *Dactyloctenium aegyptium, Tragus berteronianus, Schoenefeldia gracilis,* etc. (CARRIÈRE, 1989). Cet auteur confirme d'ailleurs ces phénomènes de concurrence par le fait que l'arrachage systématique des individus au cours des averses successives d'un cycle permet d'obtenir des effectifs de plantules 6 fois plus élevés que dans la parcelle témoin.

Ces différences spécifiques sont à mettre en relation avec des adaptations particulières des espèces. VAN KEULEN, *in* CISSÉ (1986), montre que certaines espèces, comme *Schoenefeldia gracilis, Loudetia togoensis, Diheteropogon hagerupii,* ont des régulations stomatiques très prononcées. SAINT-CLAIR (1976, 1980), PALE (1982), GROUZIS (1988a), en étudiant l'influence des contraintes hydriques simulées par l'utilisation d'agents osmotiques sur la germination, ont montré que les espèces sahéliennes, dans leur grande majorité, germent à des potentiels hydriques très bas (jusqu'à - 2 MPa). Il existe cependant une grande variabilité interspécifique. On distingue :

- les espèces sensibles au stress hydrique telles que *Aristida mutabilis* pour laquelle la germination devient nulle à - 0,8 MPa ;
- les espèces tolérantes au stress telles que *Pennisetum americanum* et *Aeschynomene indica,* capables de germer très convenablement jusqu'à - 1,5 MPa ;
- les espèces intermédiaires telles que *Aristida adscensionis, Zornia glochidiata, Panicum laetum, Cenchrus biflorus,* etc.

Au niveau du peuplement herbacé, ces comportements variés, voire opposés, permettent un meilleur ajustement à la variabilité des conditions écologiques, notamment des événements pluvieux dans la première moitié de la saison des pluies.

BILAN DE LA RECONSTITUTION

L'évaluation des transformations au cours des phases successives du cycle de végétation permet d'établir un bilan de la reconstitution du peuplement herbacé à partir des réserves semencières. Pour BILLE (1977), la mise en place de la végétation annuelle au Sahel s'effectue à partir de 10 % du stock de semences. Des valeurs plus élevées, de 5 à 25 % et de 15 à 23 %, sont avancées respectivement par PENNING DE VRIES et DJITEYE

(1982) et, pour des groupements à *Panicum laetum*, par GROUZIS (1988a). Pour CISSÉ (1986), la germination efficace, c'est-à-dire le rapport du nombre de semences au nombre de plantes établies, varie suivant les unités écologiques :

- de 3 à 10 %, sur sables ;
- de 2 à 26 %, sur les limons ;
- de 13 à 46 %, dans les dépressions argileuses.

Pour CARRIÈRE (1989), l'établissement se fait à partir de 0,1 à 1 % du stock semencier de fin de saison sèche. Si l'on retient les transformations établies par cet auteur, il apparaît que 22 000 plantules.m^{-2} environ sont nécessaires au début de la saison des pluies pour garantir une bonne densité finale, ce qui représente au départ environ 66 000 semences. Sur la base de nos propres estimations, 11 000 semences sont nécessaires pour obtenir des densités finales de l'ordre de 100 individus.m^{-2}. Ces différentes observations permettent de conclure que, dans tous les cas, les réserves semencières sont largement excédentaires pour garantir un couvert herbacé satisfaisant. Elles peuvent cependant être trop limitées pour assurer la mise en place du couvert au cours de deux années successives dans l'hypothèse d'une année à production de semences nulle.

CONCLUSION

Les peuplements herbacés sahéliens sont largement dominés par les espèces annuelles. La reconstitution de la végétation, les variations interannuelles de la composition floristique et de la production dépendent étroitement de la production de semences et de leurs facultés germinatives. Elles reposent également sur les phénomènes de résistance au déficit hydrique et de compétition qui se déroulent au cours de l'établissement. Le bilan des transformations successives au cours du cycle montre que le stock semencier n'est généralement pas le facteur limitant de la reconstitution du peuplement. Cette caractéristique est favorisée par un certain nombre d'adaptations des espèces végétales aux conditions sahéliennes de semi-aridité. Celles-ci se situent à 2 niveaux :

- l'adaptation à la contrainte sécheresse, effet permanent des conditions d'aridité ;
- l'adaptation au risque sécheresse, c'est-à-dire au caractère aléatoire des conditions édapho-climatiques qui règnent au moment de la phase de levée et d'établissement.

La majorité des espèces passent la longue saison sèche sous forme de diaspores, c'est-à-dire à l'état de vie ralentie. Cela constitue une excellente stratégie d'adaptation aux sévères conditions d'aridité. Par ailleurs, la durée de vie des semences de certaines espèces, qui s'étend sur plusieurs années, permet de surmonter les conditions exceptionnelles de sécheresse.

L'abondante production de semences constitue une bonne adaptation à la forte variabilité de la pluviométrie. Elle permet de faire face aux accidents climatiques en assurant la levée lors des événements pluvieux qui se succèdent au cours de la période de pluies irrégulières.

L'existence de mécanismes physiologiques, inhibition, dormance, postmaturation, évite ou limite les levées dans des conditions très défavorables à l'établissement, telles que pluies tardives à la fin de la saison des pluies (octobre) ou pluies exceptionnelles qui précèdent la saison de végétation (février/mars). Ces mécanismes, qui constituent des stratégies de survie des espèces, permettent d'attendre les meilleures conditions de température et d'humidité.

La tolérance d'un bon nombre d'espèces au stress hydrique au moment de la germination constitue un avantage car elle autorise d'une part l'établissement de ces taxons

dans des zones que les espèces sensibles à la sécheresse ne peuvent pas coloniser et, d'autre part, l'occupation rapide de l'espace. Ce caractère permet également à ces espèces d'être plus compétitives que d'autres qui viendraient s'implanter ultérieurement.

Des réponses variées, voire opposées, ont été observées pour les différents taxons et au niveau des différents faciès de végétation. Ces comportements différents sont interprétés comme la meilleure stratégie adaptative aux caractères aléatoires du milieu. En effet, cette variabilité des comportements intra- et interspécifique permet aux graines de certains taxons de trouver les conditions favorables à leur germination comme à leur établissement et d'assurer ainsi la pérennité du peuplement.

M. GROUZIS : *écologue*, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

BIBLIOGRAPHIE

BARRAL (H.), BENEFICE (E.), BOUDET (G.) et DENIS (J.-P.), 1983. - Système de production d'élevage au sénégal dans la région du Ferlo. ACC GRIZA (LAT). Ministère de la Recherche et de l'Industrie, Gerdat-ORSTOM, 172 p.

BASKIN (J. M.) et BASKIN (C.), 1976. - Germination dimorphism in *Heterotheca subaxillaris* var. *subaxillaris* . *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, vol. 103, 5 : 201-206.

BEATLEY (J. C.), 1974. - Phenological events and their environmental triggers in Mojave desert ecosystems. *Ecology*, 55 : 856-863.

BERNUS (E.), 1967. - Cueillette et exploitation des ressources spontanées du Sahel nigérien par les Kel Tamasheq. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. hum.*, vol. IV, n° 1 : 31-52.

BILLE (J.-C.), 1977. - Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 65, 81 p.

BOUDET (G.), 1983. - L'agropastoralisme en Mauritanie ; perspectives de recherches. IEMVT, Maisons-Alfort, *Rapp. multigr.*, 46 p.

BOUDET (G.), 1984. - Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel. *Bull. Soc. languedocienne de géographie*, 18, (3-4) : 167-177.

BOUDET (G.), 1986. - Recherches pluridisciplinaires sur les pâturages, leur conservation et l'élevage en République islamique de Mauritanie. *Rapport multigr.*, IEMVT, 61 p.

BOURLIÈRE (F.), 1978. - La savane Sahélienne de Fété Olé, Sénégal, 187-229. In «Problèmes d'Écologie : Structure et fontionnement des écosystèmes terrestres». Masson et Cie Ed., Paris.

BREMAN (H.), CISSÉ (A. M), DJITEYE (M. A.) et ELBERSE (W. TH.), 1980. - Pasture dynamics and forage availability in the sahel. *Is. J. of Botany*, 28 : 227-251.

CARRIÈRE (M.), 1989.- Les communautés végétales sahéliennes en Mauritanie (Région de Kaedi) ; analyse de la reconstitution annuelle du couvert herbacé. Thèse doctorat sciences, université de Paris-Sud, Orsay, 238 p.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. - Pluies et crues au Sahel : hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso 1976-1981). *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 190, 251 p.

CISSÉ (A.), 1986. - Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud sahélienne. PPS, Cabo, 221 p.

CORNET (A.), 1981. - Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse doct. ingénieur, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 353 p.

CORNET (A.) et POUPON (H.), 1978. - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. *Bull. Ifan*, 39, A, 2 : 241-302.

DATTA (S. C.), EVENARI (M.) et GUTTERMAN (Y.), 1970. - The heteroblasty of *Aegilops ovata* L. *Is. J. of Botany*, vol. 19 : 463-483.

D'HERBÈS (J. M.),1980. - Relation entre stock de graines, germination et état de surface du sol dans les friches postculturales en région aride (Médénine, Tunisie). ORSTOM, Tunis, 48 p. *multigr.*

ELBERSE (W. Th.) et BREMAN (H.), 1989. - Germination and establisment of sahelian rangeland species. I. Seed properties, *Oecologia*, 80 : 477-484.

FLORET (Ch.) et PONTANIER (R.), 1978. - Relation climat-sol-végétation dans quelques formations végétales spontanées du Sud tunisien. Production végétale et bilan hydrique des sols. PNUD, ministère Agriculture Tunisie, *Doc. Technique* n° 1, 96 p. + ann.

GASTON (A.), 1976. - Travaux phytoécologiques en relation avec la lutte contre *Quela Quela*. Bilan de quatre années. Rapport final., IEMVT, 203 p., 2 cartes h.-t.

GASTON (A.), 1983. - Le couvert herbacé au Ferlo sénégalais. *In* L. Van Praet éd., «Méthodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens. Application au développement» : 201-208.

GILLET (H.), 1968. - Le peuplement végétal du massif de l'Ennedi (Tchad). *Mém. Mus. hist. nat.*, sér. B, XVII, 206 p.

GRANIER (P.) et CABANIS (Y.), 1974. - Étude de la germination de quelques graminées de savane et de ses rapports avec leur répartition. *Rev. Élev. méd. vét. Pays trop.*, 27 : 363-369.

GROUZIS (M.), 1979. - Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche de formations végétales sahéliennes (mare d'Oursi, Haute-Volta), Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Action complémentaire coordonnée DRGST-ORSTOM, Ouagadougou, 59 p.

GROUZIS (M.), 1988a. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens. *Études et Thèses*, ORSTOM, Paris, 336 p.

GROUZIS (M.), 1988b. - Effects of grazing of plant productivity and rain use efficiency in sahelian grasslands, (Northern Burkina Faso), Third International Rangeland Congress, New Delhi, 10 p.

GROUZIS (M.), LEGRAND (E.) et PALE (F.), 1986. - Germination des semences des régions semi-arides du sahel. Actes du Colloque «Les végétaux en milieu aride» : Tunisie (Jerba) : 534-552.

HARLAN (J. R.), DEWET (J. M. W.) et PRINCE (E. G.), 1973. - Comparative evolution of cereals. *Evolution*, 27 : 311-325.

KAHLEM (G.), 1981. - La végétation de la forêt de Bandia. Évolution des populations végétales et de la production de graines, pendant les années 1978, 1979, 1980. *Bulletin de l'Ifan*, t. 43, sér. A, n°s 3-4, 232 : 253.

LE DOEUNFF (Y.), 1976. - Germination des semences de mauvaises herbes et multiplication végétative. Ve Colloque sur l'Écologie et la Biologie des mauvaises herbes, Columa, Dijon.

LEGRAND (E.), 1979. - Étude expérimentale des propriétés germinatives de quelques plantes sahéliennes. (mare d'Oursi - Haute-Volta). ORSTOM, Ouagadougou, 39 p. *multigr.*

LE HOUÉROU (H.-N.), 1989. - The grazing lands ecosystems of the Africa Sahel. *Ecological studies*, vol. 75 : 270 p.

LE HOUÉROU (H.-N.) et HOSTE (C. H.), 1977. - Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean Basin and in African Sahelo sudanian zone. *Journal of Range Management*, 30, (3) : 181-189.

LE HOUÉROU (H.-N.) et POPOV (G. F.), 1981. - An eco-climatic classification of intertropical Africa. *FAO, Plant production and protection.* Paper n° 31, 40 p. et annexes.

LE PAGE (M.), 1972. - Données préliminaires sur l'écologie des termites. *Terre et vie*, 26, 383 : 409.

MC KEON (G. M.), ROOSE (C. W.), KALMA (J. D.) et TORSSELL (B. W. R.), 1985. - Pasture seed dynamics in a dry monsoonal environment. I. Germination and seedbed environment of *Stylosanthes humilis* and *Digitaria ciliaris*. *Aust. J., Ecol.*, 10 : 135-147.

MAURYA (A. N.) et AMBASHT (R. S.), 1972. - Significance of seed dimorphism in *Alysicarpus monolifer* D.C., *J. Ecol.*, 61 : 213-217.

MIÈGE (J.) et TCHOUMÉ (M.), 1963. - Influence d'arrosages régulièrement répétés sur la germination des graines en saison sèche à Dakar (Sénégal). *Annales facultés sciences Dakar*, t. 9 : 81-109.

MILLEVILLE (P.), 1980. - Étude d'un système agropastoral sahélien de Haute-Volta. 1re partie : le système de culture. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM. Ouagadougou, 64 p. *multigr.*

N'DIAYE (P.), 1986. - Méthode d'observation des diaspores et inventaire des germinations d'herbacées annuelles ; résultats d'études réalisés à Sangalkam (Sénégal). Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens. Fapis, Dakar (3-8 novembre 1986), 18 p.

NONGONIERMA (A.), 1978. - Contribution à l'étude biosystématique du genre *Acacia* Miller (Mimosaceae) en Afrique occidentale. Thèse doctorat État, univ. de Dakar, 307-325.

NOY-MEIR (I.), 1980. - Structure and function of desert ecosystems. *Israel J. of Botany*, 28, 1 : 19.

OLIVIERI (I.) et BERGER (A.), 1985. - Seed dimorphism for dispersal : physiological, genetic and demographical aspects : 413-429. «Genetic differentiation and dispersal in plants», P. Jacquard, G. Heim, J. Antonovics Ed., Nato ASI Series, vol G5, Springer-Verlag, Berlin, 453 p.

PALE (F.), 1982. - Étude expérimentale de la germination des semences sahéliennes. Influence du potentiel hydrique. DEA, université P.-et-M.-Curie, Paris, 33 p.

PENNING DE VRIES (F. W. T.) et DJITEYE, (M. A.), 1982. - La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 525 p.

PEYRE DE FABRÈGUES (B.) et DALIBARD (C.), 1990. - Causes de la régression de certaines plantes herbacées dans la zone pastorale du Niger au cours des dernières années. IEMVT/Cirad, Maisons-Alfort, 63 p. + annexes.

ROUSSEL (D.), 1978. - Recherche sur l'hétérogénéité de la germination des semences du petit mil (*Pennisetum americanum* (L.) K. Schum.). DEA de physiologie végétale, univ. P.-et-M.-Curie, 56 p.

SAINT-CLAIR (P. M.), 1976. - Germination of *Sorghum bicolor* under polyethylene glycol- induced stress. *Can. J., Plant. Sc.*, 56 : 21-24.

SAINT CLAIR (P. M.), 1980. - Germination du mil exposé à la contrainte hydrique développée par le polyéthylène glycol. Comparaison avec le Sorgho grain. *Agron. trop.* XXXV, 2 : 178-182.

SEGHIERI (J.), 1990. - Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne du nord Cameroun, thèse doctorat sciences, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 200 p.

TOUTAIN (B.) et PIOT (J.), 1980. - Mises en défens et possibilitées de régénération des ressources fourragères sahéliennes. Étude expérimentale dans le bassin de la mare d'Oursi (Haute-Volta), IEMVT-CTFT, Maisons-Alfort, 156 p.

WENT (F. W.), 1955. - The ecology of desert plants. *Scientific american*, 192 : 68-75.

WENT (F. W.), 1979. - Germination and seedling behavior of desert plant, 477-489, in «Arid Land ecosystems : structure, functioning and management», vol. 1, D. W. Goodal, R. A. Perry Ed., Cambridge University Press, 881 p.

Jacques POISSONET, Fabienne CHAMBRIS,
Ibrahima TOURÉ

Équilibre et déséquilibre des phytocénoses herbacées sahéliennes

Influence de la pluviosité annuelle et de la proximité des points d'eau

INTRODUCTION

Le système herbacé et son équilibre

La végétation des phytocénoses herbacées est la résultante d'un ensemble complexe d'actions et de réactions. Lorsque le champ des forces qui agissent sur la végétation est constant dans le temps et que les réactions ont atteint un régime régulier, la végétation est dans un état d'équilibre qui se traduit par une structure stable (FORMAN et GODRON, 1986).

Que l'une des pressions qui s'exercent vienne à changer suffisamment et l'équilibre initial est rompu ; après une phase de transition plus ou moins longue, un nouvel équilibre se crée, qui correspond à une autre structure de la végétation (DAGET, 1968 ; POISSONET, 1979).

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE ÉTUDIÉE : LE FERLO SÉNÉGALAIS

Pluviosité

La pluviosité moyenne annuelle sur la période de ces dix dernières années, est voisine de 300 mm, avec une grande variabilité mensuelle et annuelle (fig. 1) pour les années 1983 à 1986.

Principaux types de sols

Sur le plan édaphique, 3 grands ensembles sont à retenir (DIALLO et VALENZA, 1972) :

- les sols squelettiques, superficiels à texture sableuse très grossière, qui couvrent 15 % du territoire ; le recouvrement des herbacées annuelles étant en moyenne inférieur à 50 % ;

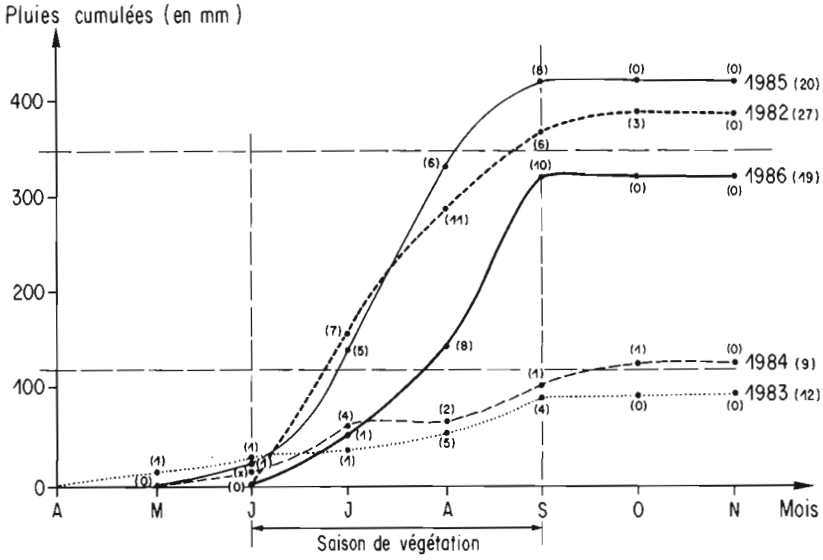


FIGURE 1 - *Pluviosité à Lagbar, 1982 à 1986.*

- les sols des surfaces planes, profonds, sableux légèrement limoneux, qui couvrent 75 % du territoire ; le recouvrement des herbacées annuelles étant généralement supérieur à 75 % ;
- les dépressions aux sols sablo-argilo-limoneux qui couvrent 10 % du territoire et dont le recouvrement des herbacées annuelles est toujours supérieur à 90 %.

Flore et végétation

La flore et la végétation du Ferlo septentrional ont été décrites, étudiées ou suivies par de nombreux chercheurs au cours de ce dernier quart de siècle (VALENZA et FAYOLLE, 1965 ; VALENZA, 1970 ; BILLE et POUPON, 1972 ; BOUDET, 1975 ; VALENZA, 1981 ; GASTON *et al.*, 1983 ; POISSONET *et al.*, 1985 ; VALENZA et TOURÉ, 1986 ; etc.).

Le tableau I donne la liste des espèces rencontrées avec leurs fréquences spécifiques (FS) et leurs contributions spécifiques présences (CSP = quotient de la fréquence [FS] d'une espèce par la somme des fréquences [FS] de toutes les espèces) dans les communautés herbacées sahéliennes situées sur les sols des surfaces planes en 1982, 1985 et 1986, c'est-à-dire les années considérées, à pluviosité supérieure ou égale à la moyenne (POISSONET *et al.*, 1985 ; CHAMBRIS, 1988).

Les actions qui s'exercent sur un milieu donné se traduisent tout d'abord par la présence de taxons végétaux, dont la liste constitue la flore, et les modes d'agencement, la végétation. Chaque taxon est représenté par des individus, qui sont en nombres variables et peuvent avoir des modes de répartition différents selon leur comportement

→

Tableau I - Espèces rencontrées avec leurs fréquences spécifiques (F S) et leurs contributions spécifiques (CSP) en 1982, 1985, 1986 sur les sols des surfaces planes au Ferlo sénégalais (Sahel)
(x : l'espèce est présente dans la station)
(les C S P en italique concernent celles des espèces dites «productrices»)

Pourcentage		Fréquences spécifiques (FS)			Contributions spécifiques (CSP)		
	Années	1982	1985	1986	1982	1985	1986
Espèces							
	Nombre de communautés étudiées	8	6	6	8	6	6
1.	*Cyperus rotundus*	6			3,6		
	Trichoneura mollis	2			1,2		
	Rhynchosia minima	1			0,6		
	Nasaea erecta	0,5			0,3		
	Chloris pilosa	x					
	Cenchrus prieurii	x					
	Hibiscus asper	x					
	Achyranthes argentea	x					
	Colocynthis vulgaris	x					
10.	*Spermacoce stachydea*	2	x		1,2		
	Sesbania polycarpa	x	x				
	Commelina forskalaei	x	x				
	Cassia mimosoïdes	x	x				
	Spermacoce verticillata	x	0,5			0,3	
	Panicum laetum	7		x	*4,2*		
	Ceratotheca sesamoïdes	x		1			0,6
	Schoenefeldia gracilis	15	2	2	*9,0*	1,1	1,3
	Eragrostis tremula	8	5	x	*4,8*	2,7	
	Aristida mutabilis	21	9	4	*12,5*	*4,9*	2,5
20.	*Dactyloctenium aegyptium*	21	26	4	*12,5*	*14,0*	
	Eragrostis tenella	4	1	2	2,4	0,5	1,3
	Digitaria longifolia	4	1	2	2,4	0,5	1,3
	Zornia glochidiata	55	52	72	*32,9*	*28,1*	*45,0*
	Cenchrus biflorus	13	18	8	*7,7*	*9,7*	*5,0*
	Chloris prieurii	2	1	4	1,2	0,5	2,5
	Alysicarpus ovalifolius	2	11	2	1,2	*5,9*	1,3
	Indigofera senegalensis	1	28	10	0,6	*15,1*	6,2
	Ipomea pestigridis	2	7	x	1,2	3,8	
	Aristida funiculata	0,5	1	0,5	0,3	0,5	0,3
30.	*Merremia pinnata*	x	0,5	x		0,3	0,6
	Cassia obtusifolia	x	x	1			0,6
	Portulaca foliosa	x	0,5	x		0,3	
	Brachiaria xantholeuca	x	2	2		1,1	1,3
	Tragus racemosus	x	11	30		*5,9*	*18,7*
	Kohautia senegalensis		x				
	Cyperus spp.		0,5			0,3	
	Tribulus terrestris		6	11		3,2	6,9
	Urginea indica		0,5	0,5		0,3	0,3
	Corchorus tridens		0,5	0,5		0,3	0,3
40.	*Fimbristilis hispidula*		1	x		0,5	
	Polycarpaea corymbosa		x	x			
	(crucifère)		x	x			
	Striga aspera		x	x			
	Mollugo nudicaulis		x	0,5			0,3
	Gisekia pharnacoïdes			3			1,8
	Lineum pterocarpum			x			
	Merremia tridentata			x			
	Total	167	185	160	100	100	100
Nombre d'espèces		34	33	31	19	23	20

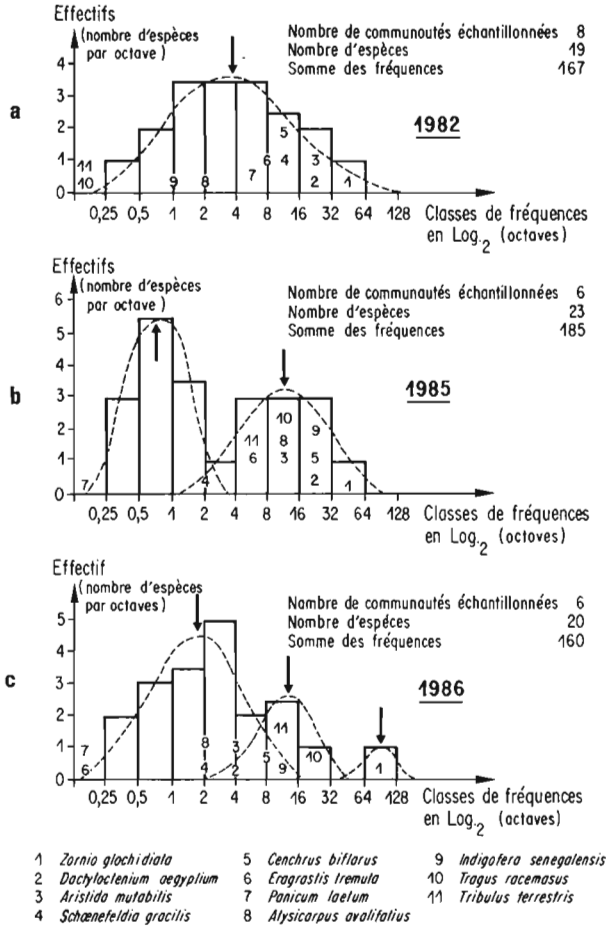


FIGURE 2 - *Distribution des fréquences spécifiques.*

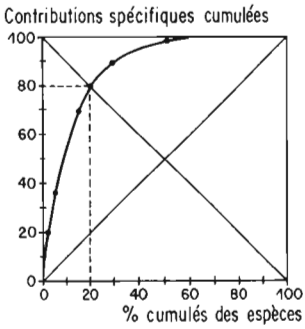


FIGURE 3 - *Relation entre les pourcentages cumulés des espèces et leurs contributions spécifiques cumulées.*

vis-à-vis des différents éléments du milieu (GODRON *et al.*, 1968 ; DAGET et GODRON, 1982) et selon leur capacité de résistance aux agressions de la part des autres taxons ou des individus voisins (DAGET, 1970). Cet ensemble de variables aboutit à un ensemble de rapports caractéristiques qui permet d'identifier la structure, laquelle est traduite par les types d'organisation spatiale de la communauté végétale (ou de la phytocénose).

Le problème de l'étude de la végétation, et plus particulièrement de son dynamisme, est donc d'appréhender la structure sous certains de ses aspects les plus caractéristiques. Pour les formations herbacées, nous avons choisi d'étudier la fréquence des espèces (GODRON, 1968 ; DAGET et POISSONET, 1969).

MÉTHODES

Parmi les procédés qui permettent d'obtenir une estimation du recouvrement par le biais des fréquences des espèces (LÉVY et MADDEN, 1933 ; HÉDIN et LEFEBVRE, 1951 ; GODRON, 1968 ; POISSONET et POISSONET, 1969), nous avons choisi l'un des plus simples, qui consiste à observer des séries de points régulièrement disposés le long de lignes (DAGET et POISSONET, 1969, 1971).

Ce procédé d'analyse de la végétation des formations herbacées donne, pour chaque espèce, une fréquence qui est le nombre de fois où l'espèce a été rencontrée à l'aplomb d'un point. C'est sur de telles fréquences que portent les interprétations présentées ici, qui sont faites en comparant la distribution des fréquences observées à la distribution log-normale.

RÉSULTATS

Végétation en équilibre

DISTRIBUTION DES FRÉQUENCES

Dans le cas d'une végétation en équilibre, il a été montré (DAGET, 1968) que la distribution des logarithmes des effectifs (ici, nombre de taxons dans chaque classe de fréquence) ne s'écartait pas significativement d'une distribution log-normale.

La figure 2a (observations de 1982) illustre le type de distribution.

SIGNIFICATION

Selon les économistes et les sociologues (GIBRAT, 1930 ; AITCHINSON et BROWN, 1966) qui appliquent ce type de loi aux populations objets de leurs recherches, tout se passe comme si l'on avait affaire à un groupe de taxons qui se partageraient les ressources du milieu. De plus, en raison du mode de dispersion des espèces qui sont toutes des annuelles, le nombre de graines est d'autant plus important que le nombre d'individus préexistants est plus élevé en cet emplacement.

DISTRIBUTION LOG-NORMALE ET STATISTIQUE DU RANG

POISSONET (1966), *in* GODRON *et al.* (1969), a abordé l'étude des populations végétales des formations herbacées par la voie de la statistique de rang. Il compare les

fréquences des espèces, exprimées en pourcentage de la somme des fréquences totales, à leur rang exprimé en pourcentage, et il reconnaît dans la courbe obtenue une courbe de concentration. Il constate que, dans les phytocénoses herbacées en équilibre, à 20 % des espèces correspondent 80 % des présences observées. La figure 3 représente la courbe obtenue dans une des communautés prise comme exemple.

Les résultats obtenus à partir des fréquences spécifiques du tableau I donnent pour le point caractéristique de la courbe de concentration, les coordonnées suivantes :

- 19,5 - 80,5, en 1982 ;
- 19 - 81, en 1985 ;
- 18 - 82, en 1986.

Compte tenu du nombre d'observations effectuées, ces coordonnées ne sont pas significativement différentes de : 20-80.

Végétation en déséquilibre

La végétation des phytocénoses herbacées échantillonnées en 1982 (fig. 2a) étant prise comme exemple d'équilibre, une modification des conditions de milieu entraîne un déséquilibre structurel qui se traduit par la combinaison de 2, ou davantage, courbes log-normales entre effectifs et fréquences.

Ces courbes s'écartent d'autant plus l'une de l'autre que l'action perturbatrice du milieu est plus forte ; la différence observée tend à s'atténuer dans le temps à mesure qu'un nouvel équilibre s'établit.

Les résultats montrent les aspects de déséquilibre dans les communautés spontanées sahéliennes dans les 2 principaux cas suivants :

- variabilité des pluviosités mensuelle et annuelle (fluctuation autour d'un point moyen) ;
- le sur- ou le sous-pâturage (distance par rapport au point d'eau permanent).

DÉSÉQUILIBRE DÛ À LA VARIABILITÉ DE LA PLUVIOSITÉ

La distribution des effectifs (nombre d'espèces par octaves) part, en 1982, d'une courbe unimodale de type log-normale, laquelle correspond à une végétation en équilibre ; elle présente, en 1985, une allure bimodale (pluviosité de juillet de 117 mm par rapport à une pluviosité de 159 mm pour le même mois en 1982) et, en 1986, une allure trimodale (pluviosité de juillet de seulement 51 mm) (fig. 2a, b et c).

Ces courbes bi- ou trimodales peuvent être subdivisées en courbes élémentaires log-normales (fig. 2). Toutefois, comme il s'agit d'une végétation à base de thérophytes, ces résultats ne sont valables que pour l'année considérée avec la pluviosité correspondante, car rien ne permet de dire que les résultats en 1987 ou en 1988 ne seraient pas identiques à ceux de 1982.

Sur le long terme, ces notions d'équilibre ou de déséquilibre dues à la pluviosité sont à situer dans un contexte de stabilité ou d'instabilité (Forman et Godron, 1986). Or, dans le cas d'une végétation spontanée dominée par des thérophytes, il s'agit d'un contexte d'instabilité dû aux fluctuations pluviométriques autour d'un point moyen.

DÉSÉQUILIBRE EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX POINTS D'EAU PERMANENTS

Les tableaux II et III donnent la liste des espèces rencontrées et leurs fréquences spécifiques dans les communautés sahéliennes échantillonnées en 1982, le long de 2 transects ; ceux-ci partent de 2 forages qui ont permis l'installation d'abreuvoirs permanents à Labgar et à Namarel.

Tableau II - Principales caractéristiques du transect exprimant l'influence de l'abreuvoir à partir de LABGAR

	RELEVÉS (1982)				
ESPÈCES	FS %	FS %	FS %	FS %	FS %
Boerhaavia diffusa	81				
Dactyloctenium aegyptium	6	3	1	10	33
Zornia glochidiata		80	21	49	74
Cenchrus biflorus		48	53	2	
Alysicarpus avalifolius		7	9		2
Aristida mutabilis			21	5	50
Schoenefeldia gracilis			14	75	21
Eragrostis tremula			4	38	11
Aristida funicula			1		
Trichoneura mollis			1		9
Cyperus rotundus			1		2
Digitaria longiflora				29	1
Eragrostis tennela				28	1
Chloris prieurii				2	10
Hypomea pestigridis				1	5
Nezaea erecta				1	
Spermacoce stachydea				1	
Somme des fréquences	87	138	126	241	219
% végétation	82	94	80	100	98
% litière, sol nu	18	6	20	0	2
Distance de l'abreuvoir en km	0,020	1,300	2,500	3,800	7,000
Artificialisation	très forte	forte/ assez forte	moyenne	assez faible	assez faible
Humidité station	assez sèche	sèche	sèche	assez sèche	assez sèche à moyenne
pH des 10 premiers cm	8,1	6,8	7,0	6,8	6,7
Couleur du sol	brun rougeâtre	brun jaunâtre	brun jaunâtre sombre	brun jaunâtre	brun jaunâtre sombre
Nombre d'espèces dans le relevé	2	11	27	31	22
Nombre d'espèces sous la ligne (100 pts)	2	4	10	12	12

Tableau III - Principales caractéristiques du transect exprimant l'influence de la distance à l'abreuvoir à partir de NAMAREL

	RELEVÉS (1982)			
ESPÈCES	FS %	FS %	FS %	FS %
Boerhaavia diffusa	90			
Panicum laetum	3	4		54
Dactyloctenium aegyptium	1	68		5
Zornia glochidiata		84	59	84
Eragrostis tremula		2		
Schoenefeldia gracilis		1		11
Aristida mutabilis			42	5
Cenchrus biflorus			15	6
Alysicarpus ovalifolius			1	
Cyperus rotundus				45
Borreria stachydea				9
Digitaria longiflora				1
Trichoneura mollis				1
Chloris prieurii				1
Somme des fréquences	94	159	117	222
% végétation	90	98	85	98
% litière, sol nu	10	2	15	2
Distance de l'abreuvoir en km	0,020	0,400	1,100	2,300
Artificialisation	forte	assez forte	moyenne	assez faible
Humidité de la station	assez sèche	assez sèche	assez sèche	moyenne
pH des 10 premiers cm	8	7	8	7,5
Couleur du sol	brun rouge foncé	brun jaunâtre sombre	brun jaunâtre clair	brun clair
Nombre d'espèces dans le relevé	4	15	7	25
Nombre d'espèces sous la ligne (100 pts)	3	5	4	11

La figure 4 permet de remarquer les déséquilibres très grands depuis les abreuvoirs jusqu'à 2,5 km de ceux-ci. Le déséquilibre est moins grand avec retour progressif à l'équilibre, à partir du quatrième kilomètre des abreuvoirs permanents.

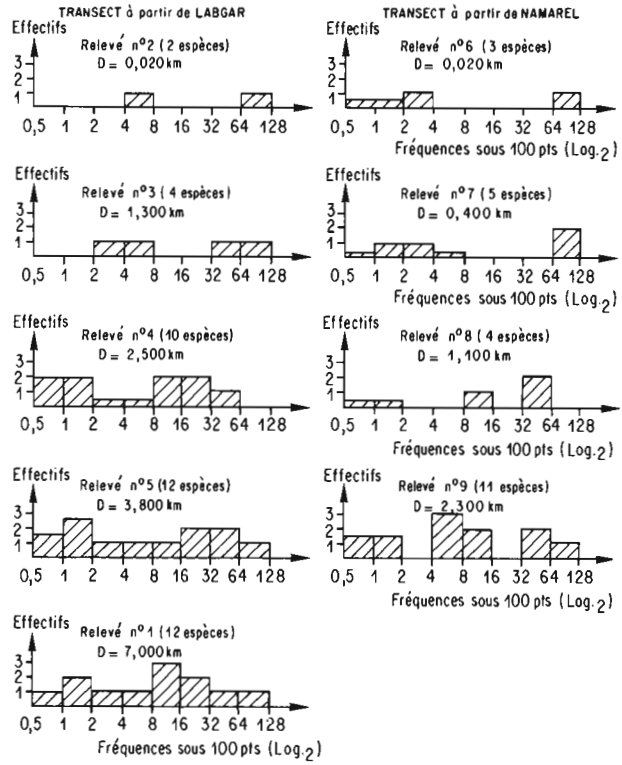


FIGURE 4 - *Distributions des fréquences observées en 1982 en fonction de la distance (D) aux abreuvoirs. (Mise en évidence des déséquilibres.)*

Retour à l'équilibre

EN FONCTION DE LA PLUVIOSITÉ ANNUELLE ET MENSUELLE

La variabilité de la pluviosité mensuelle, surtout celle de juillet, entraîne des modifications de conditions de milieu, ce qui se traduit par des variations importantes des fréquences spécifiques. La figure 5 illustre, pour 11 espèces dites «productrices» (espèces dont la fréquence en 1982, 1985 ou 1986, a été au moins une fois supérieure à 8 %) ces variations de fréquences spécifiques pour 1985 et pour 1986, par rapport au «modèle en équilibre» de 1982 ; ainsi :

- augmentation des fréquences de certaines espèces, c'est le cas :
  - en 1985, de *Alysicarpus ovalifolius* (S. et Th.) Léon,
  - en 1986, de *Zornia glochidiata* Reichb.,
  - en 1985 et en 1986, de *Indigofera senegalensis* Lam., de *Tragus racemosus* (L.) Allioni et de *Tribulus terrestris* L. ;
- diminution des fréquences de certaines espèces, c'est le cas :
  - en 1985 et en 1986, de *Aristida mutabilis* Trin., de *Schoenefeldia gracilis* Kunth. et de *Panicum laetum* Kunth.,
  - en 1986, de *Dactyloctenium aegyptium* Beauv. et de *Eragrostis tremula* Hochst. ;
- une espèce, *Cenchrus biflorus* Roxb., demeure indifférente.

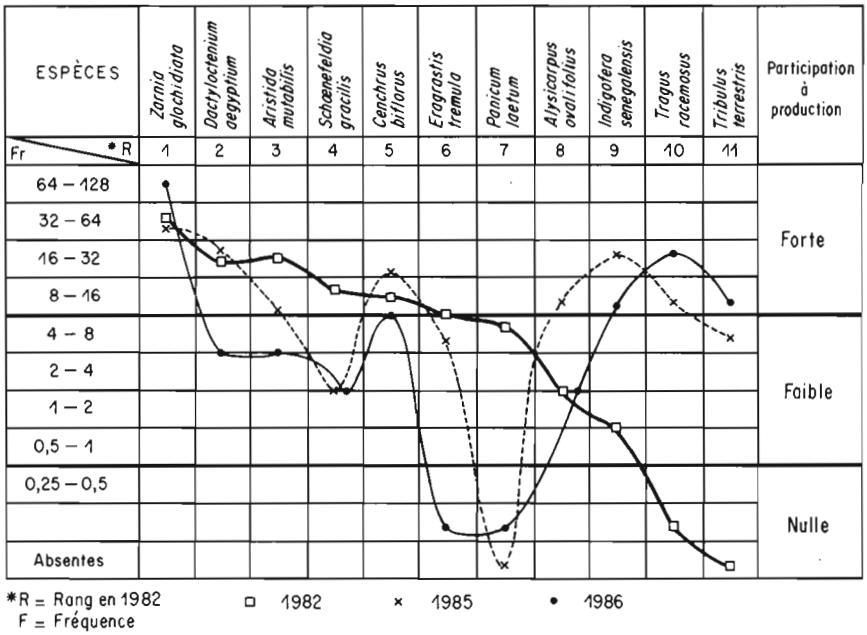


FIGURE 5 - *Variation des fréquences spécifiques des espèces dites «productrices» en 1985 et 1986 par rapport au «modèle en équilibre» de 1982.*

Pour expliquer cette évolution, on peut penser que la quantité de pluie tombée en juillet favorise une partie des espèces, dont les fréquences croissent, et en défavorise d'autres, dont les fréquences décroissent jusqu'à disparaître (fig. 5), certaines espèces restant indifférentes. Il est sûr aussi que la modification des conditions de milieu, exprimée ici par la variabilité des pluies, produit des modifications dans les relations sociales des espèces (complémentarité ou rupture entre espèces dominantes et espèces dominées).

Compte tenu des observations effectuées entre 1981 et 1986 dans le Ferlo sénégalais, les conditions d'équilibre seraient atteintes lorsque la quantité totale des pluies tombées, entre juillet et septembre, est au moins de 350 mm en vingt-cinq jours environ, dont, au minimum, 120 mm en sept jours en juillet.

Le déséquilibre est d'autant plus grand que la quantité de pluie tombe de façon violente en juillet et que le nombre de jours est faible (exemple de 1986 : 51 mm en un jour).

Ces résultats rejoignent ceux obtenus par BILLE (1977), BOUDET (1975, 1977), CORNET (1981) et VALENZA (1970, 1981) au Sénégal, par BREMAN *et al.* (1980), CISSÉ (1985, 1987) et HIERNAUX (1984, 1985) au Mali, et par GROUZIS (1986, 1987) au Burkina Faso.

Sur le plan local, il serait nécessaire de procéder à des expériences pour vérifier les réactions des espèces à cette variabilité de la pluviosité. Il faudrait vérifier ces réactions non seulement sur les espèces isolées (voie d'approche auto-écologique), mais aussi dans les communautés complexes (voie d'approche synécologique).

En fonction de la distance aux abreuvoirs et de la charge animale

Le piétinement des animaux, intense dans un rayon de 2,5 km autour de l'abreuvoir, entraîne des modifications très importantes des conditions de milieu, ce qui se traduit par des variations des fréquences spécifiques :

- développement très important d'espèces du genre *Boerhavia* autour de l'abreuvoir sur un rayon de 20 à 50 m ;
- communautés très fortement dominées par 2 espèces : *Zornia glochidiata* et *Dactyloctenium aegyptium* entre 0,4 et 1 km ;
- entre 1 et 2,5 km, la communauté est très nettement bimodale avec une forte domination des espèces telles que : *Zornia glochidiata, Cenchrus biflorus, Aristida mutabilis ;*
- à partir du quatrième kilomètre, un retour à l'équilibre s'amorce avec une augmentation très forte, d'une part de la diversité floristique, d'autre part de la participation dans la végétation d'espèces telles que *Schoenefeldia gracilis, Eragrostis tremula, Chloris prieurii* Kunth., *Digitaria longiflora* Pers., *Eragrostis tenella* Roem. et Sch. et *Panicum laetum.*

Pour expliquer cette évolution, les hypothèses suivantes sont généralement avancées :

- l'excès de matière organique favorise autour des abreuvoirs permanents les communautés monospécifiques à *Boerhavia diffusa,*
- le surpâturage et le piétinement favorisent les communautés bispécifiques à *Zornia glochidiata* et *Dactyloctenium aegyptium.*

Il faut parvenir au quatrième kilomètre de l'abreuvoir pour commencer à observer un début d'équilibre de la communauté qui est atteint vers le septième kilomètre et qui correspond à un équilibre entre la charge animale et la production transformable (en lait ou viande) des communautés végétales correspondantes sans sur- ou sous-pâturage (soit 5 ha pour une unité bétail tropical).

Si cette proximité de l'abreuvoir entraîne un déséquilibre dans les communautés pâturées en favorisant fortement la dominance de 1 ou 2 espèces, cela ne signifie pas une diminution de la productivité au sens agronomique ou pastoral du terme. De nombreux travaux, et plus particulièrement, au Sénégal, ceux de Valenza et Fayolle (1965), Valenza (1970, 1981), Valenza et Touré (1986), ont prouvé qu'en terme de productivité pastorale liée à la richesse en matière organique, c'est dans la zone comprise entre 0,4 et 1 km autour du forage que l'on obtient les meilleurs résultats, à partir d'une végétation que l'on peut qualifier de bispécifique avec une légumineuse (*Zornia glochidiata*) et une graminée (*Dactyloctenium aegyptium*).

DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Il est important de bien préciser les critères utilisés qui permettent, au sein d'une communauté végétale, de définir telle ou telle notion.

C'est ainsi que les notions d'équilibre ou de déséquilibre d'une communauté herbacée sont essentiellement basées sur la distribution des fréquences des espèces en référence à une distribution log-normale, une végétation sera dite en équilibre si la distribution observée ne s'éloigne pas significativement d'une distribution unimodale de type log-normale.

Les notions de stabilité ou d'instabilité sont essentiellement liées à la reproductibilité au cours des années des schémas de distribution des fréquences spécifiques ; générale-

ment, des communautés dominées par des espèces pérennes seront plus stables que des communautés dominées par des espèces annuelles. Ces dernières sont le plus souvent instables, le cas de Labgar en est une bonne illustration.

C'est ainsi que pendant un temps plus ou moins long à l'échelle d'une saison de végétation ou de plusieurs années ou à court, moyen ou long terme les communautés herbacées peuvent être classées en 4 grands groupes :

- les communautés équilibrées et stables ;
- les communautés déséquilibrées et stables ;
- les communautés équilibrées instables ;
- les communautés déséquilibrées instables.

Les notions de valeur ou de productivité pastorales sont indépendantes de celles d'équilibre ou de stabilité ; c'est ainsi que l'on peut rencontrer des communautés stables équilibrées de faible valeur pastorale (pâturages extensifs de moyenne ou de haute montagne des régions tempérées ou continentales), alors que des communautés instables et déséquilibrées peuvent avoir une forte valeur pastorale et présenter un haut niveau de productivité par rapport à tel ou tel paramètre dit «agronomique» ou «pastoral». C'est le cas des communautés paucispécifiques dont la végétation est composée d'espèces très appréciées par le bétail et considérées comme ayant une forte valeur bromatologique.

La pluviosité annuelle étant imprévisible, elle est cause à la fois d'instabilité et de déséquilibre des communautés dominées par les thérophytes. Toutefois, afin de ne pas accentuer ces déséquilibres par une mauvaise conduite du troupeau, une réflexion sur une stratégie d'aménagement et de gestion à long terme de l'espace sahélien a été entreprise ces dernières années, surtout pour les années dites de «bon hivernage», afin de pallier d'une part le déficit provoqué par les années dites de «mauvais hivernage» et, d'autre part, les éventuels conflits entre agriculteurs et éleveurs entraînés par la transhumance (BOUDET, 1974, 1984 ; BOUDET et CARRIÈRE, 1986 ; GILLET *et al.*, 1986 ; POISSONET et TOURÉ, 1986 ; VALENZA et TOURÉ, 1986 ; BOUDET, 1987).

J. POISSONET et F. CHAMBRIS : *botanistes*, Institut de botanique, rue Auguste-Broussonet, 34000 Montpellier
I. TOURÉ : *enseignant*, Fapis-Unesco, BP 5077, Dakar, Sénégal

BIBLIOGRAPHIE

AITCHINSON (J.) et BROWN (J.), 1966. - The lognormal distribution with special reference to it in economics. Camb. Univ. Press, 176 p.

BILLE (J.-C.), 1977. - Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. et doc. ORSTOM*, n° 65, Paris, 82 p.

BILLE (J.-C.) et POUPON (H.), 1972. - Description de la végétation. *In* : Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. *La Terre et la Vie*, 26 (3) : 332-350.

BOUDET (G.), 1974. - Les pâturages et l'élevage au Sahel. *Notes techniques* Mab/Unesco : 29-33.

BOUDET (G.), 1975. - Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. Min. de la Coop., IEMVT, 254 p.

BOUDET (G.), 1977a. - Désertification ou remontée biologique au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12 , 4 : 293-300.

BOUDET (G.), 1977b. - Contribution au contrôle continu des pâturages tropicaux en Afrique occidentale. *Rev. Élev. méd. vét. pays trop.* 30 , 4 : 384-406.

BOUDET (G.), 1984. - Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel. «La sécheresse au Sahel». *Bull. Soc. lang. géogr.*, 18 (3-4) : 167-179.

BOUDET (G.), 1987. - Connaissance et gestion de l'espace pastoral sahélien. «Terroirs pastoraux et agropastoraux en zone tropicale. Gestion aménagement et intensification fourragère». IEMVT, Maisons-Alfort : 1-60.

BOUDET (G.) et CARRIÈRE (M.), 1986. - Évolution des parcours et tentatives de restauration dans la région de Kaedi en Mauritanie. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens, Fapis/Unesco, Dakar/Sénégal, 6 p.

BREMAN (H.), CISSÉ (A. M.), DJITEYE (M. Z.) et ELBERSE (W. Th.), 1980 . - Pasture dynamics and forage availability in the Sahel. *Isr. J. Bot.*, 28 : 227-251.

CHAMBRIS (F.), 1988. - Influence des pluies, du substrat et de l'exploitation animale sur la dynamique de pâturages herbacés sahéliens. Exemple du Ferlo septentrional, Sénégal, 6 années d'observations à Labgar.- DAA Montpellier, Ensam-LSEM/USTL, 68 p.

CISSÉ (M. I.), 1985. - Les parcours sahéliens pluviaux du Mali central. Caractéristiques et principes techniques pour une amélioration dans le cadre des systèmes de production d'élevage existants. Séminaire régional sur la problématique et les stratégies sylvo-pastorales au Sahel, Fapis-Unesco/CILSS-IS/EISMV, Dakar/Sénégal : 255-286.

CISSÉ (A. M.), 1987. - Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahélienne. Wageningen/Pays-Bas, 211 p.

CORNET (A.), 1981. - Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse doct. ing., Montpellier, 353 p.

DAGET (Ph.), 1968. - Quelques remarques sur les distributions de fréquences spécifiques dans les phytocénoses. *Oecol. Plant.*, 3 : 299-312.

DAGET (Ph.), 1970. - Analyse de la dispersion spécifique dans les formations herbacées. Ve Coll. Écologie ENS, Paris, 15 p.

DAGET (Ph.) et GODRON (M.), 1982. - Analyse fréquentielle de l'écologie des espèces dans les communautés. Masson, Paris, 163 p.

DAGET (Ph.) et POISSONET (J.), 1969. - Analyse phytologique des prairies. *Applications agronomiques*. CNRS-Cepe, Montpellier, doc. n° 48, 67 p.

DAGET (Ph.) et POISSONET (J.), 1970. - Distribution des fréquences spécifiques dans les phytocénoses herbacées en déséquilibre. Ve Coll. Écologie ENS, Paris.

DAGET (Ph.) et POISSONET (J.), 1971. - Méthode d'analyse de la végétation des pâturages. Critères d'application. *Ann. Agron.*, 22 : 5-41.

DIALLO (A. K.) et VALENZA (J.), 1972. - Pâturages du Nord Sénégal, carte au 1/200 000. *Étude agrostologique* n° 34. Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux. Forman R. et Godron M., 1986 Landscape Ecology. John Wiley and sons, New York, 620 p.

FORMAN (R. T.) et GODRON (M.), 1986. - Landscape ecology. Wiley and sons. 619 p.

GASTON (A.), VAN ITTERSUM (G.) et VAN PRAET (C. L.), 1983. - Utilisation des images Noaa 7 pour l'estimation de la production primaire au Ferlo. Saison des pluies 1980 à 1983. Actes du Colloque : «Méthodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens». Projet Écosystèmes pastoraux, Dakar, 16-18 nov. 1983.

GIBRAT (R.), 1930. - Une loi des répartitions économiques : l'effet proportionnel. *Bull. Stat. gen. fr.*, 19 : 469 et suiv.

GILLET (H.), GASTON (A.) et TOURÉ (I. A.), 1986. - Évolution générale des écosystèmes pastoraux sahéliens et lignes directrices pour la surveillance continue, l'aménagement et la gestion. Séminaire régional sur la dynamique des pâturages sahéliens, Fapis/Unesco, Dakar, 33 p.

GODRON (M.), 1968. - Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale. *Oecol. Plant.*, 3 : 185-212.

GODRON (M.), DAGET (Ph.), EMBERGER (L.), LE FLOC'H (E.), LONG (G.), POISSONET (J.), SAUVAGE (Ch.) et WACQUANT (J.P.), 1968. - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. CNRS, Paris, 292 p.

GODRON (M.), DAGET (Ph.), POISSONET (J.) et POISSONET (P.), 1969. - Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal, France. *Int. Symp. Stat. Ecol.* (august 69), Yales, U.S., 19 p.

GROUZIS (M.), 1986. - Dynamique et tendances évolutives des phytocénoses sahéliennes du Burkina Faso. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens, Fapis/Unesco, Dakar/Sénégal, 15 p.

GROUZIS (M.), 1987. - Structure, production et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse d'État, Paris-Sud, 336 p.

HÉDIN (L.) et LEFEBVRE (J.), 1951. - Les méthodes d'analyse botanique dans l'étude agronomique des prairies. *Ann. Amél. Pl.* : 376-407.

HIERNAUX (P.), 1984. - Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Premiers résultats acquis dans le Sahel malien. Document du programme n° AZ 98, Cipea, Bamako.

HIERNAUX (P.), 1985. - Encore une saison des pluies très déficitaire sur le ranch de Niono (Sud Sahel, Mali). Évolution de la végétation d'une cinquantaine de sites suivis depuis 1976. Document du programme 141. Cipea, Bamako.

LÉVY (B.) et MADDEN (E.), 1933. - The point method of pasture analysis. New Zeal. *J. Agron.*, 46 : 267-279.

POISSONET (J.), 1966. - Recherches sur une loi d'équilibre dans la composition floristique des formations herbacées denses. CNRS-Cepe, Montpellier, 18 p.

POISSONET (J.), 1979. - Équilibre et déséquilibre des phytocénoses herbacées. CNRS-Cepe, X^es journées du Grenier de Theix. Inra : 463-468.

POISSONET (J.) et POISSONET (P.), 1969. - Essai de comparaison de méthodes d'analyse phytosociologique et agronomique des formations herbacées denses permanentes. CNRS-Cepe, Montpellier, doc. n° 50, 120 p.

POISSONET (J.), TOURÉ (I. A.), GILLET (M.) et CABARET (M.), 1985. - Aide-mémoire méthodologique pour l'étude des pâturages sahéliens. Fapis/Unesco/EISMV, Dakar, 29 p. + 9 annexes.

POISSONET (J.) et TOURÉ (I.A.), 1986. - Problématique pastorale du Ferlo sénégalais et éléments pour une stratégie d'aménagement et de gestion. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens.- Fapis/Unesco, Dakar, 11 p.

VALENZA (J.), 1970. - Survey of different types of natural pasture land in the Senegal Republic. Proc. XIe intern. Grassland Congress : 78-82.

VALENZA (J.), 1981. - Surveillance continue des pâturages naturels sahéliens sénégalais. Résultats de 1974 à 1978. *Rev. Élev. méd. vét. pays trop.*, 34 , 1 : 83-100.

VALENZA (J.) et FAYOLLE (F.), 1965. - Note sur les essais de charge au pâturage en République du Sénégal. *Rev. Élev. méd. vét. pays trop.*, Maisons-Alfort , 18 , 3 : 321-327.

VALENZA (J.) et TOURÉ (I. A.), 1986. - Bilan fourrager, aménagement et gestion des parcours naturels, cas du nord-Sénégal. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens, Fapis/Unesco, Dakar, 16 p.

François ACHARD

Phytomasse des savanes nord-soudaniennes de Gampéla

Région de Ouagadougou, Burkina Faso

INTRODUCTION

Ce travail est consacré à l'étude des savanes nord-soudaniennes de Gampéla, au Burkina Faso. Il s'attache plus particulièrement à la définition des paramètres de production de la phytomasse herbacée aérienne des unités de végétation à base de graminées annuelles ou à dominance de graminées vivaces. Il porte sur l'observation du cycle annuel de la phytomasse et des variations interannuelles (1984-1987) de la production herbacée sous l'effet de l'importance et de la distribution saisonnière des précipitations.

Par ailleurs, ce travail s'inscrit dans une série d'études entreprises au Burkina Faso et dans les pays voisins sur les pâturages des différentes zones climatiques :

- au Sahel burkinabé, celle de TOUTAIN (1977) sur l'ORD du Sahel et sur la zone de délestage de Fada N'gourma, celle de GROUZIS (1988) sur le bassin versant de la mare d'Oursi ;
- en zone nord-soudanienne, celle de GROUZIS (1980) à Loumbila et celle de BONKOUNGOU *et al.* (1985) à Saponé ;
- en zone soudanienne, celle de FOURNIER (1987) à Nazinga.

À ces études, on peut ajouter celle de BREMAN *et al.* (1982) dans le cadre de l'étude sur la productivité des pâturages sahéliens (PPS), au Mali, et celle de FOURNIER (1982) sur le cycle saisonnier de la biomasse herbacée à Ouango-Fitini, au nord de la Côte-d'Ivoire.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site d'étude

La station expérimentale de Gampéla appartient à l'université de Ouagadougou. Elle se trouve à 12° 25′ de latitude nord et 1° 22′ de longitude ouest. Elle est située dans le domaine phytogéographique nord-soudanien (GUINKO, 1984). Les formations végétales dominantes sont des savanes arborées claires avec *Vitellaria paradoxa* Gaertn., *Andropogon gayanus*, var. *bisquamulatus* Hack., *Andropogon pseudapricus* Stapf ou des savanes arbustives à combrétacées avec faciès à *Combretum glutinosum* Perr. et *Andropogon pseudapricus* ou *Guiera senegalensis* J. F. Gmel. et *Loudetia*

togoensis Hubb. (nomenclature des noms d'auteurs d'après la Flore du Sénégal, BERHAUT, 1967). Le recouvrement des couronnes des ligneux atteint 30 à 35 % selon les milieux.

Les pâturages naturels de Gampéla ont été surexploités par les agriculteurs et les pasteurs jusqu'à l'appropriation du terroir par l'université, en 1979. Ils portent depuis dix ans une charge de bétail assez faible : environ 8 ha par unité bétail tropical (UBT). Les animaux, petits ruminants et bovins, sont conduits au pâturage par des bergers. Les feux, interdits dans la région, ne surviennent plus depuis dix ans au moins.

Tableau I - Caractéristiques des unités choisies pour le suivi de la phytomasse (année 1986)

UNITÉS	PRINCIPALES ESPÈCES LIGNEUSES (L) et HERBACÉES ANNUELLES (Ha) OU VIVACES (Hv)		SITUATION TOPOGRAPHIQUE SOLS*
Lt AP	*Loudetia togoensis*	Ha	versant plat
Dominante	*Andropogon pseudapricus*	Ha	FTL** à concrétions et taches
annuelles	*Guiera senegalensis*	L	d'hydromorphie en profondeur.
			Profond. supérieure à 150 cm.
S e A p	*Schizachyrium exile*	Ha	Plateau
Dominante	*Andropogon pseudapricus*	Ha	FTL induré.
annuelles	*Piliostigma reticulatum*	L	moyennement profond.
	Combretum glutinosum	L	50 cm sur cuirasse
Ag Ap	*Andropogon gayanus*	Hv	Plateau
Dominante	*Andropogon pseudapricus*	Ha	FTL induré. Profond.
vivaces	*Dicrostachys cinerea*	L	70 cm sur cuirasse.
	Securinega virosa	L	
Ag Cs	*Andropogon gayanus*	Hv	Pente supérieure (0 à 1%)
Dominante	*Cymbopogon schoenantus*	Hv	FTL à concrétions et taches
vivaces	*Vittellaria paradoxa*	L	d'hydromorphie en profondeur.
	Acacia dudgeoni	L	Profond. supérieure à 120 cm.
Ag Sp	*Andropogon gayanus*	Hv	Terrasse.
Dominante	*Sporobolus pyramidalis*	Hv	Sol peu évolué d'apport
vivaces	*Pennisetum pedicellatum*	Ha	alluvial, hydromorphe.
	Terminalia avicennoïdes	L	Profond. supérieure à 120 cm.
	Strychnos spinosa	L	

* Les sols sont décrits selon la nomenclature de l'École française de pédologie. Étude BUNASOLS, 1987, Ouagadougou. Comm. personnelle.
** Ferrugineux tropicaux lessivés.

5 parcelles (tabl. I), situées au sein des principaux faciès rencontrés sur la station, ont été choisies pour le suivi de la phytomasse herbacée aérienne. Les parcelles SeAp et AgAp, d'une surface d'environ 2 ha chacune, sont en défens depuis huit ans ; les parcelles LtAp, AgCs et AgSp, d'une superficie unitaire de 0,5 ha sont en défens total depuis 1986. Elles ont été pâturées, uniquement en saison sèche, en 1984 et en 1985.

Le régime des pluies

Pluviométrie annuelle

La saison des pluies à Gampéla s'étend sur sept mois, de avril à octobre.

La pluviométrie moyenne des années étudiées, 1984 à 1987, est de 620,4 mm, avec des valeurs extrêmes de 708,5 mm, en 1986, et de 494,8 mm, en 1984. Le nombre de jours de pluie varie peu au cours de l'année : de 44, en 1987, à 47, en 1985. 50 % des pluies sont, en moyenne, inférieures à 10 mm.

La pluviométrie de Ouagadougou, station la plus proche de Gampéla, atteint 772,6 mm avec un coefficient de variation de 19,5 % (moyenne de 1968 à 1987).

Durée de la saison pluvieuse efficace, distribution des précipitations

La saison pluvieuse efficace se situe dans la période de végétation, c'est-à-dire entre le 1er juin et le 15 octobre. Elle débute quand les pluies décadaires sont supérieures ou égales à 0,35 d'évapotranspiration potentielle (ETP, méthode Penman) et se termine quand la pluviométrie revient à un niveau inférieur à ce seuil (fig. 1 et tabl. II).

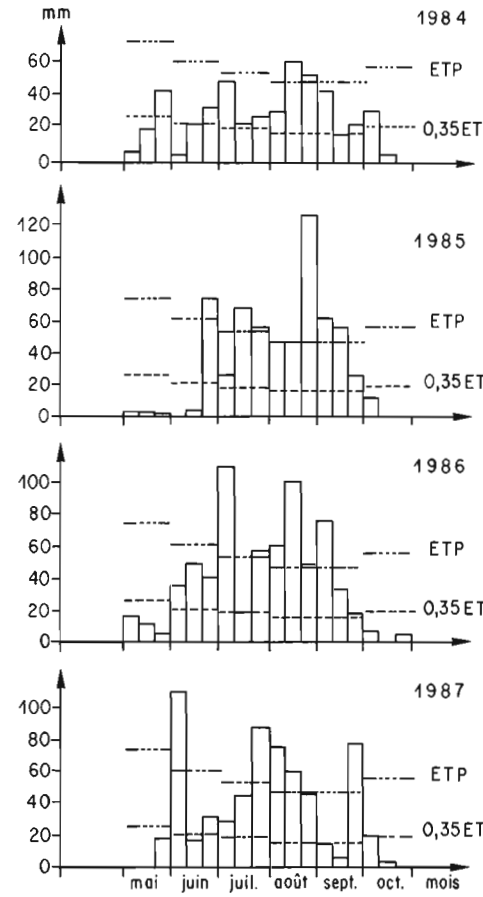


Figure 1 - *Pluviométrie décadaire-ETP mensuelle.*

Tableau II - ETP Penmann moyenne mensuelle à Ouagadougou (1957 à 1987)

MOIS	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
ETP (mm)	73	60	53	47	47	56

Source : CIEH Ouagadougou (*comm. pers.*)

LE HOUÉROU et POPOV (1981) ont montré que l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un sol nu est voisine de 0,35 ETP. Toute quantité de pluie qui dépasse ce seuil pour une période donnée est utilisable par les plantes et «cette valeur est donc un bon critère discriminant du seuil entre saison des pluies et saison sèche» (LE HOUÉROU, 1986). Par ailleurs, les résultats obtenus se rapprochent beaucoup de ceux trouvés par le critère de Bagnouls et Gaussen : P = 2t, où t représente la moyenne mensuelle des températures journalières et P les précipitations.

Pour affiner l'analyse, nous avons aussi mis en évidence la période humide, qui, selon la définition de FRANQUIN (1969) est celle où la pluviométrie est supérieure à l'ETP et où l'ETR égale l'évapotranspiration maximale (ETM). La période humide est la période de croissance maximale des plantes, pendant laquelle leurs besoins en eau sont couverts, au moins globalement.

La durée de la saison pluvieuse efficace (tabl. III) varie peu selon les années : 100 à 120 jours. Elle débute entre le 1er et le 20 juin pour se terminer, dans la majorité des cas, au 30 septembre.

Tableau III - Durée de la saison pluvieuse efficace (P supérieure ou égale à 0, 35 ETP) et de la période humide (P supérieure ou égale à ETP)

ANNÉES	PLUIES	SAISON PLUVIEUSE EFFICACE		PÉRIODE HUMIDE	
	mm	Période	nb.j^{-1}	Période	nb.j^{-1}
1984	494,8	20/6 au 15/10	115	10/8 au 30/08	20
1985	620,5	20/6 au 30/09	100	10/7 au 20/09	90
1986	708,5	01/6 au 30/09	120	01/7 au 10/09	70
1987	656,7	01/6 au 30/09	120	20/7 au 30/08	40

Lors des saisons pluvieuses de 1985 et de 1986, aucune décade n'a eu une pluviosité inférieure à 0,35 ETP. Il n'en a pas été de même en 1984 et en 1987, où la somme des pluies tombées au cours de 3 décades fut inférieure à ce seuil :

- en 1984, 1re décade de juillet, 2e et 3e décades de septembre ;
- en 1987, 2e décade de juin, 1re et 2e décades de septembre.

La variation interannuelle de la durée de la période humide est très importante : de 1 à 4,5.

MÉTHODES D'ÉTUDE

La phytomasse est définie comme le poids total, exprimé en matière sèche, des matières vivante et morte des végétaux. On peut y distinguer la biomasse proprement dite, qui ne comprend que les parties vivantes, et la nécromasse qui correspond aux parties mortes (FOURNIER et LAMOTTE, 1983). L'évaluation de la phytomasse herbacée aérienne est réalisée de diverses manières. Pour les espèces annuelles, l'on utilise la méthode de la récolte intégrale ; elle consiste à couper au ras du sol et à récolter la matière végétale sur la placette échantillon, à la peser immédiatement pour obtenir le poids de matière fraîche. La teneur en matière sèche est déterminée après séchage à l'étuve à 85 °C, jusqu'à poids constant, de 2 échantillons extraits de l'ensemble des prélèvements mélangés. Pour les graminées vivaces, on utilise la même procédure mais la coupe est alors effectuée à 15 cm de hauteur, afin de ne pas détruire la plante.

La phytomasse est mesurée de juin à novembre sur un rythme décadaire. Pour chaque parcelle, l'échantillonnage est basé sur la récolte de 40 carrés de 1 m^2, placés tous les 10 pas sur des transects établis parallèlement au grand axe de la parcelle.

La précision de l'échantillonnage est estimée par la formule :

$$P = \frac{2\delta}{x\sqrt{N}}$$

où :

N = effectif de l'échantillon

x = moyenne arithmétique

δ = écart-type de l'échantillon.

La précision, reflet de l'homogénéité de la répartition spatiale de la phytomasse, s'améliore au fur et à mesure de la croissance du peuplement herbacé. Celle-ci se réalise dans 2 directions : colonisation progressive des surfaces nues par les espèces annuelles et accroissement de la végétation herbacée (hauteur et recouvrement). L'évolution de la précision est légèrement différente dans les faciès à annuelles et dans ceux à vivaces (tabl. IV).

Tableau IV - Différents niveaux de précision selon les unités de végétation et la période pour 40 échantillons de 1 m^{-2} (1986)

UNITÉS DE VÉGÉTATION		NIVEAUX DE PRÉCISION
annuelles	vivaces	
15/7 au 25/07	27/6 au 07/07	15 % < P < 20 %
25/7 au 24/08	07/07 au 15/07	10 % < P < 15 %
03/9 au 23/10	25/07 au 23/10	5 % < P < 10%
	23/10 au 07/11	10 % < P < 15 %

RÉSULTATS

Cycle saisonnier de la phytomasse (juin 1986 à mai 1987)

Le cycle annuel de la phytomasse se déroule en 2 ou 3 phases selon qu'il s'agit d'espèces annuelles ou pérennes :

- une phase de croissance active pendant la saison des pluies. Elle débute avec les pluies du 1er au 4 juin (34,3 mm). Les repousses de graminées vivaces se développent et l'on assiste aux premières germinations de graminées annuelles. Les plantules de ces dernières vont périr au cours de la période de sécheresse de la mi-juin (14 au 28 juin : 13,3 mm) et ce n'est qu'avec les pluies des premiers jours de juillet que le tapis herbacé s'installe définitivement. La fin de cette phase coïncide avec la fructification des espèces au cours de la première quinzaine d'octobre ;
- une phase de vieillissement et de dégradation qui suit la précédente et qui est couplée avec la suivante ;
- une phase de repousses de saison sèche pour les pérennes uniquement. La phytomasse des repousses est toujours faible (45 à 90 kg $MS.ha^{-1}$) et leur croissance s'arrête au cours du mois de décembre.

ÉVOLUTION DE LA PHYTOMASSE PENDANT LA PHASE DE CROISSANCE ACTIVE ET DE DÉVELOPPEMENT DES ORGANES REPRODUCTEURS (tabl. V)

On peut distinguer 3 périodes :

- le démarrage de la végétation, période qui s'étend du développement des repousses de pérennes (début juin) et de la levée des annuelles (début juillet) jusqu'aux premiers jours d'août ;
- le tallage et la montaison, qui suivent immédiatement la précédente période et s'achèvent à la fin de la première quinzaine de septembre ;
- le développement des organes reproducteurs et la fructification, qui commencent à partir de la deuxième quinzaine de septembre et dure jusque vers le 15 octobre.

La productivité (tabl. VI) est égale à l'accroissement de la matière végétale par mètre carré et par jour. Rappelons que le point de départ du cycle végétatif est sensiblement le 1er juin pour les vivaces et le 1er juillet pour les annuelles.

Période de démarrage de la végétation

On peut faire 2 remarques à ce sujet :

- le départ de la végétation est tardif dans les unités à base de graminées annuelles par rapport aux pluies qui commencent à devenir fréquentes à partir du 1er juin (juin 1986 : 9 pluies ; 125,5 mm d'eau). Ce sont les plantules, issues de la deuxième grande vague de germination induite par les pluies du 29 juin au 6 juillet (125 mm de pluie), qui vont donner le pâturage de l'année. Il a fallu environ 250 mm de pluie pour que la végétation à graminées annuelles puisse s'établir durablement, soit 35 % du total des précipitations de l'année. Cet ordre de grandeur se retrouve en 1985 et 1987. En 1984, année très déficitaire, on a une valeur de 20 % ;
- le départ de la végétation est lent et la productivité du premier mois d'activité est faible.

La phytomasse des annuelles, comprise entre 150 et 190 kg $MS.ha^{-1}$ au 15 juillet, atteint à peine 400 kg $MS.ha^{-1}$ dans les premiers jours d'août, soit moins de 10 % de la phytomasse maximale. La productivité de la deuxième quinzaine de juillet est inférieure à 1,5 g $MS.m^{-2}.j^{-1}$.

Tableau V - Évolution de la phytomasse en kg MS.ha^{-1} (1986)

UNITÉS DATES DE COUPES	Ltap	SeAp	AgAp	AgCs	AgSp
25 juin			257	310	239
15 juillet	144	190	540	720	427
4 août	418	361	1 041	1 270	910
24 août	1 046	939	2 013	2 100	2 165
13 septembre	2 154	2 242	3 484	3 620	3 144
3 octobre	3 837	4 962	5 705	5 760	5 285
13 octobre	4 230	4 510	6 935	6 714	4 877
23 octobre	4 008	3 889	4 933	4 620	4 108
7 novembre	3 670		3 611	3 920	3 778

Tableau VI - Évolution de la productivité en g MS.m^{-2}.j^{-1}

UNITÉS PÉRIODES	LtAp	SeAp	AgAp	AgCS	AgSp
1er au 25 juin			1,1	1,3	1,0
25 juin au 4 août			2,0	2,4	1,7
15 juillet au 4 août	1,4	0,9			
4 août au 13 septembre	4,3	4,7	6,1	5,9	5,6
13 septembre au 3 octobre		13,6			10,7
13 septembre au 13 octobre	6,9		11,5	10,3	
P *moyenne*	4,1	5,3	5,2	5,0	4,3
Nb. de jours de végétation	104	94	134	134	124

La production des pérennes se situe entre 540 et 720 kg MS.ha^{-1} au 15 juillet, un mois et demi après le départ de la végétation et aux environs de 1 000 kg au 4 août, soit moins de 20 % de la phytomasse maximale. La productivité de ces unités entre le 1er juin et le 4 août n'atteint pas 2 g MS.m^{-2}.j^{-1}.

Période de tallage et de montaison (août-septembre)

À partir du début du mois d'août la vitesse de croissance augmente. C'est ainsi qu'au 13 septembre la phytomasse des annuelles avoisine les 2 200 kg MS.ha^{-1}, soit environ 45 à 50 % de la production maximale. La productivité durant cette période est de 4,5 g MS.m^{-2}.j^{-1}.

La production des parcelles à dominance de graminées vivaces se situe aux alentours de 3 500 kg MS.ha^{-1}, c'est-à-dire un peu plus de 50 % de la phytomasse maximale. La productivité varie de 5,6 à 6,1 g MS.m^{-2}.j^{-1}.

Période de développement des organes reproducteurs et fructification

La mi-septembre marque un tournant dans l'évolution de la phytomasse :

- d'une part cette date coïncide avec la fin de la dernière période de pluies importantes, qui a lieu du 1er au 14 septembre (97 mm au total et une pluie tous les deux ou trois jours). Ensuite les précipitations vont s'espacer et devenir rares ;
- d'autre part une grande partie des espèces sont en pleine montaison, *Andropogon gayanus* et *Andropogon pseudapricus*, ou à épiaison, *Loudetia togoensis*.

Après le 13 septembre, l'accumulation de la phytomasse aérienne va s'accélérer. La quantité de matière sèche à l'hectare est multipliée par 2 en vingt à trente jours. Le niveau maximal de la phytomasse est atteint entre le 4 et le 13 octobre selon les faciès.

Les unités à graminées annuelles situées sur plateaux culminent à 4 230 kg MS.ha^{-1} pour celle à *Loudetia togoensis* et à *Andropogon pseudapricus* et à 4 962 kg MS.ha^{-1} pour celle à *Schizachyrium* exile et à *Andropogon pseudapricus*. La productivité moyenne est de 6,9 à 13,6 g MS.m^{-2}.j^{-1}. La productivité moyenne de SeAp en fin de phase végétative est supérieure à celle de AgAp, d'une part parce qu'il s'agit d'une parcelle hétérogène où *Andropogon gayanus*, localisé en taches, représente 7 % de la contribution spécifique, d'autre part parce que le niveau maximal de la phytomasse a été atteint dix jours avant celui de LtAp.

Les unités à graminées pérennes situées sur plateaux ont une production plus élevée : 6 935 kg MS.ha^{-1} pour l'unité à *Andropogon gayanus* et à *Andropogon pseudapricus* et 6 714 kg MS.ha^{-1} pour celles à *Andropogon gayanus* et à *Cymbopogon schoenanthus* Spreng. La productivité moyenne est de l'ordre de 11 g MS.m^{-2}.j^{-1}.

Le pâturage de la terrasse (AgSp) atteint 5 285 kg MS.ha^{-1} avec une productivité de 10,7 g MS.m^{-2}.j^{-1}.

La productivité moyenne, calculée sur la durée du cycle végétatif, des groupements à graminées annuelles ou à graminées pérennes est peu différente : 4,7 et 5 g MS.m^{-2}.j^{-1}. Les graminées vivaces ont une production supérieure à celle des annuelles mais l'élaboration de leur phytomasse s'étale sur une période plus longue (134 jours au lieu de 100 jours)

Le cycle saisonnier de la phytomasse, que l'on vient de décrire, ainsi que l'évolution de cette dernière pendant la saison des pluies ne sont pas spécifiques à l'année 1986. L'allure générale des courbes se retrouve d'une année sur l'autre en 1984, 1985 et 1987. En revanche, on note une différence importante dans le niveau de la production maximale et de la productivité. Ce phénomène est lié à la quantité de pluie reçue par le sol, au ruissellement, et surtout à la régularité des précipitations.

Variations interannuelles de la phytomasse maximale (1984-1987)

Les unités de végétation SeAp et AgAp ont été étudiées ensemble en 1984 et en 1985. Leur évolution floristique s'étant révélée différente, elles ont été séparées en 1986.

La phytomasse maximale de l'unité AgSp, pâturée par des troupeaux étrangers à la station, n'a pu être déterminée en 1985.

Au cours de la période d'observation, les phytomasses enregistrées en 1984 sont les plus faibles, celles de 1986 les plus élevées (tabl. VII). On remarque qu'il y a une grande variabilité dans la production herbacée ; selon les années celle-ci peut passer du simple au double. Les productions de 1984 représentent respectivement 54, 49 et 61 % des productions de 1986 pour les unités LtAp, AgCs et AgSp.

L'unité de végétation AgSp, à dominance de graminées pérennes, recouvre une terrasse de ruisseau. Les phytomasses observées occupent une position intermédiaire entre celles des unités de plateau à graminées annuelles et à graminées vivaces. Cela est dû à 3 éléments particuliers à AgSp :

- le recouvrement ligneux bas est important (environ 36 %) ;
- les plages de sol nu représentent 18 % de la superficie ;
- la liste floristique fait apparaître la présence de graminées vivaces à production relativement faible comme *Sporobolus pyramidalis* P. Beauv., *Brachiaria jubata* (Fig. et De Not.) Stapf, etc.

Tableau VII - Phytomasse maximale en kg MS.ha^{-1}

Années / Unités	1984	1985	1986	1987
LtAp	2 272	3 522	4 230	2 945
SeAp			4 962	3 756
AgAp			6 935	6 755
AgCs	3 272	4 818	6 714	6 054
AgSp	3 240		5 285	4 236

Pluviométrie - Phytomasse herbacée aérienne maximale

Les relations pluies-phytomasse ont été établies en suivant l'évolution comparée de ces 2 éléments au cours des différentes années et en calculant les coefficients d'efficacité pluviométrique (CEP), c'est-à-dire la productivité par an et par millimètre d'eau incidente.

Variations relatives de la pluviométrie et de la phytomasse (tabl. VIII)

En 1984, la pluviométrie (494,8 mm) est la plus faible de la série des vingt dernières années.

Les années 1985 et 1986 se distinguent des années 1984 et 1987 par la longueur de la période humide (respectivement 90 et 70 jours contre 20 et 40 jours). Elles diffèrent entre elles par le total pluviométrique (619,5 mm en 1985, 708,5 mm en 1986) et par la date du début de la période de pluies efficaces (3e décade de juin en 1985, 1re décade de juin en 1986). Pour ces raisons, l'année 1986, nous l'avons déjà signalé, sera choisie comme année de référence.

Tableau VIII - Écarts en % entre la pluviométrie et les phytomasses observées en 1984 - 1985 - 1987 par rapport aux valeurs de ces mêmes paramètres enregistrées au cours de l'année de référence 1986

ANNÉES	1984	1985	1987
Pluviométrie	- 30	- 13	- 7
Phytomasse LtAp	- 46	- 17	- 30
Phytomasse SeAp			- 24
Phytomasse AgAp			- 3
Phytomasse AgCs	- 51	- 28	- 10
Phytomasse AgSp	- 39		- 20

En 1987, les pluies reçues sont légèrement inférieures à celles de 1986 (-49,8 mm) mais la répartition des précipitations est mauvaise. Il y a, en particulier, une très faible pluviométrie du 8 au 24 juin (15,7 mm) et du 26 août au 20 septembre (27,4 mm).

La phytomasse varie dans le même sens que la pluviométrie. Sa variation relative est supérieure à celle des pluies et dépend de 2 facteurs : la quantité d'eau tombée et la distribution des précipitations au cours de la saison pluvieuse efficace.

Au cours de l'année 1984, caractérisée par la faiblesse des précipitations, une pluviométrie inférieure de 30 % à celle de 1986 induit une perte de phytomasse d'environ 50 % dans les unités à dominance de graminées annuelles ou vivaces. Sur la parcelle AgSp qui reçoit les eaux de ruissellement, la diminution de la phytomasse est inférieure (- 39 %).

En 1987, le facteur distribution des pluies prédomine, tout au moins au niveau des unités à dominance de graminées annuelles. À une pluviométrie inférieure de 7 % à celle de 1986 correspond une chute de la phytomasse de 24 à 30 %. Les unités à dominance de pérennes sont moins sensibles à l'irrégularité du régime des pluies. Dans les 2 unités situées sur plateau, les diminutions relatives de phytomasse (3 à 10 %) sont du même ordre de grandeur que celles des pluies (7 %). L'unité qui recouvre la terrasse se situe en position intermédiaire.

Les rapports des coefficients de variation de la production et de la pluviométrie pour les unités LtAp et AgCs sont respectivement de 1,8 et de 2,1. La variabilité de la production est environ 2 fois plus importante que la variabilité des pluies.

Coefficient d'efficacité pluviale

Le CEP est le rapport entre la phytomasse maximale enregistrée sur les différentes unités de végétation et les précipitations annuelles totales. Il s'exprime en kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$ (tabl. IX).

«Le CEP croit avec la pluviométrie jusqu'à un certain niveau où la fertilité du sol ou la réserve en eau peut devenir un facteur limitant.» (LE HOUÉROU, 1984). Ce même auteur précise encore que le CEP est fortement lié à la dynamique de la végétation sous l'effet de l'exploitation par l'homme et par les herbivores domestiques et aux types biologiques dominants, en particulier la présence de pérennes.

Tableau IX - Coefficient d'efficacité pluviale en ; kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}

ANNÉES / UNITÉS	1984	1985	1986	1987	moyenne
LtAp	4,6	5,7	6,0	4,5	5,2
SeAp			7,0	5,7	6,4
AgAp			9,8	10,3	10,0
AgCs	6,6	7,8	9,5	9,2	8,3
AgSp	6,5		7,5	6,4	6,8

Les CEP enregistrés à Gampéla, évoluent parallèlement à la pluviométrie. Les valeurs de 1984 sont les plus faibles, celles de 1986 les plus élevées de la période. Les différences varient entre 1,4 point pour LtAp et 2,9 points pour AgCs.

On peut remarquer cependant, au niveau de l'unité LtAp à dominance de graminées annuelles, que le CEP est très dépendant de la distribution des pluies. Les valeurs de 1984 et de 1987 sont semblables alors que la pluviométrie de 1987 est nettement supérieure à celle de 1984 (+ 33 %). Ce phénomène ne se retrouve pas sur les parcelles de pérennes.

Le CEP est lié à la nature des groupements végétaux. La moyenne interannuelle des CEP pour les unités de plateau est de 5,2 kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1} pour la parcelle LtAp et de 8,3 kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1} pour la parcelle AgCs, soit environ 37 % de différence en faveur des vivaces.

DISCUSSION - CONCLUSIONS

CÉSAR (1981), en s'appuyant sur des travaux réalisés sur des savanes soudaniennes, dans 4 localités du Nord de la Côte-d'Ivoire, écrit : «la biomasse maximale dépend uniquement de la longueur de la saison pluvieuse et en particulier de la précocité des pluies».

FOURNIER (1987), dans son étude sur Nazinga, reprend à son compte cette affirmation.

Le régime des pluies à Gampéla, pendant la période de 1984 à 1987, a été le suivant :

- en 1985, les pluies ont été tardives (26 juin) ;
- en 1984, en 1986 et en 1987, le départ de la saison pluvieuse efficace a été précoce, 3e décade de mai en 1984, 1re décade de juin pour les 2 autres années avec respectivement 42,6 mm, 36,2 mm, 109,9 mm. Mais ces premières pluies ont été suivies de longues périodes sèches, 25 jours en 1984 avec 24,7 mm, 15 jours en 1986 avec 15,3 mm, 17 jours en 1987 avec 15,7 mm, alors que l'ETP est encore élevée, 6 mm.j^{-1}.

Ici, comme dans la zone soudanienne, la phytomasse des savanes à graminées vivaces est liée à la précocité des pluies. Cependant, la mauvaise distribution des précipitations au cours du mois de juin tempère l'effet des pluies précoces et les phytomasses enregistrées fin juin sont faibles (inférieures à 300 kg MS.ha^{-1}). De plus, la capa-

cité de repousse des vivaces en octobre est limitée et ces espèces ont tendance à se comporter comme des annuelles à cycle long. Leur production, supérieure de 50 % à celle des annuelles, est basée sur le fait de pouvoir profiter dans une certaine mesure des pluies précoces et surtout d'être moins sensibles à l'irrégularité de la distribution des pluies grâce à leur enracinement profond et à la nature des terrains qu'elles colonisent.

En revanche, dans les savanes à dominance de graminées annuelles, qui couvrent 80 % de la superficie de la région, l'effet de la précocité des pluies n'est pas sensible. La végétation ne s'établit durablement qu'à l'installation des pluies régulières c'est-à-dire fin juin-début juillet.

Les 2 facteurs pluviométriques qui déterminent la production de la phytomasse herbacée sont donc le total annuel et la distribution des pluies au cours de la saison pluvieuse efficace.

La phase de croissance de la biomasse herbacée est courte. La période végétative varie entre 75 et 105 jours pour les graminées annuelles dominantes, *Loudetia togoensis, Andropogon pseudapricus* ; si elle se situe aux environs de 135 jours pour *Andropogon gayanus*, on remarque que 90 % de la phytomasse est produite entre le 15 juillet et le 13 octobre, soit en 100 jours.

FOURNIER (1987) donne à peu près les mêmes résultats à propos de la répartition mensuelle de la production herbacée. Cet auteur précise que l'activité importante des formations herbacées vivaces de Nazinga a lieu de juin ou de juillet à octobre selon les sites ; l'auteur ajoute que la longueur de la période végétative est pratiquement la même que celle de la saison des pluies mais que l'accumulation de la phytomasse commence un mois après le début des pluies.

La phytomasse maximale des annuelles est atteinte au cours de la première quinzaine d'octobre. Elle oscille, selon les années, entre 2 300 et 5 000 kg $MS.ha^{-1}$, avec une productivité de 2,4 à 5,3 g $MS.m^{-2}.j^{-1}$.

La productivité moyenne des différentes unités de végétation à annuelles ou à vivaces est semblable. Bien que ces dernières aient un cycle végétatif plus long, la production du mois de juin, à pluviométrie aléatoire, est faible.

En étudiant les savanes à graminées vivaces du parc de la Comoé, en Côte-d'Ivoire, FOURNIER (1982) a trouvé des phytomasses maximales de 5 000 et 5 800 kg $MS.ha^{-1}$ avec une pluviométrie de 1 088 mm.

Pour le ranch de gibier de Nazinga, en 1984, FOURNIER (1987) donne des valeurs de phytomasse qui varient entre 2 510 kg $MS.ha^{-1}$, pour des savanes à *Loudetia* spp. et à *Andropogon pseudapricus*, et 4 220 kg $MS.ha^{-1}$, pour des savanes de haut de pente à graminées pérennes avec un recouvrement ligneux semblable à celui de nos parcelles.

À Saponé, BONKOUNGOU *et al.* (1985) trouvent, dans des unités à *Andropogon gayanus* en défens depuis dix ans, des phytomasses qui vont de 7 600 à 8 100 kg $MS.ha^{-1}$, pour une pluviométrie de l'ordre de 700 mm.

Sur le parc de restauration de Loumbila, GROUZIS (1980) observe des phytomasses maximales de 1 728 à 4 285 kg $MS.ha^{-1}$ dans des faciès à graminées annuelles en tout point semblables aux nôtres, pour des pluies de 593 mm.

Les phytomasses relevées à Gampéla sont du même ordre que celles enregistrées à Nazinga et à Loumbila, pour les unités à annuelles et à Saponé pour les unités à pérennes. Elles sont supérieures cependant à celles observées en zone soudanienne, dans les savanes à graminées vivaces, avec une pluviométrie plus élevée.

Ces résultats, obtenus sur des zones peu ou pas pâturées, ne sont pas représentatifs des productions actuelles de la zone nord-soudanienne du Burkina Faso. Ils montrent cependant quelles peuvent être les potentialités de cette région.

Les CEP (de 1984 à 1987) fluctuent de 4,6 à 7,0 kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$ pour les unités à annuelles, de 6,6 à 10 kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1}$ pour celles à dominance de graminées

vivaces. Ils sont supérieurs à ceux que l'on peut calculer à partir des travaux de FOURNIER (1984 : CEP = 3,2 à 5,4 ; à Nazinga) et du même ordre que ceux trouvés chez BONKOUNGOU *et al.* (1985 : CEP = 10,8 à 11,6 ; à Saponé) et chez GROUZIS (1980 : CEP = 4,1 à 7,2 ; à Loumbila) dans des savanes à graminées annuelles.

On retrouve aussi des valeurs semblables au sein des unités de végétation à graminées annuelles du sahel burkinabé avec des pluviométries moyennes de 368 mm (de 1976 à 1984). La moyenne générale pour les années 1977 à 1981, des CEP des unités de végétation du bassin versant de la mare d'Oursi est de 4,7 g $MS.m^{-2}.an^{-1}.mm^{-1}$ (GROUZIS, 1988).

Aujourd'hui, en zone nord-soudanienne, les unités de végétation à base de graminées annuelles occupent la quasi-totalité des zones enherbées. Les sols qui ont porté des groupements à graminées vivaces sont tous en culture quasi permanente ou en jachères surpâturées, dans lesquelles les pérennes sont inexistantes. La production moyenne des pâturages est de l'ordre de 2 000 kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}$ et les CEP avoisinent les 3 g $MS.m^{-2}.an^{-1}.mm^{-1}$.

À Gampéla, il est intéressant de noter que, après quelques années seulement de mise en défens partielle, une savane surexploitée et dégradée peut retrouver une productivité élevée avec des CEP multipliés par un facteur 2 ou 3. Ce phénomène est dû à l'expansion des populations de *Andropogon pseudapricus*, espèce qui tend à remplacer *Loudetia togoensis*, d'une part, et au développement de *Andropogon gayanus* d'autre part. Ce développement, lent et localisé sur sols peu fertiles, est général et rapide sur sols favorables. Cela démontre une fois encore «l'importance primordiale de la dynamique des écosystèmes sur le CEP» (LE HOUÉROU, 1984).

F. ACHARD : *écologue*,
faculté d'agronomie, BP 1096, Niamey, Niger

BIBLIOGRAPHIE

BERHAUT (J.), 1967. - Flore du Sénégal. Clairafrique Dakar. 485 p.

BONKOUNGOU (G. E.) et BORTOLI (L.), 1985. - Projet d'études et actions intégrées de reboisement villageois et familiaux. Rapport d'activité première phase. Irbet. Ouagadougou.

BREMAN (H.) et KRUL (J. M.), 1982. - La pluviosité et la production de fourrages sur les pâturages naturels *in* Penning de Vries FWT, et Djiteye M.A., 1982. «La production primaire au Sahel» Cabo, Wageningen : 98-133.

CÉSAR (J.), 1981. - Cycle de la biomasse et des repousses après coupes en savane de Côte-d'Ivoire. *Rev. Élev. méd. vét. pays trop.* 1981,34 (1) : 73-81.

FOURNIER (A.), 1982. - Cycles saisonniers de la biomasse herbacées dans les savanes de Ouango - Fitini (Côte-d'Ivoire). *Ann. univ. Abidjan, sér.* E, 15 : 63-94.

FOURNIER (A.), 1987. - Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée dans les savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes ouest-africaines. *Bull. Écol.*, T. 18, 4, 1987 : 409-430.

FOURNIER (A.) et LAMOTTE (M.), 1983. - Estimation de la production primaire des milieux herbacés tropicaux. *Ann. univ. Abdijan. sér.* E, 17, 8-38.

FRANQUIN (P.), 1969. - Analyses agroclimatiques en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 1969 (9) : 65-95.

GROUZIS (M.), 1980. - Nature et productivité des pâturages du parc de restauration de Loumbila. ORSTOM Ouagadougou, 10 p. *multigr.*

GROUZIS (M.), 1988. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso. *Études et Thèses,* ORSTOM, Paris, 336 p.

GUINKO (S.), 1984. - Végétation de la Haute-Volta. Thèse de doctorat ès sciences naturelles. Univ. Bordeaux III, 318 p.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1984. - Rain Use Efficiency : an unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environment,* 7,213-247.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1986. - Inventaire et surveillance continue des écosystèmes pâturés sahéliens. *Rapport technique* FAO-PNUE. 150 p.

LE HOUÉROU (H.-N.) et POPOV (G.F.), 1981. - An ecoclimatic classification of intertropical Africa. FAO, *Plant production and protection paper,* n° 31, 40 p. + ann.

TOUTAIN (P.), 1977. - Pâturages de l'ORD du sahel et de la zone de délestage au nord-est de Fada N'Gourma, Burkina Faso. IEMVT-ministère de la Coopération.

Bruno SICARD

Influences de l'aridité sur la biologie des rongeurs soudano-sahéliens

INTRODUCTION

Un suivi écophysiologique des populations de rongeurs de 12 milieux dans la région de la mare d'Oursi, au Burkina Faso (de 1984 à 1988), et des séries de piégeages dans les régions de Ouagadougou et de Nazinga, nous permettent de montrer l'intérêt fondamental de l'étude des adaptations des rongeurs sahéliens à l'aridité, et de comprendre les mécanismes de concentration de ces populations animales (dont certaines ravagent les cultures et transmettent des maladies à l'homme et au bétail) dans les micromilieux humides de ces zones arides.

Cette analyse nous amène également à rechercher des critères d'aridité et à étudier la hiérarchie et les aspects quantitatifs et qualitatifs des influences de l'aridité, en région sahélienne, sur la reproduction et la mobilité des rongeurs.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Techniques utilisées

Les techniques utilisées en laboratoire et sur le terrain sont détaillées dans les travaux de GAUTUN (1981) et de SICARD (1987) ; il s'agit :

- de techniques de détermination des espèces : biométrie, caryologie ;
- de techniques écologiques : capture-marquage-recapture, calendriers de présence, modélisation des évolutions saisonnières des densités, des domaines vitaux et des paramètres démographiques des populations de rongeurs ;
- de techniques écophysiologiques : méthode à l'eau tritiée qui permet la mesure du métabolisme hydrique des rongeurs ;
- de techniques physiologiques : analyse des contenus stomacaux et des organes sexuels, ponctions intracardiaques, dosages radio-immunologiques des hormones sexuelles, manipulations de l'environnement photopériodique, ceci, pour étudier le déterminisme de l'évolution saisonnière de la reproduction des populations de rongeurs étudiées.

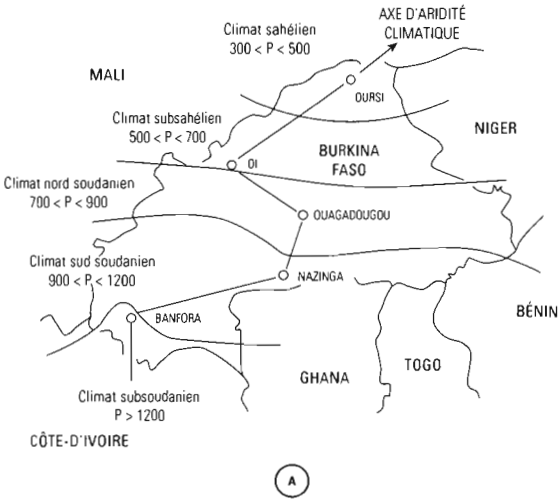
Cadre géographique de l'étude (régions et milieux)

L'AXE D'ARIDITÉ CLIMATIQUE (AXE C)

De Banfora à Nazinga, Ouagadougou, Di et Oursi, les régions étudiées se situent, par leur pluviométrie (GUINKO, 1984), sur un gradient d'aridité climatique (fig. 1A) :

- zone subsoudanienne (P > 1 200 mm) ;
- zone sud-soudanienne (900 mm < P < 1 200 mm) ;
- zone nord-soudanienne (750 mm < P < 900 mm) ;
- zone subsahélienne (500 mm < P < 750 mm) ;
- zone sahélienne (300 mm < P < 500 mm).

L'analyse des travaux de MONIOD *et al.* (1977), CHEVALLIER *et al.* (1985) et POUYAUD (1986), nous permet de résumer l'évolution des facteurs physiques sur cet axe qui correspond à un gradient décroissant de l'intensité et de la durée de la période pluvieuse et à un gradient croissant des moyennes annuelles des températures et de l'ensoleille-



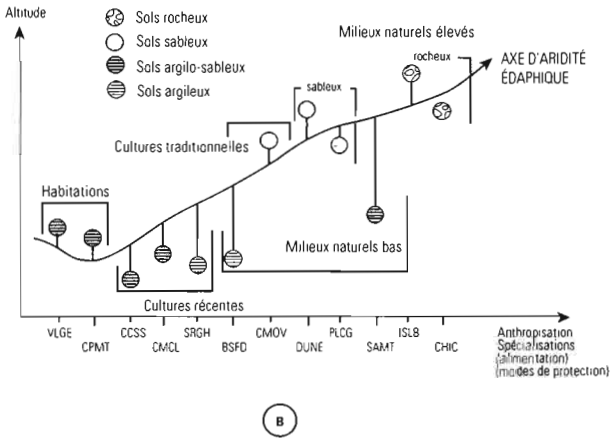


FIGURE 1. - *Les axes des aridités climatique et édaphique. Les régions étudiées sont classées par ordre croissant d'aridité climatique (A). De même, les milieux étudiés sont classés par ordre croissant d'aridité édaphique : villages (VLGE), campements (CPMT), cultures de décrue (CCSS), cultures de mil encloses (CMCL), cultures de sorgho (SRGH), bas-fonds (BSFD), cultures de mil ouvertes (CMCL), dune (DUNE), placages sableux (PLCG), incisions de couverture (SAMT), inselbergs granitiques (ISLB) et chicots métamorphiques (CHIC) (b).*

ment (aspect quantitatif). L'amplitude et la reproductibilité des variations annuelles de la pluviométrie (pluviosité) diminuent sur cet axe, alors que l'amplitude et la reproductibilité des variations annuelles des températures et de l'éclairement (thermo-photo-périodisme) augmentent (aspect qualitatif).

Les axes d'aridité édaphique

Les ouvrages de synthèse qui résultent des travaux scientifiques réalisés dans la région de la mare d'Oursi (Leprun, 1977 ; Sicot, 1978 ; Joly *et al.*, 1980 ; Grouzis, 1988) montrent bien la multiplicité des facteurs de redistribution de l'eau : nature du sol, pente, altitude, degré d'anthropisation. Chez les rongeurs, des facteurs spécifiques interviennent : alimentation (herbes, insectes ou graines), utilisation de l'eau de rosée (comportement nocturne) et variations saisonnières de la creusabilité et des organisations superficielles du sol (comportement terricole). Nous avons classé les milieux étudiés en fonction de l'aridité édaphique finalement perçue par les rongeurs.

Dans la région d'Oursi (fig. 1B), les milieux bas, habités (villages [VLGE] et campements [CPMT]) ou cultivés (cultures en contre-saison sur les bords de mare [CCSS] et cultures de sorgho dans les bas-fonds [SRGH]) représentent le pôle humide du gradient d'aridité locale. Viennent ensuite les milieux parcourus ou «naturels» argileux ou bas-fonds (BSFD), les cultures de mil encloses (CMCL), les cultures de mil traditionnelles à mi-pente (CMOV), les milieux parcourus sableux (dunes [DUNE] et placages sableux éoliens [PLCG]), puis les milieux «naturels» argilo-gréseux (incisions segmentaires à l'amont du réseau hydrographique [SAMT]), ou rocheux (inselbergs granitiques aux altérations granulaires et fentes favorables aux rongeurs [ISLB] et chicots métamorphiques peu altérés et pauvres en fentes de délitage [CHIC]). On retrouve dans les autres régions cette relation entre l'altitude, le degré d'anthropisation, la pédologie, la géomorphologie des milieux et l'aridité édaphique perçue par les rongeurs.

RÉSULTATS

Variations de la composition des peuplements en rongeurs en fonction de l'aridité

Espèces climaciques et espèces ubiquistes

La systématique, encore inachevée, des rongeurs ne permet pas toujours de garantir le nom d'une espèce ; nous indiquons alors le nombre diploïde de chromosomes. Dans l'analyse, entre 5° de longitude est et 2° de longitude ouest (fig. 2A), les espèces non sahéliennes ont une limite septentrionale de répartition :

- subsoudanienne :
  - *Lemniscomys bellieri*
    (2n = 56 : Van Der Straten, 1975 ; Van Der Straten et Verheyen 1978),
  - *Lemniscomys linulus* Thomas, 1910,
  - *Uranomys ruddi* Dollman, 1909
    (2n = 52 : Matthey, 1970) ;
- sud-soudanienne :
  - *Tatera hopkinsoni* Thomas, 1911,
  - *Lemniscomys striatus* (Linnaeus, 1758)
    (2n = 44 : Van Der Straten, 1975 ; Van Der Straten et Verheyen 1978),

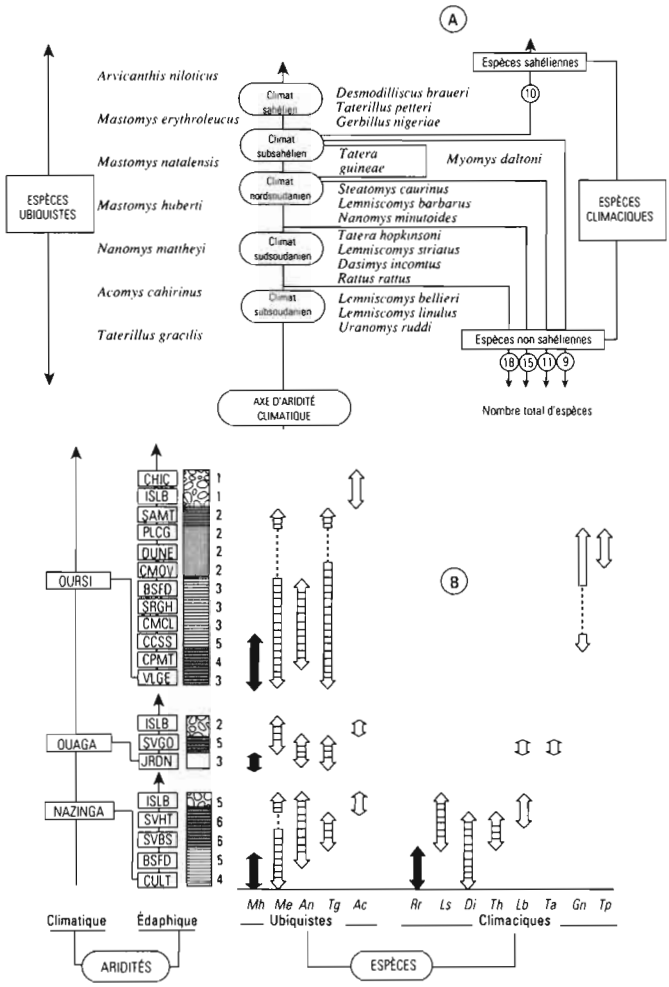


FIGURE 2. - *Répartition des rongeurs et aridité : l'aridité climatique nous permet de définir les types d'espèces ubiquistes et climaciques (A), et l'aridité édaphique nous permet de définir les sous-types d'espèces généralistes et spécialistes des milieux humides et arides (B). Rappel les milieux étudiés : villages (VLGE) et campements (CPMT), jardins (JRDN) (CULT), cultures de décrue (CCSS), cultures de mil encloses (CMCL), cultures de sorgho (SRGH), bas-fonds (BSFD), savanes basses (SVBS) et hautes (SVHT), savane de Gonsé (SVGO), dune (DUNE) et placages (PLCG), incisions de couverture (SAMT), inselbergs granitiques (ISLB) et chicots métamorphiques (CHIC).*

- *Dasymys incomtus* (Sundevall, 1847) ;
- nord-soudanienne :
  - *Steatomys caurinus* (Thomas, 1912),
  - *Lemniscomys barbarus* (Linnaeus, 1767) (2n = 54 : Matthey, 1954),
  - *Nannomys minutoïdes* (Smith, 1834) (2n = 34 : Matthey, 1966, 1967) ;
- subsahélienne :
  - *Myomys daltoni* (Thomas, 1892) (2n = 36 : Tranier et Gautun, 1979),
  - *Tatera guineae* (Thomas, 1910).

Les espèces strictement sahéliennes ont une limite méridionale de répartition :
- subsahélienne :
  - *Desmodilliscus braueri* (Wettstein, 1917),
  - *Taterillus petteri* (Gautun *et al.*, 1985)

(2n = 18-19 : Sicard *et al.*, 1988b),
- *Gerbillus nigeriae* (Thomas et Hinton, 1920)
(2n = 68-72 : Volobouev *et al.*, 1988).

Outre ces espèces climaciques, 7 espèces ubiquistes sont présentes du nord au sud du Burkina Faso :
- *Nanomys mattheyi* (2n = 36, Matthey, 1966, 1967) ;
- *Taterillus gracilis* (Thomas, 1892) ;
- *Arvicanthis niloticus* (Demarest, 1822) ;
- *Mastomys erythroleucus* (Temminck, 1853)
(2n = 38, NFA = 52-54 : Matthey, 1958) ;
- *Mastomys* cf. *natalensis* (Smith, 1842)
(2n = 32, NFA = 44 : Duplantier, 1988) ;
- *Mastomys huberti* (Wroughton, 1908)
(2n = 32, NFA = 52-54 : Duplantier, 1988) ;
- *Acomys* spp. nov. (spp. nov. 2n = 68, Gautun, 1980).

Espèces spécialistes et espèces généralistes

La figure 2B schématise la répartition des espèces ubiquistes et des espèces climaciques à Nazinga, à Ouagadougou et dans la région d'Oursi. Dans ces 3 régions, le type ubiquiste comporte 3 sous-types :
- celui des spécialistes des milieux humides (*M. huberti*) ;
- celui des spécialistes des milieux arides (*Acomys* spp. nov.) ;
- celui des généralistes (ensemble des autres espèces).

La stabilité latitudinale de la répartition des ubiquistes est limitée : en région sahélienne, les ubiquistes généralistes se rapprochent moins qu'en région soudanienne du pôle aride de l'axe d'aridité édaphique. Les espèces de type climacique de Nazinga comportent les 3 sous-types : spécialistes des milieux humides (*R. rattus*), spécialistes des milieux secs (*L. barbarus*) et généralistes (ensemble des autres espèces), mais, contrairement aux espèces ubiquistes, les espèces climaciques ne présentent plus que des spécialistes des milieux arides aux environs de Ouagadougou puis dans la région de la mare d'Oursi (*G. nigeriae, T. petteri*).

Métabolisme hydrique et aridité

Après injection aux rongeurs d'une dose connue d'eau tritiée (HTO) on estime, deux à quatre jours plus tard, le taux d'élimination d'HTO pour mesurer les vitesses de renouvellement de l'eau (VRE : moyennes des flux entrants et sortants d'eau) et l'équilibre hydrique (EH : différence entre les flux entrants et sortants d'eau). Ces paramètres s'expriment en $ml.kg^{-1}.j^{-1}$ ou en $ml.kg^{-0}.82.j^{-1}$, mais leur signification physiologique apparaît mieux quand on les exprime en pourcentage de la réserve d'eau corporelle (REC).

Aridité climatique et métabolisme hydrique

Les moyennes de VRE et EH (fig. 3) d'une dizaine d'espèces de rongeurs capturés à Nazinga et à Oursi sont comparées en conditions d'alimentation riche ou pauvre en eau (en sombre et en clair). Les types ubiquiste ou climacique et les sous-types généraliste ou spécialiste des milieux humides et spécialiste des milieux arides sont rappelés en légende.

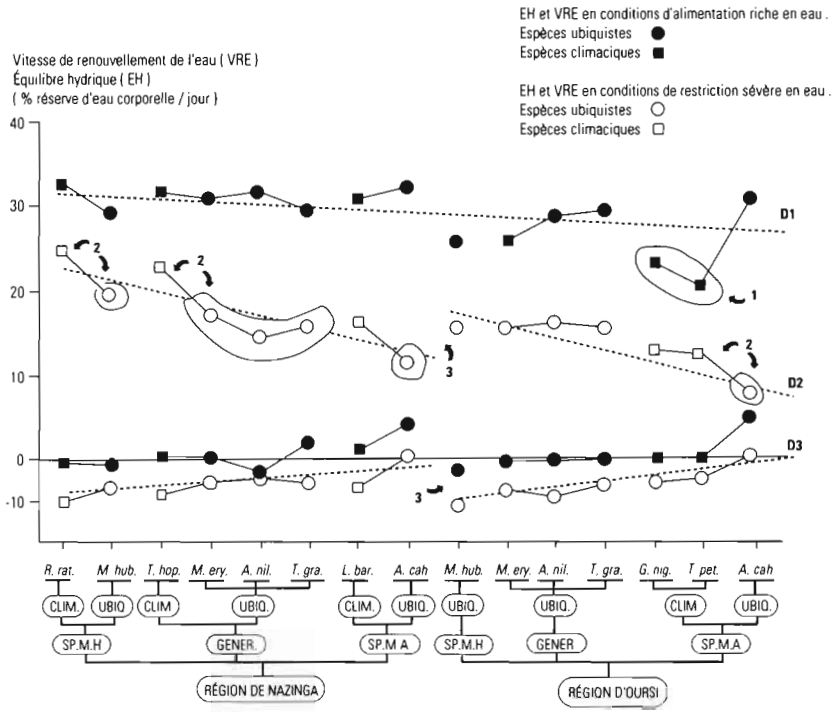


FIGURE. 3. - *Métabolisme hydrique des rongeurs et aridité climatique.*

La privation d'eau entraîne chez toutes les espèces une diminution des VRE de 43 à 47 % selon l'origine des espèces, le record étant détenu par *Acomys* spp. nov. (75 %) à Oursi. La moyenne globale des VRE des espèces originaires de Nazinga est plus importante que celle des espèces originaires d'Oursi, ceci, en conditions d'alimentation riche (31 ± 0, 5 % REC contre 26 ± 0, 7 % REC ; n = 274 ; p < 0, 01) ou pauvre en eau (17, 7 ± 0, 3 % REC contre 13, 7 ± 0, 3 % REC ; n = 214 ; p < 0, 01), mais, dans le détail des espèces, les VRE des ubiquistes ne présentent pas de différence significative selon leur origine.

En condition d'alimentation riche en eau, aucune différence n'est observée entre les VRE d'une espèce à l'autre (fig. 3, droite D1) ; ceci, à l'exception de l'ensemble (*G. nigeriae, T. petteri*) par rapport aux autres espèces (22, 3 ± 1, 3 % REC contre 28, 3 ± 0, 3 % REC ; n = 239 ; p < 0, 01 ; flèche 1). Après restriction en eau, les VRE des spécialistes des milieux arides sont moins importantes que celles des généralistes, elles-mêmes moins importantes que celles des spécialistes des milieux humides (droites D2). Au sein d'un même sous-type (spécialiste ou généraliste), les VRE des ubiquistes sont moins importantes que celles des climaciques (flèche 2).

Les rongeurs sont en équilibre hydrique en condition d'alimentation riche en eau (*Acomys* spp. nov. présente même un bilan hydrique positif de 3 % REC). Après restriction sévère en eau, un déséquilibre hydrique négatif apparaît, décroissant des espèces spécialistes des milieux humides aux espèces généralistes puis aux espèces spécialistes des milieux secs (droites D3). La rupture des pentes des droites D2 et D3 montre la prévalence des conditions édaphiques sur les conditions climatiques (flèche 3).

ARIDITÉ ÉDAPHIQUE ET MÉTABOLISME HYDRIQUE

Les moyennes des paramètres VRE et EH (fig. 4A et B) de 18 groupes de populations de rongeurs sont calculées :

- selon le milieu d'origine (par ordre croissant d'aridité) :
  - cultures de contre-saison et cultures de sorgho (n°s 1 et 2),
  - cultures en milieux secs (n° 3),
  - milieux parcourus argilo-gréseux (n° 4),
  - milieux parcourus sableux (n° 5),
  - milieux «naturels» rocheux (n° 6) ;
- selon les conditions de mesure :
  - alimentation riche en eau (traits épais),
  - alimentation pauvre en eau (traits fins),
  - saison sèche (pointillés),
  - saison pluvieuse (traits pleins),
  - saison fraîche (tiretés).

Comparaisons interspécifiques (en captivité)

Après restriction d'eau, les VRE sont plus faibles chez les populations des milieux arides (ensemble I) que chez les populations des milieux humides (ensemble II). Les conditions d'alimentation riche en eau ne permettent pas de mettre en évidence une telle influence de l'aridité édaphique sur les VRE ; dans ces conditions, *M. huberti*, spécialiste des milieux humides, se classe avec des populations qui vivent en milieu aride (groupe I') ; *Acomys* spp nov., spécialiste des milieux arides, se classe avec des populations qui occupent des milieux humides (groupe II').

Comparaisons intraspécifiques (dans la nature)

Les VRE sont moins importantes au pôle aride qu'au pôle humide de la répartition des espèces généralistes, ceci en conditions d'alimentation riche en eau (traits épais) ou pauvre en eau (traits fins).

Évolution saisonnière des moyennes des VRE

Les VRE de toutes les populations sont voisines en saison sèche (pointillés) et après restriction en eau (traits épais), sauf les VRE de *A. niloticus*, très élevées en saison sèche et plus importantes (groupe n°s 3 et 4) que celles mesurées en alimentation riche en eau (37, 9 ± 3, 3 % REC contre 22, 4 ± 2, 1 % REC ; n = 24 ; p < 0, 01 ; ensembles ponctués). En saison pluvieuse, les VRE des spécialistes des milieux humides et des généralistes qui vivent au pôle humide de leur répartition, sont proches des VRE mesurées en condition d'alimentation riche en eau. Au contraire, chez les spécialistes des milieux arides (à l'exception de *Acomys* spp. nov.) et chez les généralistes qui occupent le pôle aride de leur répartition, les VRE sont plus importantes en saison pluvieuse qu'en condition d'alimentation riche en eau (ensembles ponctués). Tant au pôle aride qu'au pôle humide de la répartition de *A. niloticus* les moyennes des VRE ne diffèrent pas significativement en saison pluvieuse et en condition d'alimentation riche en eau. Enfin, les VRE mesurées au cours de la saison fraîche se situent, chez toutes les espèces, à l'intérieur des limites de ce paramètre mesurées en captivité.

Équilibre hydrique

À part *Acomys* spp. nov. et le groupe *M. erythroleucus* n° 6, toutes les populations sont en équilibre hydrique (- 2 % REC < EH < + 2 % REC) en condition d'alimentation

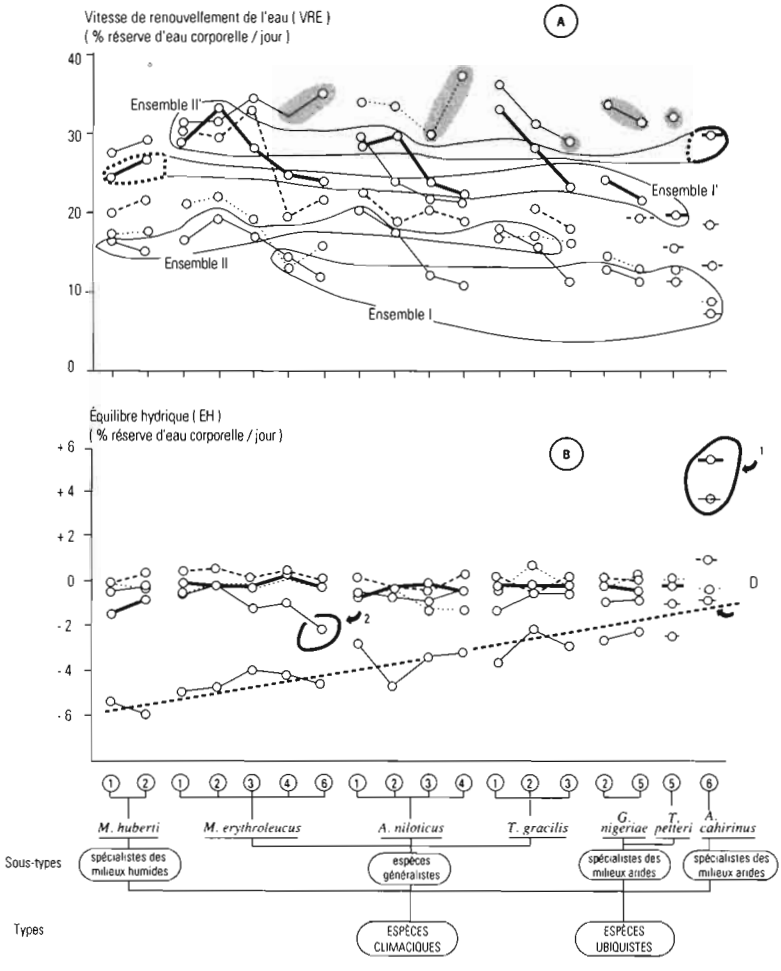


FIGURE 4. - *Métabolisme hydrique des rongeurs et aridité édaphique. Les moyennes de VRE (a) et EH (b) de 18 groupes de populations de rongeurs de la région d'Oursi (cultures en milieux humides en contre-saison [n° 1] ou non [n° 2] ; cultures en milieu sec [n° 3] ; milieux peu anthropisés argileux, sableux, argilo-gréseux et rocheux [n° 4, 5 et 6]) sont comparées selon les conditions de captivité et d'alimentation riche ou pauvre en eau (▬ , ——) et selon les conditions naturelles des saisons pluvieuse, fraîche et sèche (▬ , - - - , ····). Les vitesses de renouvellement de l'eau (VRE) et l'équilibre hydrique quotidien (EH) des rongeurs sont calculés par espèce.*
Les types (climacique et ubiquiste) et les sous-types (généraliste et spécialiste) sont indiqués en bas de figure dans chacune des deux régions étudiées : Nazinga et Oursi.

riche en eau et au cours des saisons sèche, pluvieuse ou fraîche. *Acomys* spp. nov. connaît un déséquilibre hydrique positif en condition d'alimentation riche en eau et en saison pluvieuse (+ 5, 5 % et + 3, 8 % ; flèche 1). *M. erythroleucus* n° 6 présente un déséquilibre hydrique (- 2, 4 % ; flèche 2) en saison sèche. En condition de restriction sévère en eau, un déséquilibre hydrique négatif est observé (- 6 % < EH < - 2 %), qui diminue en fonction de la tendance des espèces à occuper les milieux arides (droite D).

Reproduction et aridité

La figure 5A montre l'évolution de la position saisonnière des périodes de reproduction des principales espèces de rongeurs du climat soudano-guinéen au climat saharien. En climat soudano-guinéen, où il existe 2 saisons des pluies non aléatoires, *M. daltoni, L. striatus et T. hopkinsoni* présentent 2 ou 3 périodes annuelles de reproduction (GAUTUN, 1981). En climat soudanien, où il n'existe qu'une période pluvieuse non aléatoire, les rongeurs ne présentent plus qu'une période annuelle de reproduction ; la saison pluvieuse aléatoire des climats soudanien et sahélien ne modifie pas le nombre des périodes annuelles de reproduction, mais elle augmente la durée de la reproduction de certaines espèces de rongeurs ; elle n'est donc pas équivalente, du point de vue de son influence sur la reproduction des rongeurs, à la petite saison pluvieuse du climat soudano-guinéen.

Du climat soudano-guinéen au climat saharien, les positions relatives des périodes de reproduction et de la période pluvieuse se diversifient. Nous parlons de reproduction précoce, centrale ou tardive, selon que cette activité débute avant, pendant ou après la période pluvieuse non aléatoire la plus proche. En climat soudano-guinéen, les périodes de reproduction de *L. barbarus*, la deuxième période de reproduction de *M. daltoni* et la troisième période de reproduction de *T. hopkinsoni* sont de type central, alors que les premières périodes de reproduction de *M. daltoni* et de *T. hopkinsoni* ainsi que la deuxième période de reproduction de *T. hopkinsoni* sont de type tardif. En climat soudanien, la reproduction de la majorité des espèces, de type central, débute en saison pluvieuse et se prolonge pendant la saison fraîche, mais *A. niloticus* présente une reproduction tardive de la mi-saison fraîche à la mi-saison sèche. En climat sahélien, la reproduction de type précoce apparaît en fin de période d'estivation, avant la saison pluvieuse, et se prolonge jusqu'au début de la saison sèche l'année suivante (*G. nigeriae* et *T. petteri*). En climat saharien, le type de reproduction précoce (exemple de *G. gerbillus d'après* KLEIN *et al.*, 1975) est remplacé par le type opportuniste adapté à l'aléa de la pluviométrie.

Quant à l'influence de l'aridité édaphique sur les périodes de reproduction, remarquons que *M. erythroleucus* présente une reproduction plus avancée au pôle aride qu'au pôle humide de sa répartition (fig. 5B ; groupe n° 6). Enfin, la pluviométrie importante et précoce de l'année 1986 n'influence la reproduction que des 2 espèces qui ont pullulé. En 1986, la reproduction de *G. nigeriae* devient très précoce et durable, et la reproduction de *A. niloticus* devient continue.

DISCUSSION

Modification des peuplements en rongeurs et aridité

Les notions d'aridités climatique et édaphique nous permettent de définir des types d'espèces ubiquiste ou climacique, et des sous-types d'espèces généraliste ou spécialiste. L'aridité climatique entraîne une sélection des espèces climaciques spécialistes des milieux arides, alors que l'aridité édaphique provoque un retrait des milieux arides des ubiquistes généralistes. Il en résulte une diminution du nombre des espèces de rongeurs sur l'axe d'aridité climatique du climat subsoudanien (18 espèces) au climat sahélien (10 espèces) et une diminution du nombre des espèces de rongeurs sur l'axe d'aridité édaphique en région sahélienne. À Oursi, il existe 5 espèces de rongeurs au

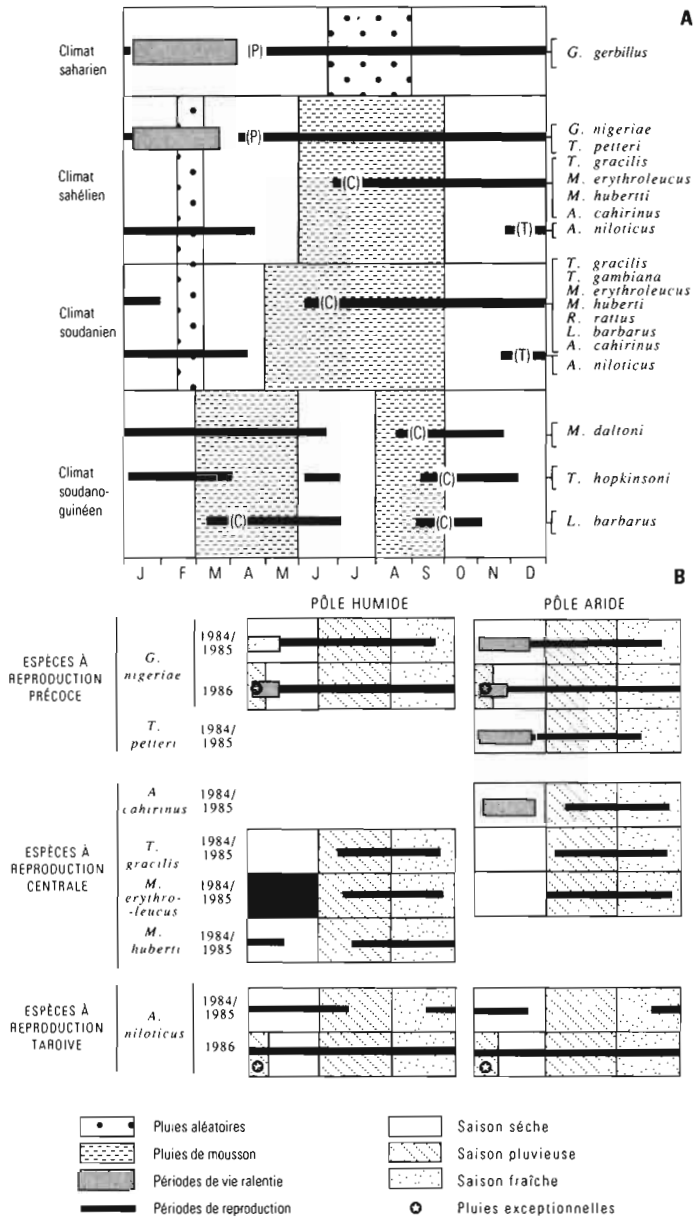


FIGURE 5. - *Reproduction et aridité. Présentation de l'évolution des types de reproduction précoce (P), centrale (C) et tardive (T) en fonction des climats, des effets de la pluviométrie et des conditions édaphique sur la reproduction.*

pôle humide et 1 à 2 espèces au pôle aride, alors qu'à Nazinga, le nombre d'espèces est identique aux 2 pôles ; les espèces adaptées à l'aridité n'occupent probablement pas les milieux humides pour des raisons de compétition. Retenons que la diminution du nombre des espèces observée sur l'axe d'aridité édaphique est une fonction croissante de l'aridité climatique.

Mobilité des rongeurs et aridité

En région sahélienne, nous avons montré à Oursi, que, à l'exception de *Acomys* spp. nov. qui possède de petits domaines vitaux en raison de son insularité, les mâles des espèces spécialistes des milieux arides et des populations des espèces généralistes qui vivent au pôle aride de leur répartition ont les domaines vitaux les plus importants et les plus mobiles : la mobilité des rongeurs est donc une fonction croissante de l'aridité.

HUBERT *et al.* (1981) et POULET *et al.* (1981) montrent, respectivement à Bandia et à Fété-Olé, au Sénégal, qu'un supplément alimentaire, en favorisant la sédentarisation des animaux, entraîne une diminution de la taille et des déplacements des domaines vitaux. La mobilité des rongeurs étant, *a priori*, fonction des ressources disponibles, ces résultats permettent d'émettre l'hypothèse que l'augmentation des domaines vitaux observée en région sahélienne résulte d'une raréfaction des ressources disponibles. Pourtant, les rongeurs sahéliens des milieux arides sont essentiellement granivores, et les disponibilités en graines enfouies sont très importantes dans les milieux étudiés (ces graines conservent d'ailleurs longtemps leur pouvoir germinatif) ; de plus, ces espèces accumulent d'énormes réserves, aussi, la raréfaction des disponibilités alimentaires n'explique pas à elle seule l'augmentation de la taille des domaines vitaux. Le suivi écophysiologique des populations de rongeurs de la région d'Oursi montre, dans les milieux arides étudiés, qu'il existe des microfoyers isolés de femelles, que visitent des mâles dont l'extrême mobilité permet d'assurer le brassage génétique. Cette répartition semble permettre de localiser la reproduction dans des zones favorables (creux interdunaires à recouvrement herbacé partiel). Si l'on tient compte du fait que l'amplitude des variations saisonnières d'abondance des rongeurs est plus marquée dans les milieux élevés arides que dans les milieux bas humides (*G. nigeriae* détient le record régional des extrema saisonniers d'abondance en milieu dunaire : 0-164 ind.ha^{-1}), le type de répartition des ressources alimentaires dans les milieux arides de la zone sahélienne se traduit par des concentrations saisonnières temporaires et monospécifiques en rongeurs sont le siège d'une très forte compétition intraspécifique. La répartition et l'écologie des rongeurs désertiques ont été très étudiées ; citons les travaux de PETTER (1961), pour les déserts de la région paléartique, et ceux de GRENOT et SERRANO (1979, 1982), dans le désert de Chihuahua au Mexique. Ces derniers auteurs montrent finalement que «la taille des domaines vitaux dépend du mode d'exploitation du milieu en rapport avec la compétition et les ressources disponibles». Cette augmentation du domaine vital suppose des capacités locomotrices élevées ; Petter a obtenu des distances de recapture qui vont jusqu'à 3 800 m (chez *Meriones crassus*, dans le Sahara, en 1969). Elle suppose également un sens de l'orientation et une mémoire des lieux développés (PETTER, 1987). Si, malgré la diminution observée du nombre des espèces dans les milieux arides, la raréfaction des disponibilités alimentaires impose une augmentation de la taille des domaines vitaux des rongeurs, c'est bien que la compétition

interspécifique augmente avec l'aridité. En résumé, le nombre des espèces diminue avec l'aridité, mais la répartition ou la raréfaction des ressources énergétiques est telle que l'on observe finalement une augmentation des compétitions, intraspécifique en milieu sahélien, interspécifique en milieu saharien.

Aridité et métabolisme hydrique des rongeurs

INFLUENCES D'ORDRE QUANTITATIF

Une restriction en eau entraîne un effondrement des VRE de 43 % ou de 47 %, selon l'origine des espèces à Nazinga ou à Oursi. Les VRE des généralistes (mesurées en conditions d'alimentation riche ou pauvre en eau) sont moins importantes dans les milieux arides que dans les milieux humides ; Ces résultats sont en accord avec ceux de RICHEMOND *et al.* (1960, 1962), ROUFFIGNAC et MOREL (1965), MAIGA (1984) et ZNARI (1985).

BRADSHAW *et al.* (1976) montrent que les VRE de Meriones shawi, une espèce non désertique, sont de l'ordre de 31 % REC et de 10 % REC, selon les conditions d'alimentation riche ou pauvre en eau : la restriction hydrique entraîne donc une chute de 66 % des VRE de cette espèce, comparable à celle de *Acomys* spp. nov. (75 %). Nous avons montré (SICARD *et al.*, 1985) que la réduction des flux entrants est compensée par une augmentation de la consommation alimentaire (*Mus musculus domesticus*) ou correspond à une réduction efficace des pertes d'eau (*Mus spretus*). Le déficit hydrique observé après privation en eau indique que la réduction des flux entrants (eau de boisson, eau d'hydratation des aliments et eau métabolique) n'est pas suivie d'une réduction équivalente des flux sortants (urine, fèces et évaporation pulmo-cutanée).

Le mode de vie terricole des rongeurs en atmosphère saturée en eau permet de limiter leur évaporation pulmo-cutanée (PETTER *et al.*, 1984) ; de plus, les espèces désertiques ont un pouvoir de concentration urinaire très élevé : SCHMIDT-NIELSEN et SCHMIDT-NIELSEN (1961) ont montré que la pression osmotique du rat-kangourou est voisine de 5 000 mOsmoles.l^{-1}. WEISSER *et al.* (1970), KAISSLING *et al.* (1975), BANKIR *et al.* (1979), JAMISON et ROUFFIGNAC (1979) et ROUFFIGNAC *et al.* (1969, 1973, 1981) ont également montré que le développement, l'organisation et la vascularisation de la zone médullaire des reins sont les supports anatomiques et physiologiques des capacités de concentration urinaire de *Psammomys*, des Meriones, du chinchilla et dans une moindre mesure du goundi. Si les différences inter- et intraspécifiques des VRE apparaissent mieux en condition de manque d'eau qu'en condition d'alimentation riche en eau, c'est justement que la restriction hydrique met en jeu l'aptitude des espèces à limiter leurs pertes d'eau. La réduction des disponibilités en eau met en évidence les adaptations des espèces à l'aridité car la réduction des flux entrants qui en découle, induit un déséquilibre hydrique négatif inversement proportionnel à l'aptitude des espèces à réduire leurs pertes d'eau ; aptitude qui repose sur des adaptations comportementales (vie nocturne et terricole), anatomiques et physiologiques (fonction rénale).

Les VRE des rongeurs (HOLLEMAN et DIETERICH, 1973), et plus généralement des marsupiaux et des euthériens (NICOL, 1978), sont plus importantes quand il s'agit d'espèces propres à des régions humides que lorsqu'il s'agit d'espèces de régions arides. Les résultats (*cf. supra*) montrent, de même, que les VRE des rongeurs sont globalement plus importantes à Nazinga qu'à Oursi. Il ne s'agit pas d'une influence directe de l'aridité climatique sur les VRE car les différences intraspécifiques entre les VRE des ubiquistes de Nazinga et ceux d'Oursi ne sont pas significatives ; Il s'agit plutôt d'une influence indirecte de l'aridité climatique sur les VRE par l'intermédiaire de son

influence sur la composition en espèces des peuplements de rongeurs : les spécialistes des milieux arides sont plus nombreux à Oursi qu'à Nazinga. Les comparaisons interspécifiques au sein d'un même sous-type (segments continus, fig. 3) montrent que les VRE des espèces climaciques sont plus élevées que celles des espèces ubiquistes. Dans la plupart des cas, les différences entre les sous-types sont inférieures ou égales aux différences entre les types (incidence de l'aridité édaphique). Quelles que soient les conditions de disponibilité en eau, les comparaisons intraspécifiques des VRE aux pôles humide et aride de répartition des ubiquistes montrent bien l'incidence de l'aridité édaphique sur la diminution des VRE. Notons que les résultats (*cf. supra*) ne sont pas aussi démonstratifs : les *maxima* et les *minima* des déséquilibres hydriques n'étant pas systématiquement observés aux pôles humide et aride d'une même espèce ubiquiste.

Influences d'ordre qualitatif

Les VRE de *M. shawi*, mesurées dans une zone relativement humide du Sud tunisien par Bradshaw *et al.* (1976), ont des valeurs intermédiaires entre celles mesurées en laboratoire en régime alimentaire riche ou pauvre en eau (10 % REC < 19 % REC < 31 % REC). La plupart des auteurs qui ont travaillé sur le terrain (Mullen, 1970 ; Lachiver *et al.*, 1978 ; Grenot et Serrano, 1979, 1982) obtiennent, dans ce cas, des VRE plus importantes qu'en condition d'alimentation riche en eau au laboratoire. Nous pensons que, si les conditions d'alimentation riche et pauvre en eau sont respectivement équivalentes à des situations favorables et défavorables (hypothèse confirmée par l'analyse des déséquilibres hydriques, *cf. supra*), alors les VRE mesurées sous ces conditions ont valeur de limites de régulation homéostasique qui offrent un cadre d'analyse des variations saisonnières des VRE mesurées *in natura*. En général (à l'exception de *A. niloticus* et de *Acomys* spp. nov.), les VRE des spécialistes des milieux humides et des populations au pôle humide des généralistes montrent une évolution saisonnière cohérente par rapport aux similitudes entre conditions de terrain et celles de laboratoire. Les VRE mesurées en saison sèche (pluvieuse) se rapprochent respectivement des valeurs obtenues en conditions d'alimentation pauvre (riche) en eau, et les VRE mesurées en saison fraîche ont des valeurs intermédiaires ; de plus, les VRE des spécialistes des milieux arides et des populations du pôle aride des généralistes présentent des valeurs «hors limite» en saison pluvieuse. Au contraire, les VRE de *A. niloticus*, mesurées en saison sèche, sont proches des VRE mesurées en condition d'alimentation riche en eau chez les populations des milieux humides (n°s 1, 2 et 3), voire elles dépassent largement ces dernières chez les populations des milieux arides (n° 4) ; en saison sèche, les VRE de *A. niloticus* sont «équivalentes» aux VRE mesurées en saison pluvieuse chez les autres espèces généralistes. Quant aux VRE de *Acomys* spp. nov., elles ne présentent aucune valeur saisonnière hors limite. Il existe donc une saison (saison sèche chez *A. niloticus*, saison pluvieuse chez les autres espèces) pendant laquelle les VRE des spécialistes des milieux arides et des populations du pôle aride des généralistes dépassent largement les valeurs mesurées en captivité en condition d'alimentation riche en eau.

Selon Mac Millen et Christopher (1975), les VRE de *Perognathus fallax* et de *Dipodomys merriami* sont maximales pendant la saison chaude et minimales pendant la saison froide (28 % contre 18 % REC). Selon Morris et Bradshaw (1980), les plus faibles VRE de *Pseudomys albocinereus* sont mesurées dans les milieux, ou durant les saisons, où les disponibilités en eau sont minimales, alors que les VRE les plus fortes sont mesurées dans les milieux, ou durant les saisons, où elles sont maximales. Plus généralement, Grenot et Serrano (1979), dans le désert de Chihuahua, montrent que les VRE sont fonction de la taille, du caractère nocturne ou diurne des espèces, mais

surtout des régimes alimentaires : *Dipodomys nelsoni*, *Dipodomys merriami* et *Perognathus penicillatus*, granivores nocturnes, ont des VRE qui varient de 78 à 117 $ml.kg^{-1}.j^{-1}$, alors que *Neotoma albigula* et *Spermophilus spilosoma*, herbivores spécialistes comparables aux *Psammomys* du Sahara et granivores/insectivores, présentent des VRE de 138-235 $ml.kg^{-1}.j^{-1}$. Cependant, les variations saisonnières de la teneur en eau des aliments ne sont pas les seules différences qui distinguent les conditions de terrain et celles de laboratoire. Si les conditions de captivité sont bien supportées par les rongeurs, ils peuvent rester pendant leur temps de captivité dans un état voisin du repos et, à conditions équivalentes d'alimentation, les différences observées entre les VRE de terrain et celles de laboratoire traduisent l'importance des dépenses énergétiques liées à l'activité locomotrice des rongeurs. Considérant le fait que les VRE saisonnières hors limites sont souvent plus élevées chez les mâles que chez les femelles (qui ont pourtant le même régime alimentaire), considérant également le fait que les mâles des populations du pôle aride des généralistes ont des VRE moins importantes que les femelles (SICARD, 1991), nous pouvons penser qu'une adaptation métabolique, particulièrement nette chez les mâles des populations des milieux arides, potentialise leur aptitude à la mobilité.

Aridité et période de vie ralentie

Les spécialistes climaciques (*G. nigeriae* et *T. petteri*) et ubiquistes (*Acomys* spp. nov.) des milieux arides ont une période de vie ralentie de la mi-saison fraîche à la mi-saison sèche :

- la période de vie ralentie de *Acomys* spp. nov. est la plus importante. Ce rongeur, insectivore temporaire ne fait aucune réserve et présente, avant sa vie ralentie, un fort déséquilibre hydrique positif (+ 6 % REC), de même qu'un gain pondéral (18 %) important ;
- la forme de vie ralentie de *G. nigeriae* est moins prononcée (des sorties du terrier sont suspectées). Cette espèce granivore constitue d'énormes réserves de *Cenchrus biflorus*, dans les nombreux diverticules de son terrier, et ne présente qu'un faible déséquilibre hydrique positif (+ 3 % REC) non accompagné de gain de poids avant sa vie ralentie. Selon PETTER et TRANIER (*comm. pers.*), *Gerbillus gerbillus* présente des périodes de torpeur comparables dans le Ténéré ;
- la torpeur observée chez *T. petteri* ressemble aux descriptions de BARTHOLOMEW et MAC MULLEN (1961), HUDSON et BARTHOLOMEW (1964), CHEW *et al.* (1965), MAC MULLEN (1965), sur *Peromyscus eremicus* et sur *Microdipodops pallidus*, avec des chutes de la température corporelle et du métabolisme de base. Cette espèce granivore fait peu de réserves et présente un déséquilibre hydrique négatif avant sa vie ralentie.

Il existe donc :

- une relation directe entre la nécessité de faire des réserves et l'importance de la vie ralentie ;
- une relation inverse entre la nécessité de faire des réserves de graines et la possibilité de faire des réserves de graisse corporelle ;
- une implication croissante des performances du métabolisme hydrique au déroulement de la période de vie ralentie de ces espèces en fonction de l'aridité édaphique.

Aridité et reproduction

Influences d'ordre quantitatif

Exception faite de *Peromyscus leucopus* (Bendel, 1959) et de *Rhabdomys pumilio* (Christian, 1979), un rôle positif de l'eau sur la fécondité des femelles et sur la durée de la reproduction est en général démontré ; c'est le cas de *M. erythroleucus* (Hubert, 1977), *G. gerbillus* (Klein *et al.* 1975), *T. gracilis* (Poulet, 1982), *G. paeba* et *Rhabdomys pumilio* (Christian, 1979). À Oursi, la pluviométrie importante et précoce de l'année 1986 n'augmente la durée de la reproduction que des 2 espèces qui ont alors pullulé : *G. nigeriae* et *A. niloticus*. L'analyse fine des résultats de piégeage permet de comprendre le manque d'effet de cette pluviométrie exceptionnelle sur la reproduction des autres espèces. En effet, dans les milieux anthropisés où vit *M. huberti*, les conditions d'aridité sont relativement indépendantes des facteurs climatiques ; l'importante pluviométrie de 1986 était cependant insuffisante pour permettre à *Acomys* spp. nov. de «briser» les barrières d'insularité des inselbergs granitiques ; *T. gracilis* et *M. erythroleucus* d'une part, *T. petteri* d'autre part, ont subi en 1986 la compétition de *A. niloticus* et de *G. nigeriae*, espèces à reproduction plus précoce. Notons cependant que, dans les incisions amont de la couverture (SAMT), aucun allongement de la reproduction de *M. erythroleucus* n'a été observé. L'influence positive de la pluviométrie sur la durée de la reproduction est donc surtout perceptible dans les milieux arides ou chez les espèces qui ont une reproduction située en dehors de la période pluvieuse (groupes d'espèces à cycles de reproduction précoce et tardif), c'est-à-dire quand la compétition interspécifique est la plus faible.

Influences d'ordre qualitatif

Rappelons qu'aux latitudes de notre étude, le nombre de périodes annuelles de reproduction est fonction du nombre de périodes pluvieuses non aléatoires ; les reproductions de type central et tardif du climat soudanien se maintiennent, mais les reproductions précoces dominent en climat sahélien ; en climat saharien, elles sont remplacées par des reproductions de type «opportuniste». Comme dans le cas des VRE, cette incidence de l'aridité climatique sur la précocité de la reproduction est indirecte (les ubiquistes ont le même type de reproduction en climats soudanien et sahélien) ; elle résulte de la modification de la composition des peuplements en rongeurs sur l'axe d'aridité climatique. En revanche, la reproduction précoce de *M. erythroleucus* dans les incisions arides de la couverture montre une influence directe de l'aridité édaphique sur cette activité.

L'influence de l'aridité sur la précocité de la reproduction pose le problème du déterminisme du déclenchement de cette activité. Si, chez les mammifères des régions tempérées, le photopériodisme est considéré comme le facteur déterminant dans la régulation des cycles annuels de reproduction (revue bibliographique *in* : Assenmacher et Boissin, 1986 ; Boissin et Canguilhem, 1988) son rôle, au contraire, n'est pas souvent envisagé chez les espèces des régions tropicales. Seuls, Klein (1975) et Khammar (1986) attribuent à la photopériode une importance certaine dans le déclenchement de

la reprodution de *G. gerbillus* et de *Psammomys obesus* en région saharienne. La mise en évidence d'une photo-gonado-sensibilité chez la plupart des espèces étudiées (SICARD *et al.*, 1991) nous a permis de montrer que la faible amplitude des variations annuelles de la photopériode est compensée par une augmentation de la photosensibilité des espèces étudiées. Des analyses en cours cherchent à préciser les rôles effectifs de la photopériode et de la période pluvieuse dans le déclenchement de la reproduction des rongeurs sahéliens.

En résumé :

- chez les espèces à reproduction centrale, le rôle de la photopériode est synergique du rôle du thermo-pluvio-périodisme ; on peut alors penser (BEATLEY, 1969 ; FRENCH *et al.*, 1974 ; REICHMAN et VAN DE GRAAFF, 1975 ; BEATLEY, 1976) que l'effet de l'eau sur le déclenchement de la reproduction passe par les variations de la teneur en eau des aliments consommés en saison pluvieuse (REYNOLDS, 1958 ; MC CULLOCH et INGLIS, 1961 ; BRADLEY et MAUER, 1971 ; GAUTUN, 1972a et b ; SOHOLT, 1978), ou par des substances spécifiques contenues dans les plantes en germination chez *Microtus montanus* (NÉGUS et BERGER, 1977 ; NÉGUS *et al.*, 1977) ;
- chez les espèces à reproduction tardive, la reproduction intervient hors des périodes d'inhibition photopériodique ;
- chez les espèces du groupe précoce, l'action activatrice de la photopériode est permanente toute l'année, en dehors des périodes d'estivation ; la reproduction intervient systématiquement en dehors des périodes d'estivation qui s'achèvent avant la saison pluvieuse en climat sahélien (type précoce au sens strict) ou après les pluies aléatoires en climat désertique (type opportuniste). Tout au long de l'axe d'aridité climatique, le rôle synchroniseur du thermo-photo-périodisme se substitue au rôle synchroniseur du pluviopériodisme.

Notion d'aridité

LES CRITÈRES DE L'ARIDITÉ CLIMATIQUE ET ÉDAPHIQUE

L'aridité résulte tout d'abord des conditions climatiques, «elle apparaît comme un aspect du climat mondial, et dépend de certaines particularités de la circulation atmosphérique générale» (HARE, 1961).

De nombreux auteurs ont utilisé les caractéristiques saisonnières de l'intensité et de la variabilité des facteurs physiques majeurs de l'environnement, eau, chaleur et éclairement, pour définir des indices climatiques à l'échelle régionale. Un rôle essentiel est généralement attribué aux facteurs eau et chaleur (EMBERGER, 1952 ; MC GINNIES, 1979) ; une recherche de plus en plus poussée tend à caractériser la variabilité des phénomènes climatiques de la zone aride (FLORET et PONTANIER, 1982). Cette distinction entre aspects quantitatifs (photo-thermo-pluviométrie) et aspects qualitatifs (photo-thermo-pluviopériodisme) des facteurs climatiques est essentielle pour la compréhension des adaptations biologiques à l'aridité, aussi avons-nous distingué :

- d'une part les gradients décroissants de l'intensité et de la durée de la période pluvieuse, opposés aux gradients croissants des moyennes annuelles des températures et de l'ensoleillement ;
- d'autre part le gradient décroissant de l'amplitude et la reproductibilité des variations annuelles de la pluviométrie (pluviopériodisme), opposé au gradient croissant de l'amplitude et de la reproductibilité des variations annuelles des températures et de l'éclairement (thermo-photo-périodisme).

Bon nombre de facteurs tampons s'interposent entre le climat régional et l'aridité édaphique finalement perçue par les rongeurs. En effet, à l'échelle locale, la production primaire dépend de la redistribution de l'eau en fonction des unités de paysage, des types de végétation et de sol, et des types d'activité humaine (STEWART, 1968 ; FLORET et PONTANIER, 1978), mais l'aridité perçue par les rongeurs va dépendre des variations saisonnières de la creusabilité, des organisations superficielles du sol et des réserves alimentaires. Nous retiendrons que le choix de critères pertinents de l'aridité édaphique dépend des êtres vivants étudiés (animaux, végétaux) et particulièrement de leur taille et de leurs caractéristiques biologiques spécifiques.

NIVEAUX DE PERCEPTION DES INFLUENCES DE L'ARIDITÉ

Les différences entre les influences des composantes climatiques et édaphiques de l'aridité sur la composition des peuplements en rongeurs et sur les fonctions biologiques étudiées sont résumées dans la figure 6. Les VRE et la position saisonnière des périodes de reproduction des ubiquistes sont suffisamment spécifiques pour qu'une mise en évidence de l'influence de l'aridité climatique ne soit pas possible à partir des différences intraspécifiques qu'elles présentent d'une région à l'autre (crochet 1). Seules, les comparaisons interspécifiques des espèces climaciques permettent cette mise en évidence (crochet 2). Les différences intraspécifiques entre les VRE et les périodes de reproduction des populations «polaires» des ubiquistes généralistes permettent, en revanche, de mettre en évidence les influences de l'aridité édaphique (crochet 3).

Les influences de l'aridité climatique sur les VRE et sur la reproduction des rongeurs ne sont caractérisables que par des comparaisons interspécifiques car elles montrent le résultat d'une évolution. Les influences de l'aridité édaphique sur les VRE et sur la reproduction des rongeurs peuvent être caractérisées à partir de comparaisons intraspécifiques car elles montrent les étapes d'une adaptation.

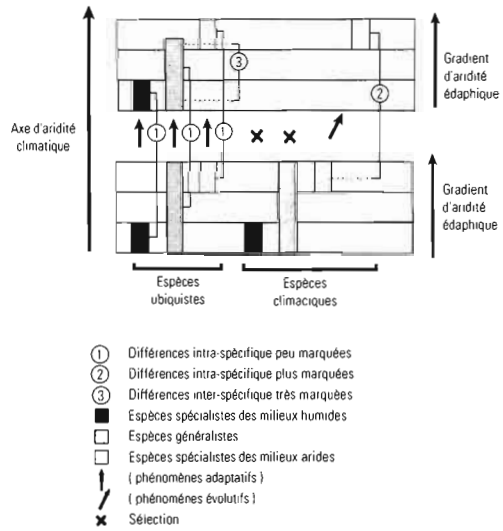


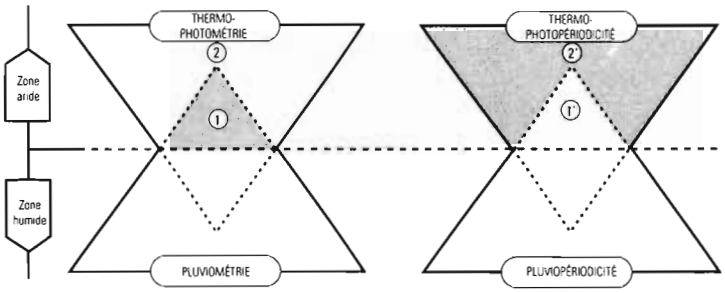
FIGURE 6

INFLUENCES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DE L'ARIDITÉ

L'aridité exerce une influence quantitative sur la diminution des VRE et sur l'augmentation de l'intensité-durée de la reproduction des rongeurs, mais elle exerce aussi une influence qualitative sur le calendrier des événements clés de la dynamique des populations de rongeurs : déclenchement des périodes de vie ralentie, des pics saisonniers de mobilité et des périodes de reproduction.

L'action quantitative (facilitante/limitante) de l'aridité sur le métabolisme et sur la reproduction des rongeurs s'exerce à travers les caractéristiques de la pluvio-thermo-photométrie, alors que l'action qualitative (synchronisatrice) de l'aridité sur ces fonctions biologiques s'exerce à travers les caractéritiques de la pluvio-thermo-photopériodicité. En effet, les facteurs climatiques «se disputent» un rôle synchroniseur sur l'axe d'aridité climatique en fonction de leur fiabilité (variation annuelle reproductible), perceptibilité (variation annuelle «de grande» amplitude) et de leur généralité (étendue géographique de définition).

La pluviométrie et le pluviopériodisme diminuent sur l'axe d'aridité climatique alors que la thermo-photométrie et le thermo-photopériodisme augmentent. On comprend donc pourquoi le rôle synchroniseur du thermo-photopériodisme se substitue au rôle synchroniseur du pluviopériodisme sur cet axe. De même, la diminution de la pluviométrie sur l'axe d'aridité rend ce facteur limitant, alors que l'augmentation de la thermo-photométrie ne risque pas de devenir limitante chez les rongeurs qui, du fait de leur mode de vie nocturne et terricole, peuvent réguler eux-mêmes les quantités de chaleur et d'éclairement reçus. Les adaptations du métabolisme hydrique et de la reproduction des rongeurs à l'aridité correspondent, sur le plan quantitatif, à une adaptation à la rareté des ressources trophiques et, sur le plan qualitatif, à l'acquisition d'une thermo-photosensibilité qui complémente la sensibilité au pluviopériodisme observée aux basses latitudes. L'aridité considérée aux échelles climatique et édaphique nous fournit un modèle d'étude des phénomènes d'évolution et d'adaptation des fonctions biologiques aux facteurs de l'environnement.



(1) : La pluviométrie devient (par manque) le principal facteur quantitatif limitant.
(2) : La thermo-photométrie ne devient pas (par excès) un facteur limitant essentiel chez les rongeurs du fait de leur vie terricole et nocturne.
(1') : La pluviopériodicité trop aléatoire voit son rôle synchroniseur diminuer.
(2') : La thermo-photopériodicité devient le principal synchroniseur

FIGURE 7

B. SICARD : *écophysiologiste*, ORSTOM, , BP 182, Ouagadougou-01, Burkina Faso
CNRS, UM III, URA 1197, place Eugène-Bataillon, 34000 Montpellier
Museum national d'histoire naturelle, 55 rue Buffon, 75005 Paris

Bibliographie

ASSENMACHER (I.) et BOISSIN (J.), 1986. - Endocrine regulations as adaptative mechanisms to the environment. Éditions du CNRS, Paris, 522 p.

BANKIR (L.), KAISSLING (B.), ROUFFIGNAC (C.) et KRIZ (W.), 1979. - The vascular organisation of the kidney of *Psammomys obesus*. *Anat. Embryol.*, 155 : 149-160.

BARTHOLOMEW (G. A.) et MAC MULLEN (R. E.), 1961. - Oxygen consumpsion, estivation and hibernation in the Kangaroo mouse, *Microdipodos pallidus*. *Physiol. Zool.*, 34 : 177-183.

BEATLEY (J. C.), 1969. - Dependence of desert Rodents on winter annuals and precipitation. *Ecology*, 50 : 721-724.

BEATLEY (J. C.), 1976. - Rainfall and fluctuating plant populations in relation to distributions and numbers of desert Rodents , in Southern Navada. *Oecologia*, 24 : 21-22.

BENDEL (J. F.), 1959. - Food as a control of a population of white footed mice, *Peromyscus leucopus noveboracensis* (Fisher). *Can. J. Zool.*, 37 : 173-209.

BOISSIN (J.) et CANGUILHEM (B.), 1988. - Les rythmes circannuels chez les Mammifères. *Arch. Int. Physiol. Bioch.*, 96 : 289-343.

BRADLEY (W. G.) et MAUER (R. A.), 1971. - Reproduction and food habits of Merriam's Kangaroo rat, *Dipodomys merriami*. *J. Mammal.*, 52 : 497-507.

BRADSHAW (S. D.), CHENITI (T.) et LACHIVER (F.), 1976. - Taux de renouvellement de l'eau et balance hydrique chez deux Rongeurs désertiques, *Meriones shawi* et *Meriones libicus* étudiés dans leur environnement naturel en Tunisie. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 282 : 481-484.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. - Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). Pluies en crues au sahel. *Trav. et doc.ORSTOM*, n° 190, 251 p.

CHEW (R. M.), LINDBERG (R. G.) et HAYDEN (P.), 1965. - Circadian rhytm of metabolic rate in pocket mice. *J. Mammal.* 46 : 477-494.

CHRISTIAN (D. P.), 1979. - Comparative demography of three namib desert Rodents : responses to the provision to the supplementary water. *J. Mammal.* 60 (4) : 679-690.

DAGET (Ph.), 1977. - Le climat mediterannéen : analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. *Vegetatio.*, 34 (2) : 87-103.

DUPLANTIER (J. M.), 1988. - Biologie évolutive de populations du genre Mastomys (Rongeur, Muridé) au sénégal. Thèse de doc. d'État. USTL, 215 p.

EMBERGER (L.), 1952. - Sur le quotient pluviothermique. *CR Acad. Sc. Fran.*, 234 : 2508-2510.

FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1978. - Étude des relations climat sol végétation de quelques formations végétales naturelles du Sud tunisien (production, bilan hydrique des sols). Inst. Reg. Arides, Médenine, Dir. ress. eau et sols, Tunis ; CNRS/Cepe, Montpellier ; ORSTOM, Paris, 196 p.

FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en tunisie présaharienne (Climat, sol, végétation et aménagement). ORSTOM, Paris. 467 p.

FRENCH (N. R.), MAZA (B. G.), HILL (H. O.), ASCHWANDEN (A. P.) et KAAZ (H. W.), 1974. - A population study of irradiated desert Rodents. *Ecol. Monograph.*, 44 : 45-72.

GAUTUN (J. C.), 1972a. - Périodicité de la reproduction de quelques Rongeurs d'une savane préforestière du centre de la Côte-d'Ivoire. *La Terre et la Vie*, 29 : 265-287.

GAUTUN (J. C.), 1972b. - Note sur la durée de gestation de *Lemniscomys striatus* en Côte-d'Ivoire. *Mammalia*, 36 : 309-310.

GAUTUN (J. C.), 1980. - Captures d'*Acomys* spp. dans le sud de la Haute-Volta (Banfora : 10° 38' N, 4° 45' O). *Mammalia*, 44 : 591-592.

GAUTUN (J.C.), 1981. - Écologie des Rongeurs de savane en moyenne Côte-d'Ivoire. Thèse doct. ès sciences, Paris-IV, 294 p.

GRENOT (C.) et SERRANO (V.), 1979. - Vitesses de renouvellement de l'eau chez cinq espèces de Rongeurs sympatriques, étudiés à la saison sèche dans leur milieu naturel (Désert de Chihuahua, Mexique). *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 288, sér. D : 1227-1230.

GRENOT (C.) et SERRANO (V.), 1982. - Distribution spatiale et structure des communautés de petits vertébrés du désert de Chihuahua. *C. R. Soc. Biogéogr.*, 58 : 159-191.

GROUZIS (M.), 1988. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse de doctorat d'État ès sciences, université de Paris-Sud. *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 336 p.

GUINKO (S.), 1984. - Végétation de la Haute-Volta. Thèse doct. ès sciences. Univ. Bordeaux-III. 2 tomes, 394 p.

HARE (K.F.), 1961. - Les causes de l'existence d'une zone aride. Histoire de l'utilisation des terres des régions arides. Unesco Paris, *Rech. Zone Aride* XVII : 27-33.

HOLLEMAN (D. F.) et DIETERICH (R.), 1973. - Body water content and turnover in several species of Rodents as evaluated by the tritiated water method. *J. Mammal.*, 54 : 456-465.

HUBERT (B.), 1977. - Écologie des populations de Rongeurs de Bandia (Sénégal), en zone sahélo-soudanienne. *La Terre et la Vie*, 31 : 33-100.

HUBERT (B.), COUTURIER (G.), POULET (A. R.) et ADAMS (F.), 1981. - Les conséquences d'un supplément alimentaire sur la dynamique des populations de Rongeurs du Sénégal. I : le cas de *Mastomys erythroleucus* en zone sahélo-soudanienne. *La Terre et la Vie*, 35 : 73-95.

HUDSON (J. W.) et BARTHOLOMEW (G. A.), 1964. - Terrestrial animals in dry heat : Estivators. Handbook of physiology. Section 4 : Adaptations to the environment (Ed. Dill D.B.) Baltimore : 541-550.

JAMISON (R. L.), ROINEL (N.) et ROUFFIGNAC (C.), 1979. - Urinary concentration mecanism in the desert Rodents *Psammomys obesus*. *Am. J. Physiol.* 236 : 448-453.

JOLY (F.), DEWOLF (Y.) et RIOU (G.), 1980. - Le bassin de la mare d'Oursi. Étude géomorphologique et géodynamique. Contraintes naturelles. Rapport université Paris-VII, 65 p.

KAISSLING (B.), ROUFFIGNAC (C.), BARRET (J. M.) et KRIZ (W.), 1975. - The structural organization of the kidney of the desert Rodents *Psammomys obesus*. *Anat. Embryol.*, 148 : 121-143.

KARASOV (W. H.), 1980. - Water flux and water requirement of antelope ground squirrels (*Ammospermophilus leucurus*) in laboratory and field. Thesis University of California, USA.

KHAMMAR (F.) et BRUDIEUX (R.), 1986. - Variations saisonnières de l'activité testiculaire du rat des sables (*Psammomys obesus*). Thèse d'État.

KLEIN (J. M.), POULET (A. R.) et SIMONKOVICH (E.), 1975. - Observations écologiques dans une zone enzootique de peste en Mauritanie : Les Rongeurs, et en particulier *Gerbillus gerbillus* Olivier, 1801 (Rodentia, Gerbillinae). *Cah. ORSTOM, sér. Ent. Med. et Parasitol.*, vol. XIII, 1 : 13-18.

LACHIVER (F.), CHÉNITI (R.), BRADSHAW (D.), BERTHIER (J. L.) et PETTER (F.), 1978. - Field study in Southern Tunisia on water turnover and tyroid activity. *C. R. Acad. Sci.* Paris, 282 : 481-484.

LEPRUN (J.-C.), 1977. - Esquisse pédologique au 1/50 000 des alentours de la mare d'Oursi avec notice et analyse des sols. DGRST-ORSTOM, Ouagadougou, 53 p.

MAC CULLOCH (C. Y). et INGLIS (J. M.), 1961. - Breeding period of the Kangaroo rat. *J. Mammal.*, 57 : 337-344.

MAC GINNIES (W. G.), 1979. - General description of desert areas in Arid lands ecosystems. Vol. 1, PBI 16, Goodol and Perry eds : 5-19.

MAC MULLEN (R. E.), 1965. - Aestivation in the cactus mouse *Peromyscus ereminus*. *Comp. Biochem. Physiol.*, 16A : 227-248.

MAC MULLEN (R. E.) et CHRISTOPHER (E. A.), 1975. - The water relations of two populations of non-captive desert Rodent. *Environmental Physiology of Desert Organisms*. Hadley N. F. (Eds) : 87-177.

MAIGA (M. S.), 1984. - Étude des bilans hydriques et énergétiques de quelques Rongeurs africains en captivité. *Mammalia*, 48 : 1-35.

MATTHEY (R.), 1954. - Nouvelles recherches sur les chromosomes de Muridae. *Caryologia*, 6 : 1-44.

MATTHEY (R.), 1966. - Le polymorphisme chromosomique des *Mus* africains du sous-genre Leggada. Révision générale portant sur l'analyse de 213 individus. *Rev. suisse de zool.*, 73 : 585-607.

MATTHEY (R.), 1967. - Cytogénétique de *Mus* (Leggada) *minutoïdes musculoïdes* Temm. et des formes voisines. Étude d'une population de Côte-d'Ivoire. XXVIIe CR annuel de la Société suisse pour les recherches sur l'hérédité. : 21-30.

MATTHEY (R.), 1969. - Chromosomes de Gerbillinae, genres *Tatera* et *Taterillus*. *Mammalia*, 33 : 522-528.

MATTHEY (R.), 1970. - Caryotypes de Muridés et de Dendromuridés originaires de République centrafricaine. *Mammalia*, 34 : 459-466.

MONIOD (F.), POUYAUD (B). et SÉCHET (P.), 1977. - Le bassin du fleuve Volta. *Monogr. Hydrol.*, ORSTOM, n° 5, 514 p.

MORRIS (K. D.), 1981. - The water and sodium metabolism of *Pseudomys albocinerus* (Gould), and other Australian Rodents. M. Sc. Thesis, Dep. of Zoology, University of Western Australia.

MORRIS (K. D.) et BRADSHAW (S.D.), 1980. - Water and sodium turnover in Coastal and Inland Populations of the Ash-Grey mouse. *Aust. Wildl. Res.* 29 : 519-533.

MULLEN (R. K.), 1970. - Respiratory metabolism and body water turnover rates of *Perognathus formosus* in its natural environment. *Comp. Biochem., Physiol.*, 32 : 259-265.

NÉGUS (N. C.) et BERGER (P. J.), 1977. - Experimental trigerring of reproduction in a natural population of *Microtus montanus*. *Science*, 196 : 1230-1231.

NÉGUS (N. C.), BERGER (P. J.) et FORSLUND (L. G.), 1977. - Reproductive strategy of *Microtus montanus*. *J. Mammal.*, 54 : 347-353.

NICOL (S. C.), 1978. - Rates of water turnover in Marsupials and Eutherians : A comparative review with new data on the Tusmanian devil. *Aust. J. Zool.*, 26 : 465-473.

PETTER (F.), 1961. - Répartition géographique et écologie des Rongeurs désertiques de la région paléartique. *Mammalia*, 25 , n° spp., 222 p.

PETTER (F.), 1969. - Retour au gite et nomadisme chez un Rongeur à bulles tympaniques hypertrophiées. *Mammalia*, 32 : 537-549.

PETTER (F.), 1987. - Particularités écologiques et physiologiques des Rongeurs désertiques. *Bull. Acad. Vét. de France*, 1987, 60 : 159-163.

PETTER (F.), LACHIVER (F.) et CHEKIR (R.), 1984. - Les adaptations des Rongeurs Gerbillidés à la vie dans les régions arides. *Bul. Soc. bot. Fr. Actual. bot.*, 2 : 365-373.

POULET (A. R.), 1982. - Mécanisme et déterminisme de la reproduction du cycle d'abondance de *Taterillus pygargus* et d'*Arvicanthis niloticus* (Rongeurs, Gerbillidés et Muridés) dans le sahel du Sénégal, de 1975 à 1977. Thèse de doctorat d'État, université de Paris-IV, F, 367 p.

POULET (A. R.), COUTURIER (G.), HUBERT (B.) et ADAM (F.), 1981. - Les conséquences d'un supplément alimentaire sur la dynamique des populations de Rongeurs au Sénégal : II/ Le cas de *Taterillus pygargus* en zone sahélienne. *La terre et la Vie*, 35 : 195-215.

POUYAUD (B.), 1986 . - Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Thèse doctorat d'État, Paris-Sud.

REICHMAN (O .J.) et VAN DE GRAFF (K. M.), 1975. - Association between injection of green vegetation and desert Rodents reproduction. *J. Mammal.*, 56 : 503-506.

REYNOLDS (M. G.), 1958. - Ecology of the Merriam Kangaroo rat on the grazzing lands of Southern Arizona. *Ecol. Monograph.*, 28 : 11-127.

RICHEMOND (C. R.), LANGHAM (W. H.) et TRUJILLO (T. T.), 1962. - Comparative metabolism of tritiated water by mammals. *J. Cell. Comp. Physiol.*, 59 : 45-53.

RICHEMOND (C. R.), TRUJILLO (T. T.) et MARTIN (T. W.), 1960. - Volume and turnover of body water in Dipodomys deserti with tritiated method. *Proc. Soc. EXP ; Biol. Med.*, 104 : 9-11.

ROUFFIGNAC (C.) et MOREL (F.), 1965. - Étude comparée du renouvellement de l'eau chez quatre espèces de Rongeurs dont deux d'habitat désertique. *J. Physiol.*, Paris, 58 : 309-322.

ROUFFIGNAC (C.), LECHENE (C.), GUINNEBAULT (M.) et MOREL (F.), 1969. - Étude par micro-ponction de l'élaboration de l'urine. III, chez le Mérion non diurétique et en diurèse par le mannitol. *Nephron*, 6 : 643-666.

ROUFFIGNAC (C.), MOREL (F.), MOSS (N.) et ROINEL (N.), 1973. - Micropuncture study of water and electrolyte movements along the loop of henley in *Psammomys* with special reference to magnesium, calcium and phosphorus. *Pflüger Arch.*, 344 : 309-326.

ROUFFIGNAC (C.), BANKIR (L.) et ROINEL (N.), 1981. - Renal function and concentrating ability in a desert Rodent : The Gundi (*Ctenodactylus vali*). *Pflüger Arch.*, 390 : 138-144.

SCHMIDT-NIELSEN (B.) et SCHMIDT-NIELSEN (K.), 1951. - A complete account of the water metabolism in Kangaroo rats and an experimental verification. *J. Cell. Comp. Physiol.*, 38 : 165-181.

SCHMIDT-NIELSEN (K.) et SCHMIDT-NIELSEN (B.), 1961. - Water metabolism of desert mammals. *Physiol. rev.*, 32 : 135-166.

SICARD (B.), 1987. - Mécanismes écologiques et écophysiologiques de régulation des variations régulières et irrégulières de l'abondance des Rongeurs du sahel (Burkina Faso). Thèse d'État, univ. Montp.-II.

SICARD (B.), 1991. - Intérêts biogéographiques de l'étude du métabolisme hydrique des Rongeurs. (Soumis à *Mamalia*).

SICARD (B.), NAVARAS (Y), NAVARO (M.), JACQUART (T.), LACHIVER (F.) et CROSET (H.), 1985. - Métabolisme hydrique des populations de *Mus musculus domesticus* Rutty et de *Mus spretus* Lataste soumises à divers régimes hydriques. *C.R. Acad. Sc.* Paris, 19, 699-704.

SICARD (B.), MAUREL (D.), GAUTUN (J.-C.) et BOISSON (J.), 1988a. - Activation ou inhibition testiculaire par la photopériode chez sept espèces de Rongeurs soudano-sahéliens. Première mise en évidence d'une variation circadienne de la photogonadosensibilité. *C. R. Acad. Sc.* Paris, 307 : 11-17.

SICARD (B.), TRANIER (M.) et GAUTUN (J.-C.), 1988b. - Un Rongeur nouveau du Burkina Faso (ex-Haute-Volta) : *Taterillus petteri*, spp. nov. (Rodentia, Gerbillidae). *Mammalia*, 52 : 187-198.

SICOT (A. M.), 1978. - ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan : Cycle de l'eau et bilan hydrique des écosystèmes dans la région de la mare d'Oursi. *Rap. multigr.* 230 p.

SOHOLT (L. T.), 1978. - Consumption of herbaceous vegetation and water during reproduction an development of Merriam's Kangaroo rat., *Dipodomys merriami. Amer. Midland. Nat.*, 98 : 445-457.

STEWART (Ph.), 1968. - Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. *Bull. Soc. hist. nat. Afrique du Nord*, Alger, 59 : 1-4 : 23-36.

TRANIER (M.), 1975. - Originalité du caryotype de *Gerbillus nigeriae* (Rongeurs, Gerbillidés). *Mammalia*, 39 : 703-704.

TRANIER (M.) et GAUTUN (J.-C.), 1979. - Recherches caryotypiques sur les Rongeurs de Côte-d'Ivoire : résultats préliminaires pour les milieux ouverts. Le cas d'*Oenomys hypoxanthus ornatus. Mammalia.*, 43 : 252-254.

VAN DER STRATEN (E.), 1975. - *Lemniscomys bellieri* a new species of Muridae from the Ivory Coast (Mammalia, Muridae). *Rev. Zool. afr.*, 89 : 906-908.

VAN DER STRATEN (E.) et VERHEYEN (W. N.), 1978. - Chromosome study and biometrical analysis of *Lemniscomys striatus* (L. 1758) and *Lemniscomys bellieri* (V. D. S. 1975) from Ivory Coast Mammalia, Muridae). *Bull. Carnegie Mus. of Nat. Hist.*, 6 : 41-47.

WEISSER (F.), LACY (F.), WEBER (H.) et JAMISON (R.), 1970. - Renal function in the Chinchilla. *Am. Physiol.*, 209 : 1706-1713.

ZNARI (M.), 1985. - Utilisation du sodium-22 et de l'eau tritiée (3HHO) pour l'estimation de la consommation alimentaire et des besoins hydriques de deux espèces de Rongeurs : *Acomys airensis* (Muridae) et *Meriones unguiculatus* (Gerbillidae). DEA, Paris-IV, 41 p.

Marie-Yvonne MOREL, Gérard J. MOREL

Instabilité climatique et communautés aviennes dans une région semi-aride de l'Ouest africain :

la steppe arbustive dans le Nord-Sénégal

LA ZONE D'ÉTUDE

Dans le groupe des régions arides (définies par leur faible pluviosité), le Sahel se classe parmi celles où la saison des pluies a lieu tous les ans à la même époque : pluies de mousson qui tombent, dans l'hémisphère nord, entre juin et octobre. Par ailleurs, comme les événements astronomiques (heures du lever et du coucher du soleil, par exemple) et climatiques (variations des températures, par exemple) se répètent toujours de la même façon d'une année sur l'autre, la vie des plantes et celle des animaux sont soumises aux mêmes conditions climatiques générales ; à l'unique saison des pluies, succède une longue saison sèche, d'abord fraîche (durée de l'éclairement journalier minimal de 11 h 8 min et températures relativement basses dont le minimum nocturne peut tomber à 10 °C), puis chaude (durée de l'éclairement journalier qui augmente jusqu'à 13 h 6 min et températures élevées dont le maximum diurne peut dépasser 45 °C).

Toutefois, ce climat n'est pas stable compte tenu des variations considérables de la hauteur et de la distribution des pluies, d'autant plus aléatoires que l'on remonte vers le nord, là où la pluviométrie est plus faible (moins de 500 mm). Il en résulte que jamais 2 saisons des pluies ne se ressemblent et qu'il faut toujours considérer à la fois hauteur et distribution des pluies pour qualifier une saison de «bonne» ou de «mauvaise» ; une courte saison des pluies peut être bonne si les pluies ont été régulièrement distribuées et, à l'opposé, une longue saison des pluies peut être mauvaise si les pluies sont par trop irrégulières. Cette irrégularité de la pluviosité a de multiples conséquences à la fois à court et à long termes. À court terme par exemple, sur le remplissage des mares (toutes de type pluvial) et sur la hauteur et la durée de la crue du fleuve (ici le Sénégal) et de ses affluents (tout au moins avant la mise en eau des barrages), sur les développements qualitatif et quantitatif de la végétation herbacée, composée à 98 % d'annuelles, et sur la production de fruits par les ligneux (BILLE, 1977 ; POUPON, 1979) ; à plus ou moins long terme, l'action est d'autant plus marquée que les années à bonne ou à mauvaise pluviosité se succèdent habituellement pendant un certain temps ; ainsi, pour l'Afrique de l'Ouest, une forte sécheresse a sévi dans les années 1911-1914, 1931, 1932 et depuis 1968, avec une sécheresse relative entre 1940 et 1949, et,

au contraire, une forte humidité dans les années 1950-1958 (BELTRANDO *et al.*, 1986). Flore et faune oscillent alors d'un type saharien (plus sec) à un type soudanien (plus humide) par élimination des espèces les plus sensibles.

Plantes et animaux ont alors réglé le déroulement de leurs activités dans le cadre d'un cycle annuel bien défini, mais ils ont dû les adapter aux fortes variations interannuelles des productivités liées à celles de la pluviosité.

Parmi les animaux, on peut choisir les oiseaux comme exemple de cette double tendance : régularité d'un cycle annuel en même temps qu'adaptation aux variations interannuelles. La région retenue est celle de Richard-Toll (16° 25' de latitude nord, 15° 42' de longitude ouest), à la frontière sénégalo-mauritanienne, sur la rive gauche du fleuve Sénégal et à une centaine de kilomètres de son embouchure dans l'océan Atlantique. Le choix des oiseaux de la région de Richard-Toll est dicté par la connaissance acquise par les auteurs de cet article au cours d'une trentaine d'années vécues dans la région.

L'AVIFAUNE

L'avifaune compte à la fois des migrateurs paléarctiques de passage ou hivernants et des afrotropicaux, les uns migrateurs, les autres résidents, tous nicheurs, à l'exception de quelques migrateurs (*Pterocles quadricinctus*, par exemple). Sur les 623 recensées pour la Sénégambie, 400 espèces environ sont connues du Nord-Sénégal (région de Richard-Toll) (MOREL et MOREL, 1990).

EXISTENCE D'UN CYCLE ANNUEL

Mouvements des oiseaux

Chez les espèces migratrices, tant paléarctiques qu'afrotropicales, les dates de passage sont remarquablement stables. Chez les espèces paléarctiques, l'arrivée des différentes espèces s'échelonne entre juillet, pour les plus précoces (*Philomachus pugnax, Anas querquedula*), jusqu'à la mi-octobre, pour les plus tardives (*Sylvia atricapilla*). Leurs départs commencent à la fin février (*Sylvia cantillans*) et se terminent en mai (*Phylloscopus collybita*). Chez les espèces afrotropicales, les premières arrivent courant mai et les dernières repartent en octobre (*Merops albicollis*).

Chez les espèces résidentes, il existe un certain erratisme lié aux fluctuations climatiques annuelles. À la faveur des pluies, les oiseaux se dispersent sur toute la steppe et se replient en fin de saison sèche sur les bords du fleuve et du lac (dont les forêts d'*Acacia nilotica*) (MOREL, 1968). En steppe arbustive, loin des points d'eau, sur une parcelle de 25 ha, le nombre d'espèces passe de 35 ± 5 espèces, à la fin de la saison des pluies, à 18 ± 3 espèces, en fin de saison sèche (MOREL et MOREL, 1978b) ; parallèlement, la densité à l'hectare varie de 13 ± 7 à 3 ± 1 individus, et la biomasse de 460 ± 120 $g.ha^{-1}$ à 190 ± 70 $g.ha^{-1}$ (poids frais). Le changement d'habitat tient aux meilleures conditions climatiques des régions riveraines (température plus basse de quelques degrés, hygrométrie plus élevée) en même temps que l'assurance de trouver à boire, pour des oiseaux qui doivent s'abreuver tous les jours (essentiellement les espèces granivores). En effet, dans la steppe proprement dite, il y a absence de tout réseau hydrographique permanent et les seuls points d'eau sont les mares pluviales et maintenant les puits creusés pour l'abreuvement du bétail.

Cycle interne

Reproduction

Tout comme chez les espèces paléarctiques, le cycle des activités - mue et reproduction - s'inscrit dans un cadre annuel, mais il est infiniment plus complexe. En effet, chez les espèces paléarctiques, la saison de reproduction est limitée au seul printemps boréal, tandis que chez les espèces afrotropicales la reproduction peut avoir lieu à n'importe quel mois de l'année (cependant, pour un maximum d'espèces, en saison des pluies) et s'étendre sur un temps plus ou moins long (jusqu'à l'année entière). Ainsi, pour les 159 espèces dont les nids ont été trouvés dans la région de Richard-Toll (Morel et Morel, 1982) :

- 26 % (dont les migrateurs intertropicaux) nichent uniquement en saison des pluies ;
- 45 %, en saison des pluies et aussi en saison sèche ;
- 23 %, uniquement en saison sèche ;
- 6 %, toute l'année.

Ces données montrent, d'une part, l'existence et la disponibilité, en toute saison, des ressources du milieu (nécessaires à la production des œufs, à la construction du nid et à l'élevage des poussins) et, d'autre part, les exigences très différentes des espèces aviennes, certaines si précises et si complexes que la reproduction ne peut avoir lieu qu'à une période de l'année. À titre d'exemple, prenons le cas des espèces qui dépendent des plantes herbacées (presque toutes annuelles et dont le développement est lié aux pluies), soit pour la construction de leurs nids, soit pour l'élevage de leurs poussins.

Construction des nids

C'est seulement pendant une très courte période de l'année que les Plocéidés (par exemple *Ploceus cucullatus, Quelea quelea*) peuvent construire leurs nids car, pour en tisser les parois, ils ont besoin d'un matériau déjà long, mais encore flexible, donc vert ; il leur est fourni par les tiges des graminées annuelles en fin de croissance avant épiaison. Ce stade est atteint au milieu de la saison des pluies, ce qui détermine la date de reproduction des espèces qui les utilisent dans la construction de leur nid. En outre, si les parents nourrissent principalement d'insectes leurs jeunes pendant l'élevage au nid, les graines des graminées se forment et mûrissent durant ce temps, si bien qu'à leur sortie du nid, devenus granivores, les jeunes trouvent aisément à se nourrir.

Élevage des poussins

À l'opposé, c'est pendant une très longue période, sinon l'année entière, que les espèces granivores strictes (c'est-à-dire y compris pendant l'élevage des poussins) peuvent se reproduire, assurées qu'elles sont de toujours trouver des graines, même si le stock s'amenuise du fait de leur consommation et de la germination en début de saison des pluies. Pour ces espèces, la seule contrainte vient des conditions de la construction du nid. Elle ne joue pas dans le cas des tourterelles (du genre *Streptopelia*) qui construisent leurs nids dans les ligneux avec des branchettes mortes, toujours faciles à trouver, mais bien dans le cas des espèces qui nichent à même le sol. C'est ainsi que *Pterocles exustus* (Ptéroclididés) a besoin d'un sol nu pour y creuser la cavité de son nid, condition remplie seulement dans la deuxième partie de la saison sèche avec l'éclaircissement du couvert végétal.

MUE ET REPRODUCTION

Du fait de la disparité de la longueur des saisons de reproduction, les relations entre mue et reproduction s'en trouvent compliquées, mais elles restent inscrites (à l'exception d'une famille) dans un cadre annuel.

Chez les espèces à courte saison de reproduction, elles se succèdent, tout comme chez les espèces paléarctiques, mais à des dates différentes. Ainsi, pour les nicheurs de la seule saison des pluies, la mue postnuptiale a lieu d'octobre à janvier ; elle peut être suivie d'une mue prénuptiale entre mars et juin, dans le cas d'un dimorphisme saisonnier. Chez les Plocéidés, par exemple, on observe une seule mue postnuptiale chez *Passer luteus*, ainsi qu'une mue postnuptiale et une mue prénuptiale chez le mâle de *Quelea quelea*. Chez les espèces dont la saison de reproduction est à la fois longue (dix mois) et assurée par les mêmes parents, le temps laissé entre la fin de la saison de reproduction et le début de la nouvelle est trop court pour le déroulement de la mue : il y a chevauchement. Ceci a été montré chez un petit Estrildidé, *Lagonosticta senegala*, qui se reproduit de fin juillet à début mai. Enfin, chez les espèces à saison de reproduction ininterrompue, la reproduction et la mue sont indépendantes l'une de l'autre. Chez *Streptopelia roseogrisea* (Colombidés), le déroulement de la mue est particulièrement long et compliqué (MOREL, 1983).

Une nouvelle question se pose pour ces espèces à longue saison de reproduction : comment les différentes cohortes (oiseaux nés un même mois) s'intègrent-elles dans la population adulte et à quel âge commencent-elles à se reproduire ? 2 solutions ont été adoptées :

- quand la saison de reproduction s'arrête quelques semaines, le plumage adulte et la maturité sexuelle sont acquis à la même date, au début de la nouvelle saison de reproduction, pour toutes les cohortes. Ainsi, tous les *Lagonosticta senegala* nés pendant la même saison de reproduction (juillet à mai) sont aptes à se reproduire au début de la nouvelle saison de reproduction (fin juillet/début août), si bien qu'il y a accélération de la mue au fur et à mesure qu'on avance en saison ; la maturité sexuelle est alors acquise de plus en plus jeune ;
- quand la saison de reproduction est ininterrompue, les juvéniles achèvent leur mue et sont aptes à se reproduire toujours au même âge quelle que soit la date de leur naissance ; ainsi les tourterelles du genre *Streptopelia* et *Passer domesticus indicus* ont acquis leur plumage adulte et peuvent se reproduire à six mois environ (MOREL, 1988 ; MOREL et MOREL, 1990).

Il en résulte 2 stratégies différentes de la démographie ; en effet, la population adulte se voit grossir de jeunes recrues :

- en une seule fois, au début d'une nouvelle saison de reproduction ; c'est le cas des espèces tropicales à courte saison de reproduction (certains Plocéidés) ou à longue saison de reproduction mais à durée de mue juvénile et d'acquisition de la maturité sexuelle variables (*Lagonosticta senegala*) ;
- régulièrement, tous les mois, du fait de la fixité de la durée de la mue juvénile et de l'acquisition de la maturité sexuelle (*Streptopelia* et *Passer domesticus*).

EFFETS DE L'IRRÉGULARITÉ CLIMATIQUE

Comment l'irrégularité climatique, caractéristique de ces régions, peut-elle jouer sur les espèces aviennes dont le cycle annuel vient d'être montré ?

Effets sur la composition de l'avifaune

Les richesses trophiques disponibles associées à la présence de l'eau modèlent qualitativement et quantitativement la composition de l'avifaune. Les variations d'un mois à l'autre et d'une année sur l'autre ont bien été mises en évidence lors de comptages mensuels répétés pendant treize ans sur une parcelle de 25 ha en steppe arbustive (Fété-Olé, 16° 13' de latitude nord, 15° 16' de longitude ouest) à une cinquantaine de kilomètres des bords du fleuve Sénégal. En ce qui concerne la richesse spécifique, le passage du maximum de la fin de la saison des pluies au minimum de la fin de saison sèche obéit à l'un des 3 principaux schémas suivants :

- dans une année à pluviosité moyenne et bien distribuée (302 mm, comme en 1969-70), la richesse spécifique demeure élevée de novembre à février (28 espèces), puis décroît lentement, 24 en mars, 22 en avril, avant d'atteindre le minimum en mai (15) ;
- dans une année à très mauvaise pluviosité (38 mm, comme en 1972-73), la richesse spécifique tombe de 35 espèces, en septembre, à 18, en octobre ; elle se maintient à ce nombre jusqu'en avril et se réduit à 12 en mai ;
- dans des années intermédiaires, la mauvaise distribution des pluies pourtant moyennes (300 mm) et la venue des pluies en hiver modifient quelque peu les schémas précédents. Ainsi en 1976-77, le nombre d'espèces, encore élevé en décembre (26), tombe à 20 en janvier et en février, mais remonte ensuite autour de 25, les mois suivants, pour n'atteindre un minimum de 20 qu'en juin.

La richesse spécifique du mois de juillet permet de suivre l'action des pluies sur les mouvements des oiseaux ; cette richesse demeure faible en l'absence de pluie (18 ou 19 espèces en 1973, 1974 et 1976) ou remonte de façon très nette si les premières pluies sont déjà tombées (27 espèces en 1980 et même 33 en 1979 !).

Un exemple assez spectaculaire de ces mouvements liés aux pluies est donné par la tourterelle pleureuse, *Streptopelia decipiens* ; celle-ci quitte les bords du fleuve avec les premières pluies et y retourne avec l'assèchement des dernières mares. Or, selon les années, les premières pluies tombent entre juin et août et les mares sont asséchées entre novembre et avril, si bien que la durée de son séjour en steppe arbustive dure plus ou moins longtemps suivant l'état de remplissage de ces mares.

Le rôle joué par ces mares dans la répartition des espèces est encore démontré par l'espèce paléarctique *Streptopelia turtur* qui hiverne dans la steppe arbustive uniquement les années où les mares sont encore en eau (MOREL, 1987) mais qui ne quitte pas le voisinage du fleuve et de ses tributaires lorsque ces mares font défaut.

Par ailleurs, la nécessité de grands plans d'eau pour les Anatidés paléarctiques rend leur hivernage dépendant des surfaces inondées, elles-mêmes tributaires de la crue et de la pluviosité ; les variations de leurs effectifs dans le parc du Djoudj, par exemple ces dernières années, s'expliquent par les disponibilités en eau de ce dernier (ROUX *et al.*, 1976).

Les ressources alimentaires jouent également un rôle important dans la distribution des espèces ; si l'on reprend l'examen des comptages effectués sur la parcelle de 25 ha, sur 128 espèces recensées au cours de l'étude, 10 seulement regroupent à elles seules 60 % des effectifs totaux (tabl. I). Par leur régime alimentaire à base de graines (sauf une espèce), elles se montrent particulièrement bien adaptées à exploiter les ressources de la steppe arbustive. Toutefois, leurs exigences sont différentes si bien que, suivant les disponibilités de l'année, c'est l'une ou l'autre de ces espèces qui devient dominante (c'est-à-dire l'une des 2 espèces numériquement les plus abondantes dans un comptage).

Tableau I - Caractéristiques écologiques des 10 espèces les plus abondantes à Fété-Olé (par ordre décroissant d'importance numérique)

Espèces			Poids	Type de	Lieu de	Habitat
Noms latins	Noms français	Famille	frais (g)	nourriture	nourriture	
Eremopterix nigriceps	Alouette-moineau à front blanc	Alaudidés	14	Graines / Insectes	Sol	Sol + arbres
Eremopterix leucotis	Alouette-moineau à oreillons blancs	Alaudidés	13	Graines / Insectes	Sol	Sol + arbres
Sporopipes frontalis	Moineau quadrillé	Plocéidés	17	Graines / Insectes	Sol	Sol + arbres
Mirafra javanica	Alouette chanteuse	Alaudidés	25	Graines / Insectes	Sol	Sol
Passer luteus	Moineau doré	Plocéidés	13	Graines / Insectes	Sol	Sol + arbres
Spreo pulcher	Étourneau à ventre roux	Sturnidés	65	Fruits / Insectes	Sol + arbres	Sol + arbres
Oena capensis	Tourterelle du Cap	Colombidés	35	Graines	Sol	Sol + arbres
Bubalornis albirostris	Alecto à bec blanc	Plocéidés	64	Graines / Insectes	Sol	Sol + arbres
Streptopelia roseogrisea	Tourterelle rieuse	Colombidés	140	Graines	Sol	Sol + arbres
Ploceus velatus	Tisserin à tête rousse	Plocéidés	19	Graines / Insectes	Sol + arbres	Sol + arbres

Tableau II - Années et nombre de mois où les espèces numériques les plus abondantes ont été trouvées dominantes (c'est à dire l'une des 2 espèces les plus nombreuses dans l'échantillon étudié)

Noms des espèces	Saisons des pluies*												Saison sèche*												Temps de dominance **				
aviennes	a	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	a	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	s. pluies a	s. pluies m	s. sèche a	s. sèche m	Total mois
Eremopterix nigriceps				1	1						1	1				8	8	8			4		1	7	4	(4)	6	(36)	40
Eremopterix leucotis		2	3	4	1	3	2		2			2	7	1			6			1	1		1		8	(19)	6	(17)	36
Sporopipes frontalis								2	2	2	2	1							6	7	4	6	8	6	5	(9)	6	(37)	46
Mirafra javanica		1									1	1	4						5	1	4	7		1	3	(3)	6	(22)	25
Passer luteus						1	1			2	1							1							4	(5)	1	(1)	6
Spreo pulcher	1	2	2				1		2	1	2		4	1	5				2			2	1		7	(11)	6	(15)	26
Oena capensis							2	1		1											1				3	(4)	1	(1)	5
Bubalornis albirostris							1	1	1											1	1				3	(3)	2	(2)	5
Streptopelia roseogr	3	1							1				4	2											3	(5)	2	(6)	11
Ploceus velatus																			2						0		1	(2)	2

*les années d'observation sont représentées par des lettres : entre parenthèses, la pluviométrie ; chaque année commence en juillet, date présumée des premières pluies :
a = 1969-70 (302 mm) ; c = 1971-72 (202 mm) ; d = 1972-73 (38 mm) ; e = 1973-74 (209 mm) ;
f = 1974-75 (316 mm) ; g = 1975-76 (311 mm) ; h = 1976-77 (302 mm) ; i = 1977-78 (127 mm) ;
j= 1978-79 (343 mm) ; k = 1979-80 (311 mm) ; l = 1980-81 (271 mm) ; m = 1981-82 (296 mm).

**Pour chaque saison, on donne le nombre de mois où l'espèce fut numériquement dominante ; le temps de présence totalise le nombre d'années et le nombre de mois : a = année ; m = mois .

Ainsi est dominante (tabl. II) :

- avant la sécheresse de 1972, *Streptopelia roseogrisea* ;
- après la sécheresse et pendant les saisons sèches de 1973-74, 1974-75, 1975-76 et 1981-82, *Eremopterix nigriceps*, espèce remarquable puisque, connue seulement en Mauritanie avant 1972, elle a étendu son aire géographique vers le sud (MOREL et MOREL, 1978b) ;
- en saison sèche depuis 1976, souvent *Sporopipes frontalis*.

Le remplacement d'une espèce de grande taille, *Streptopelia roseogrisea*, qui se nourrit essentiellement de graines, par 2 espèces de petite taille à régime mixte refléterait l'appauvrissement du milieu (particulièrement en graines), ce que suggère la diminution de moitié de la biomasse avienne en saison sèche entre le début et la fin des observations (408 ± 43 $g.ha^{-1}$ en 1969-70 et 213 ± 51 $g.ha^{-1}$ en 1981-82, poids frais).

Les densités à l'hectare varient également d'une année sur l'autre : minimales l'année de la sècheresse 1972-73 avec 3,3 ± 1,1 $individus.ha^{-1}$ et maximales en 1975-76 par exemple avec 9,9 individus ± 5,6 $individus.ha^{-1}$ (cela, en partie, dû à la présence de très nombreux *Passer luteus* en juillet 1975 et en juin 1976, si bien que la densité pour ces 2 mois est particulièrement élevée : 19,1 et 15,9).

L'hivernage des espèces paléarctiques subit aussi le contrecoup de ces modifications de milieu ; ainsi, en janvier (mois pris pour référence), toujours dans cette même parcelle de 25 ha, le minimum est de 3 espèces et de 6 individus, en 1981, et le maximum de 7 ou 8 espèces et de 25 individus, en 1970 et en 1972, soit une densité 4 fois plus grande ! (0,24 et 1,0 $individus.ha^{-1}$ respectivement).

Effets sur la reproduction

Les variations qualitatives et quantitatives de l'avifaune résidente sur cette steppe arbustive s'expliquent essentiellement par les fluctuations de la reproduction et par l'erratisme destiné à faire face aux changements de ressources. Sans méconnaître l'importance de la seconde (que nous avons déjà signalée lors des irruptions de *Passer luteus* et de *Eremopterix nigriceps* sur le quadrat de Fété-Olé), nous traiterons ici des fluctuations de la reproduction.

Ces variations de l'importance de la natalité peuvent être illustrées en prenant pour exemple toujours cette même parcelle de 25 ha ; 956 nids sont trouvés durant la période 1969-1976 ; le nombre moyen de nids par an et par hectare est nul pendant la sécheresse de 1972-73 ; il atteint son maximum en 1975-76 avec 25,6 nids (MOREL et MOREL, 1978a) (tabl. III) ; un total de 29 espèces (19 non-Passériformes et 19 Passériformes) y est trouvé en nidification, mais seuls les Colombidés (*Oena capensis, Streptopelia roseogrisea, S. senegalensis, S. vinacea*) nichent tous les ans, sauf bien sûr en 1972-73 ; nichent encore régulièrement *Pterocles exustus* et *Prinia clamans* (entre 1970 et 1976), *Eremomela icteropygialis* (de 1969 à 1975) et *Pytelia melba* ; la nidification des autres espèces est irrégulière, soit discrète une année ou l'autre, ou encore prend l'aspect d'une invasion ; *Passer luteus*, qui installe une colonie en juillet 1975, est responsable du nombre particulièrement élevé de nids cette année-là ; *Eremopterix leucotis* et *E. nigriceps* nichent pendant la saison sèche, la première de ces 2 espèces en 1973-74, en 1974-75 (sept mois) et en 1975-76, la seconde en 1973-74 et en 1974-75.

Il apparaît aussi que la durée de la nidification sur cette parcelle peut couvrir l'année entière (1969-70, 1974-75) ou bien être limitée à la saison des pluies et à quelques mois de saison sèche.

Un autre exemple de l'irrégularité de la longueur de la saison de reproduction est fourni par des comptages répétés, toujours dans cette même steppe, sur une parcelle

Tableau III - Variations saisonnières et annuelles de la reproduction de l'avifaune sur le quadrat de Félé-Olé entre 1969 et 1976

ANNÉES*	1969-70	1970-71	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76
ENSEMBLE DE LA FAUNE							
1. *Sur 25 ha*							
a. Nombre :							
de mois avec reproduction	12	7	10	0	6	12	7
d'èspèces nichant	15	11	15	0	13	13	14
b. Nombre moyen mensuel :							
d'èspèces nichant	3,2 ± 1,3	1,7 ± 2,1	2,0 ± 3,0	0	2,3 ± 2,9	4,0 ± 2,3	2,3 ± 3,0
de nids	7,5 ± 4,5	3,3 ± 4,3	3,5 ± 6,8	0	5,3 ± 7,1	7,5 ± 4,5	53,3 ± 175,1
c. Pourcentage de nids :							
Juillet-octobre (pluies)	36	85	79	0	73	34	98
Novembre-décembre	16	5	7	0	27	21	1
Janvier-mars	28	0	2	0	0	26	0,5
Avril-juin	20	10	12	0	0	9	0,5
2. *Par hectare*							
Nombre moyen de nids par an	3,3	1,6	1,7	0	2,4	3,6	25,6

*l'année commence en juillet, début de la saison des pluies, pour se terminer en juin de l'année suivante.

de 1 km², à proximité du lac de Guier (au lieu-dit Sam-Sam) entre juillet 1982 et octobre 1983 ; 48 nids sont trouvés entre juillet et octobre 1982, 11 en juillet, 16 en août et 21 en septembre ; les deux tiers sont des nids de Colombidés (14 pour *S. senegalensis* et 17 pour *S. roseogrisea*) ; ensuite, la reproduction s'est arrêtée sans reprendre, même pendant la saison des pluies de l'année suivante, ce qui nous a conduits à abandonner les observations en octobre 1983.

Les fluctuations de la reproduction tiennent évidemment au déroulement de la saison des pluies. À travers quelques exemples pris dans les différents modèles de reproduction présentés *supra* (saison limitée aux pluies, ou qui se prolonge en saison sèche, ou encore saison sèche uniquement), nous chercherons à montrer l'importance de la date des premières pluies et celle de la distribution de ces pluies au cours de la saison.

ESPÈCES À SAISON DE REPRODUCTION LIMITÉE À LA SAISON DES PLUIES : *QUELEA QUELEA* ET *PASSER LUTEUS*

Il est assez rare qu'une espèce avienne ait été suivie pendant de longues années par des chercheurs de différentes origines et dans plusieurs régions. C'est le cas de *Quelea quelea* (Plocéidé). L'importance des dégâts infligés aux cultures justifiait un tel intérêt ; de même, les moyens financiers consentis permettent d'affirmer que jamais un oiseau ne coûta aussi cher !

Quelea quelea (MOREL, 1968) est un passereau un peu plus petit que le moineau domestique, dont l'habitat est limité aux steppes à graminées annuelles de toute l'Afrique tropicale - pour la région qui nous concerne, à la zone sahélo-soudanienne. En dehors de la saison de reproduction, sa nourriture naturelle (par opposition aux céréales) consiste en *Echinochloa colona*, *Brachiaria* spp., *Panicum laetum*, *Dactyloctenium aegyptium*, de préférence là où ces herbes forment des tapis importants, car ces oiseaux vivent en bandes nombreuses qui pâturent en ordre serré. La nuit, les vols se rassemblent pour dormir par millions sur *Acacia nilotica*, sur les boisement denses de *Balanites* ou dans les roselières à Typha, non loin de l'eau. La reproduction s'effectue également de façon grégaire et les oiseaux paraissent chercher à s'entasser en plus grand nombre possible sur le plus petit espace, généralement peuplement mixte de *Acacia* et de *Balanites* sur steppe arbustive, parfois aussi sur *Acacia nilotica*. On trouve jusqu'à 200 à 300 nids par arbre et un hectare peut en héberger plus de 10 000 ; les oisillons sont nourris de graines de graminées additionnées d'insectes. Pour nourrir ces oisillons, rassemblés sur une faible surface, les parents doivent disposer, dans un rayon de quelques kilomètres, de champs de graminées assez homogènes et riches. Certes, le paysan africain, qui connaissait bien *Quelea quelea*, faisait de son mieux pour limiter les dégâts. Cependant, peu après la Seconde Guerre mondiale, vers 1950, les pays colonisateurs développèrent les cultures de céréales, le riz au Sénégal et dans le delta du Niger, au Mali, le blé en Afrique orientale et australe. On s'aperçut alors que les pertes dues aux oiseaux pouvaient compromettre l'entreprise. Non seulement ces oiseaux pullulaient littéralement, mais leur façon même de pâturer en vols denses augmentait leur pouvoir destructeur ; spécialisés dans l'exploitation des graminées sauvages denses, l'exploitation du riz ou du blé ne leur demandait aucun effort d'adaptation.

Ce qui peut être étonnant de nos jours, c'est que la vraie raison de l'explosion démographique (si explosion il y avait) de l'espèce n'était pas même soupçonnée. On ne pouvait invoquer ni une fécondité exceptionnelle (une nichée de 3 jeunes par an) ni que les cultures profitaient anormalement à l'oiseau. On se résignait à penser qu'il y aurait toujours beaucoup de *Quelea quelea* et qu'il fallait essayer d'en réduire les effectifs. Sans ignorer que les précipitations n'étaient pas égales chaque année, on ne songeait pas à interroger les fluctuations climatiques sous les tropiques.

La réponse irréfutable à «l'énigme *Quelea*» s'imposa peu après la fin des années soixante, quand toute l'Afrique de l'Ouest entra dans des séquences sèches. On observa partout une quasi-disparition de l'espèce ; les différents organismes de destruction de *Quelea quelea* prétendaient, bien entendu, que c'était grâce à leurs efforts (épandage de parathion par avion, notamment) et que l'espèce était vaincue (NDIAYE, 1974). Mais il faut bien admettre que 2 ou 3 années sèches avaient atteint ce qui était demeuré inaccessible à l'homme pendant une quinzaine d'années (WARD, 1977). Les études menées sur d'autres espèces de zones semi-arides donnaient les mêmes résultats, à savoir l'extrême variabilité des populations soumises à un climat lui-même variable.

La comparaison des mêmes lieux, dans le Sud mauritanien, depuis les années cinquante, est très instructive à cet égard. À l'ouest et à l'est du lac Rkiz, là où on trouvait dans les années cinquante les colonies de *Quelea quelea*, l'herbe dépassait les 50 cm ; dans les interdunes gorgés d'eau, poussait un tapis graminéen. Les oiseaux trouvaient une abondante nourriture qui leur permettait d'établir des colonies vastes et serrées, une des conditions du succès. En revanche, au cours des années sèches, les graminées ne dépassaient guère 10 cm en septembre et la plupart des colonies de *Quelea quelea* ont disparu.

Sans être aussi important que *Quelea quelea*, *Passer luteus*, le moineau doré, nous apprend beaucoup sur l'écologie sahélienne (MOREL et MOREL, 1980). Ce moineau, qui a une distribution subsaharo- à sahélo-soudanienne, est limité au nord de l'équateur et n'a pas d'équivalent au sud. C'est donc cette espèce, au sud du Sahara, qui remplace *Quelea quelea* (lequel, rappelons-le, est panafricain), éliminé par la sécheresse, car leurs exigences écologiques diffèrent par plusieurs points. *Passer luteus* s'est montré capable de nicher depuis la région d'Atar jusqu'à la limite méridionale du Sahel, ce que *Quelea quelea* n'a jamais fait. Une des caractéristiques importantes de *Passer luteus* est son mode de nidification ; le nid est un volumineux amas de branchettes mortes de *Balanites*, de *Acacia* ou même de graminées coriaces ; ces matériaux sont disponibles en toute saison. Les nids sont groupés, souvent moins de 10 par arbre, et la synchronisation de la reproduction est faible. Ce système colonial imparfait permet au moineau de nicher sans exigences précises vis-à-vis du tapis graminéen, si important pour *Quelea quelea*.

La faible synchronisation de la reproduction semble également une bonne adaptation à l'habitat en mosaïque, caractéristique du milieu semi-aride et accentué par la sécheresse ; il est clair que la synchronisation exemplaire de *Quelea quelea* est fragile et mal adaptée à un Sahel dégradé. Bien que *Passer luteus* soit, tout comme *Quelea quelea*, essentiellement granivore, les différences - encore imparfaitement connues - entre les deux espèces sont considérables. *Passer luteus*, moins grégaire, pâture un tapis graminéen hétérogène, moins riche ou dispersé, tandis que *Quelea quelea* recherche les peuplements denses et homogènes, tels que ceux offerts par les zones basses à *Echinochloa*. De plus, *Passer luteus*, doté d'un bec plus étroit, ne s'attaque guère au riz et, en moineau typique, il est plus insectivore que *Quelea quelea*.

ESPÈCE GRANIVORE À LONGUE SAISON DE REPRODUCTION : *LAGONOSTICTA SENEGALA* (ESTRILDIDÉS)

Lagonosticta senegala est un petit passereau, parasité par une veuve *Vidua* (= *Hypochera*) *chalybeata*, qui niche volontiers dans les toits de chaume des maisons traditionnelles ; au cours de la longue saison de reproduction (de juillet d'une année à mai de l'année suivante) les mêmes parents peuvent nidifier 4 à 5 fois. La taille maximale de la ponte est de 4 œufs (MOREL, 1973).

L'étude, menée à Richard-Toll pendant les 2 saisons de reproduction 1963-64 et 1964-65, montre des différences importantes dans le déroulement de cette reproduction,

bien que la pluviosité soit la même, 293 mm, donc proche de la moyenne. La saison des pluies, en 1963, dure quatre mois de juillet à octobre et la distribution des pluies est à peu près régulière (40 % pour juillet et août ; 60 % pour septembre et octobre). La saison des pluies, en 1964, dure seulement trois mois, de juillet à septembre ; les mois de juillet et septembre sont aussi pluvieux qu'en 1963 mais août l'est beaucoup plus avec la moitié de la pluviosité totale (144 mm). Par ailleurs, le nombre de jours de pluie, 25, est le même pour les 2 saisons.

En 1964-65, la durée de la saison de reproduction est plus longue, le nombre de nids plus élevé, leur distribution plus homogène et la productivité des couples plus forte. La saison de reproduction, commencée en juillet dans les 2 cas, s'arrête en avril (mais sans succès) pour la première et en mai (avec succès) pour la seconde. Le nombre de nids trouvés (pour un effort de recherche comparable) est plus que doublé pour la seconde saison : 261 contre 113. Enfin, si le nombre de nids est le même, et très faible, en juillet et en août pour les 2 saisons, les différences apparaissent à partir de septembre. Pour la première saison, presque la moitié des nids sont groupés en septembre et en octobre (22 % pour chacun de ces 2 mois), puis seulement 10 % pour chacun des mois suivants ; et cela jusqu'en mars (les 2 nids trouvés en avril ont échoué) ; pour la seconde saison, on note un pourcentage plus faible en septembre (16 %), mais plus élevé que la saison précédente les mois suivants : 12 % jusqu'en avril inclus ; 3 nids avec succès en mai.

Il en résulte que la productivité d'un couple (c'est-à-dire le nombre de jeunes élevés par un même couple au cours d'une saison) est plus forte en 1964-65 pour les raisons suivantes :

- une nidification supplémentaire, rendue possible par l'allongement de la saison de reproduction ;
- un nombre plus élevé de couples qui nichent plusieurs fois. En effet, en assimilant la distribution mensuelle des nids à celle des parents, il apparaît que, par rapport à 1964-65, où la distribution est plus homogène, en 1963-64, beaucoup plus de couples ne se reproduisent qu'une seule fois, en septembre et octobre (dans cette discussion, on ne fait pas intervenir la mortalité qui survient chez les adultes, estimée à 70 % et supposée la même pour les 2 saisons) ;
- enfin un nombre accru de juvéniles quittant le nid, dû au meilleur succès des nids en juillet et en août (en 1963, 0,8 juvénile avec n = 6 nids ; en 1964, 1,9 juvénile avec n = 9 nids) et en mars et en avril (aucun à la fin de la saison 1963-64 ; pour la fin de la saison 1964-65, 0,6 juvénile avec n = 27 nids), alors que le succès des nids est le même pour la période septembre-mars : 1 juvénile par nid (avec n = 97 pour 1963-64 et n = 225 pour 1964-65). Il n'a pas été tenu compte du rôle du parasite *Vidua chalybeata*, dont la période de reproduction commence après celle de son hôte, donc pas avant septembre, et se termine avant celle-ci, entre mars et avril.

Cet exemple montre donc que les possibilités théoriques de la reproduction de cette espèce ne sont pas réalisées tous les ans à cause des conditions du milieu.

ESPÈCE GRANIVORE À SAISON DE REPRODUCTION ININTERROMPUE : *STREPTOPELIA ROSEOGRISEA* (COLOMBIDÉS)

Cette tourterelle de grosse taille peut vivre toute l'année dans le Ferlo (tabl. I) ; elle s'est montrée capable de se reproduire pendant quinze mois consécutifs, depuis août 1969 jusqu'en novembre 1970 (MOREL et MOREL, 1972, 1974) ; cela tient à la production de graines d'une graminée, *Panicum laetum*, qui est toujours importante les années à «bonne» pluviosité. C'est ce qui arrive en 1969 où la production est si abondante que la tourterelle s'en nourrit toute l'année ; avec le retour des pluies, en 1970,

nouvelle production de cette graine, mais cette fois en petite quantité à cause d'une pluviosité déficitaire (200 mm), si bien que la reproduction cesse en novembre et elle ne reprend qu'à la saison des pluies suivante, en 1971. Une fois encore, mauvaise pluviosité, mauvaise production de *Panicum laetum* et de nouveau arrêt de la reproduction en novembre.

L'augmentation rapide du nombre de tourterelles entre 1969 et la fin 1970 est donc liée à la reproduction ininterrompue des mêmes oiseaux pendant toute cette période et de celle de leurs jeunes dès qu'ils sont âgés de six mois. La situation se modifie évidemment ensuite, quand la saison de reproduction est limitée à la saison des pluies. Pendant toute la saison sèche, seule intervient la mortalité de cette population, faute de nouveaux recrutements, et les effectifs restent au mieux stationnaires.

Espèce granivore à saison de reproduction limitée à la saison sèche : *Pterocles exustus* (Ptéroclididés)

Pour les espèces qui ne se reproduisent qu'en saison sèche, la durée de reproduction est d'autant plus longue que la saison des pluies est plus tardive et plus courte. Chez des espèces comme *Pterocles exustus* (espèce granivore de grosse taille également, très commune, et qui se nourrit des graines d'une légumineuse, *Zornia glochidiata*, dont la production est plus importante les années à pluies inférieures à la normale et tardives), la reproduction ne peut avoir lieu que sur un sol nu, débarrassé des graminées qui ont poussé avec les pluies. La reproduction commence donc en février (6 nids), passe par un maximum en avril (39 nids), décroît en mai (29 nids) et en juin (21 nids), mais peut encore se poursuivre en juillet (13 nids) si les pluies sont tardives, et même en août (2 nids), en septembre (7 nids), en octobre (11 nids) et en novembre (6 nids) si les couples arrivent à trouver un endroit sec qui leur convient. Cette espèce est donc mieux adaptée aux saisons des pluies déficitaires (nourriture et reproduction) que les Colombidés qui sont, eux, favorisés par des saisons de pluies précoces et bien distribuées.

Les réactions des oiseaux aux modifications climatiques dans cette steppe arbustive ont été suivies chez quelques espèces granivores terrestres, à cause de la meilleure connaissance que nous en avons, mais elles auraient pu tout aussi bien être montrées sur les autres catégories de l'avifaune de cette steppe.

CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Les caractéristiques de l'avifaune de cette steppe arbustive de l'ouest africain sont celles des régions semi-arides et tropicales. En Australie, par exemple, les réactions des populations animales à l'alternance de périodes plus sèches et de périodes plus humides sont suivies depuis le début du siècle (Serventy, 1971). Les espèces typiques de ces régions semi-arides ont acquis une forte mobilité, qui leur permet de se déplacer vers des milieux demeurés favorables en période critique, et une capacité élevée à se reproduire dès le retour de conditions meilleures, ce qui leur facilite la recolonisation des milieux abandonnés (Keast et Marshall, 1954) ; ainsi, des populations d'espèces granivores, telles que pigeons et Estrildidés (*Taenopygia castanotis*) se sont successivement effondrées puis relevées (Keast, 1959 ; Moreau, 1965, *in* Serventy, 1971). En Afrique australe, le nomadisme est bien connu pour les courvites (Cursoriidés) et les gangas (Ptéroclididés) (Rowan, *in* Serventy, 1971). Dans les déserts du Sud-Ouest africain (Namibie, Kalahari et Karoo), les Alaudidés, dont le régime alimentaire, quoique mixte, est à dominance de graines (8 des 19 espèces recensées pour

ces déserts), ont l'habitude de se déplacer vers des régions où il a plu abondamment et où, par conséquent, les graines sont pléthoriques et les sites de nidifications favorables (DEAN et HOCKEY, 1989). Le succès de ces espèces dans ces milieux instables, comme le fait remarquer WILLOUGHBY (1971), tiendrait à leur tolérance à de rapides changements de milieux, liés aux irrégularités des pluies et des sécheresses, et à leur faible spécialisation qui leur permettrait d'exploiter des habitats variés sous des climats différents. Encore faut-il, comme nous l'avons fait remarquer, des points d'eau assez proches de ces terrains de gagnage (un rayon d'action de 50 km pour les gangas paraît être un maximum) pour être exploitables par les espèces granivores qui doivent impérativement boire tous les jours.

Dans le Nord-Sénégal, on a également assisté à des modifications importantes de la composition de l'avifaune. Tout comme dans le Sud-Ouest de l'Afrique, les Alaudidés du genre *Eremopterix* (2 espèces) ont momentanément envahi la région à la faveur d'une vague de sécheresse.

Le remplacement de *Quelea quelea* par *Passer luteus* est un nouvel exemple des mouvements d'oiseaux liés à des changements climatiques (JONES, 1976 ; MOREL et MOREL, 1980 ; ELIOTT et JAEGER, 1986). Chassé de son habitat normal temporairement dégradé, *Quelea quelea* s'est réfugié près de l'eau et il a adopté une végétation toute différente, les massifs de *Typha* spp. et la canne à sucre pour nicher (MOREL et MOREL, 1974b). Il fait peu de doute que, la steppe arbustive s'améliorant avec un retour persistant des pluies, *Quelea quelea* puisse, à partir d'une population réduite, regagner peu à peu son habitat normal. Il est opportun de rappeler pour ces 2 espèces, objets de recherches importantes et dont l'une a succédé à l'autre, qu'elles n'ont pas les mêmes caractéristiques étho-écologiques.

Dans l'Est africain, au parc Tsavo (Kenya), LACK (1987) réalisa une étude comparable à la nôtre pendant deux années, mais sur 7 parcelles réparties de la steppe herbeuse à la steppe boisée. Au Kenya comme au Sénégal, la densité minimale d'oiseaux s'observe en saison sèche, avec environ 1 oiseau par hectare pour un poids de 100 g, et le maximum, environ 5 fois plus, en saison des pluies. La différence entre les 2 extrêmes est constituée de migrateurs paléarctiques (surtout des insectivores) et d'espèces afrotropicales (surtout granivores). Si, au Sénégal, une grande partie de la population afrotropicale trouve refuge dans les forêts riveraines, au parc Tsavo la situation est plus complexe. En effet, en se déplaçant de 200 à 300 km, les oiseaux peuvent rencontrer un milieu équivalent où les conditions sont favorables, grâce à un régime pluvial différent. Dans les deux cas, à l'est comme à l'ouest du continent, sur une steppe arbustive où les mois les plus secs ne peuvent assurer à toute la communauté avienne les conditions adéquates, on observe donc que la mobilité est une des principales caractéristiques de l'avifaune dite résidente.

Les espèces animales aptes à vivre dans ces milieux instables se caractérisent par leur capacité à se multiplier dès que les conditions deviennent favorables ; c'est cette capacité que les écologistes australiens ANDREWARTHA et BIRCH ont appelé, en 1954, le facteur «rm». Celui-ci définit la sélection «r» qui s'oppose à la sélection «k» (*carrying capacity*) des milieux stables. Les populations régies par la sélection «r» sont donc soumises à de grandes fluctuations ; c'est le propre des espèces végétales et animales, responsables d'épidémies et de fléaux agricoles, et contre lesquelles il est particulièrement difficile de se défendre du fait même des changements brutaux de leurs densités : *Quelea quelea* en est un excellent exemple chez les oiseaux.

Il apparaît que cet accroissement de la population est dû au succès de la reproduction, lequel dépend finalement de l'abondance de la nourriture. Or, celle-ci est plus ou moins directement liée à la pluviosité dans les régions arides et semi-arides tropicales : c'est ce que nous avons exposé dans cet article. Des résultats comparables ont été obtenus dans d'autres régions à climat semi-aride ; pour rester en Afrique, dans une

savane ouverte à *Acacia* au Natal, 421 nids appartenant à 49 espèces furent trouvés en deux ans (1978-79), mais la pluviosité de 1979 fut 2 fois moins importante que celle de 1978, et le nombre de nids trouvés fut également moitié moindre (EARLÉ, 1981).

Sous les tropiques, le cycle annuel des oiseaux peut se révéler d'une grande complexité. Il n'existe pas une, mais de nombreuses stratégies différentes de la reproduction, et des variations importantes à la fois entre les espèces et à l'intérieur d'une même espèce. C'est là un caractère qui, d'un point de vue évolutif, montre une grande souplesse (IMMELMANN, 1971). Nos résultats corroborent ceux obtenus en d'autres régions tropicales (pour l'Afrique, par exemple, BROWN *et al.*, 1982).

Le déroulement de la mue, bien qu'encore très mal connu pour les oiseaux d'Afrique tropicale, obéit également à différents modèles et interfère souvent avec la reproduction (FOSTER, 1974, 1975 ; BROWN *et al.*, 1982 ; CRAIG, 1983).

L'imprévisibilité climatique responsable d'une forte variabilité des ressources pose à l'écologiste qui étudie les communautés aviennes (ensemble d'individus qui appartiennent à plusieurs espèces et qui sont présents ensemble en un même lieu) la difficile question de l'importance de la compétition comme mécanisme de la sélection naturelle dans la régulation des populations. En effet, dans aucun milieu, les ressources ne sont illimitées, si bien que les individus ou les espèces qui s'y maintiennent sont ceux qui sont les plus aptes à les exploiter, les autres ayant dans ces conditions peu de chances de vivre et de se reproduire. Toutefois, pour que la compétition puisse jouer ce rôle, il faut pouvoir affirmer que les communautés sont en équilibre ou proches de l'équilibre déterminé par les ressources en présence. Ceci suppose par voie de conséquence qu'un habitat donné est totalement occupé par les individus et que la communauté considérée dans son ensemble est «saturée», c'est-à-dire qu'elle contient le nombre optimal d'espèces les mieux adaptées aux ressources du milieu. Les tenants de cette théorie sont LACK (1954), MAC ARTHUR (1962, 1969, 1970), CODY (1974) *in* WIENS (1989). Les facteurs qui limitent les populations des vertébrés seraient, suivant les auteurs, la nourriture (LACK, 1954 ; MORSE, 1971) ou l'habitat (SCHOENER, 1974) ; toutefois, pour HILDÉN (1965) la nourriture et la structure de l'habitat auraient toutes deux un rôle à jouer, la nourriture en tant que facteur *ultimate* et l'habitat en tant que facteur *proximate* (toutes ces références *in* FOLSE, 1982).

L'hypothèse de la compétition comme seul facteur de la régulation des populations n'est toutefois pas admise par tous les écologistes. En 1954, par conséquent à la même date que LACK, ANDREWARTHA et BIRCH avançaient l'hypothèse que le niveau des populations atteignait rarement la capacité limite du milieu par impossibilité pour les espèces de trouver les conditions requises (nourriture, habitat, etc.) pour s'accroître suffisamment ; cependant, ils reconnaissaient que la compétition pouvait intervenir quand cette situation se trouvait réalisée. L'hypothèse de la saturation du milieu par les espèces les mieux adaptées est vigoureusement combattue depuis 1969 par WIENS, qui travailla avec une équipe de chercheurs dans les zones arides de l'Ouest des États-Unis, lesquelles sont soumises à de grandes fluctuations climatiques. Cet auteur proposa en 1974 et en 1977 un modèle qui tient compte de ces variations (WIENS, 1989). Selon lui, les modifications brutales d'un milieu entraînent de tels changements dans les ressources qu'il est impossible aux individus et aux communautés de s'y adapter parfaitement ; dans le cas d'une chute brutale des ressources, la compétition est intense et les effectifs tombent au plus bas. Dans le cas opposé d'une remontée spectaculaire des ressources qui deviennent pléthoriques par rapport aux communautés et aux individus qui les utilisent (car ils n'ont pas encore augmenté suffisamment leurs effectifs), la compétition joue peu et l'exploitation des ressources dépasse largement les limites théoriques de leur usage optimal.

Ces hypothèses, aussi stimulantes soient-elles pour l'esprit, restent très difficiles à vérifier sur le terrain. Ainsi, en Tanzanie, dans le parc national du Serengeti, il apparaît

qu'aucune d'entre elles ne peut correctement expliquer les relations entre l'avifaune et les ressources du milieu (FOLSE, 1982). Pour le Nord-Sénégal, il est prématuré d'avancer une hypothèse cohérente. Tout au plus, devrait-on donner, semble-t-il, la préférence aux théories qui privilégient les fluctuations de la taille des populations aviennes en relation avec les variations des ressources du milieu. Il est vrai que les années à forte production de certaines graines de graminées (*Panicum laetum*, par exemple), plusieurs espèces aviennes granivores, qui se montrent opportunistes, en consomment de grandes quantités ; elles peuvent ainsi accroître leur population en multipliant leurs pontes sans que la taille de celles-ci soient modifiée (*Quelea quelea* ou les tourterelles du genre *Streptopelia*, par exemple) ; il est vrai également, en période de disette, que les régimes alimentaires de ces mêmes espèces divergent (*Streptopelia*, par exemple) (GETTLER-SUMMA, 1983) ; en même temps, la taille de leur population diminue par réduction de l'effort de reproduction qui provoque un déficit de la natalité ; cependant, il n'a pas été possible de mesurer de quelle façon la taille de la population pourrait suivre les variations de la nourriture disponible ; il n'a pas davantage été possible de déterminer à quel moment pouvait intervenir les compétitions inter- et intraspécifique, lorsque les populations atteignent la capacité limite du milieu ou bien lors de leur déclin. La question se complique encore pour les espèces granivores par l'occupation de l'habitat qui dépend étroitement de la présence des mares où les oiseaux doivent venir boire impérativement tous les jours et dont le remplissage dépend étroitement de la pluviosité.

M.-Y. Morel, G. J. Morel : *ornithologues*, 1 route de sallenelles, Bréville-les-monts, 14860 Ranville

BIBLIOGRAPHIE

ANDREWARTHA (H. G.) et BIRCH (L. C.), 1954. - The distribution and abundance of animals. Chicago. University of Chicago Press.

BELTRANDO (G.), CHARRE (J.) et DOUGUEDROIT (A.), 1986. - Régionalisation des variations temporelles récentes des précipitations de la zone soudano-sahélienne (de l'océan Indien à l'océan Atlantique). Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. *Trav. et doc. ORSTOM*, Paris, n° 197 : 25-28.

BILLE (J.-C.), 1977. - Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. et doc. ORSTOM*, Paris, n° 65, 82 p.

BIRCH (L. C.), 1957. - The meanings of competition. *Am. Nat.*, 91 : 5-18.

BROWN (L. H.), URBAN (E. K.) et NEWMAN (K.), 1982. - The birds of Africa. Vol. I. The Ostrich to the Falcons. Academic Press, London.

CRAIG (A. J. F. K.), 1983. - Moult in southern African passerine birds : a review. *Ostrich*, 54 : 220-236.

DEAN (W. R. J.) et HOCKEY (P. A. R.), 1989. - An ecological perspective of lark (Alaudidae) distribution and diversity in the southwest-arid zone of Africa. *Ostrich*, 60 : 27-34.

DUNNING (J. B. Jr.), 1986. - Shrub-steppe bird assemblages revisited": implications for community theory. *Amer. Nat.*, 128 : 82-98.

EARLÉ, 1981. - Factors governing avian breeding in *Acacia* savanna, Pietermaritzburg. Part 1 Extrinsic factor. *Ostrich*, 52 : 65-73.

ELIOTT (C. C. H.) et JAEGER (M. M.), Eds. 1986. - *Proceedings of the International Conference of the* Quelea : Ecology, Management, Policy. Kenya 13-22 Jan 1985, 132 P., FAO Rome.

FOLSE, (L. J.), 1982. - An analysis of avifauna - resource relationships on the Serengeti plains. *Ecological Monographs*, 52 : 111-127.

FOSTER (M. S.), 1974. - A model to explain molt-breeding overlap and clutch size in some tropical birds. *Evolution*, 28 : 182-190.

FOSTER (M. S.), 1975. - The overlap of molting and breeding in some tropical birds. *Condor*, 77 : 304-314.

FRY (C. H.), KEITH (S.) et URBAN (E. K.), 1988. - The birds of Africa. Vol. III. Academic Press, London.

GETTLER-SUMMA (M.), 1983. - Application de l'analyse des données à l'étude des régimes alimentaires de cinq espèces de Columbidés recueillis dans le Nord Sénégal. Thèse doctorat 3e cycle. Université P.-et-M.-Curie. Paris.

HILDÈN (O.), 1965. - Habitat selection in birds : a review. *Annales Zoologici Fennici*, Helsinki, 2 : 53-75.

IMMELMANN (K.), 1971. - Ecological aspects of periodic reproduction : 341-389 *in* Farner D. S. and King J. R., Ed. Avian Biology. Academic Press New York and London.

JONES (J.), 1976. - The tale of the Golden Sparrow. *Spectrum*, 146 : 7-9.

KEAST (J. A.) et MARSHALL (A. J.), 1954. - The influence of drought and rainfall on reproduction in Australian desert birds. *Proc. Zool. Soc. Lond.*, 124 : 493-499.

LACK (D.), 1954. - The Naturel Regulation of Animal Numbers. Oxford : Oxford University Press.

LACK (P. C.), 1987. - The structure and seasonal dynamics of the bird community in Tsavo East National Park, Kenya. *Ostrich*, 58 : 9-22.

MAC ARTHUR (R. H.), 1962. - Some generalized theorems of natural selection. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (USA), 48 : 1893-1897.

MAC ARTHUR (R. H.), 1969. - Species packing and what interspecies competition minimizes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (USA), 64 : 1369-1371.

MAC ARTHUR (R. H.), 1970. - Species packing and comprtitive equilibrium for many species. *Theorical Population Biology*, 1 : 1-11.

MOREL (G. J.), 1968a. - L'impact écologique de *Quelea quelea* (L) sur les savanes sahéliennes. Raisons du pullulement de ce Plocéidé. *Terre et Vie*, 114 : 69-98.

MOREL (G. J.), 1968b. - Contribution à la synécologie des oiseaux du Sahel sénégalais ; Thèse doct. d'État, *Mém. ORSTOM*, n° 29, Paris, 179 p.

MOREL (M.-Y.), 1973. - Contribution à l'étude dynamique de la population de *Lagonosticta senegala* (Estrildidés) à Richard-Toll, Sénégal. Interrelations avec le parasite *Hypochera chalybeata* (Müller) (Viduinés). *Mém. Mus. nat. hist. nat.*, sér. A, Zool., 78, 156 p.

MOREL (M.-Y.), 1983. - La mue de *Streptopelia roseogrisea* dans une région tropicale semi-aride (Nord-Sénégal). *Alauda*, 51 : 179-202.

MOREL (M.-Y.), 1987. - La Tourterelle des bois, *Streptopelia turtur*, dans l'Ouest africain : mouvements migratoires et régime alimentaire. *Malimbus*, 9 : 23-42.

MOREL (M.-Y.), 1988. - Successful introduction of *Passer domesticus indicus* Jardine and Selby in Senegambia. *Proc VI Pan. Afr. Orn. Congr.* : 159-160.

MOREL (M.-Y.) (sous presse). - Comparison of the life cycles of long-breeding afrotropical species in Senegal. *Proc VII Pan. Afr. Orn. Congr.*

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1972. - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : l'avifaune et son cycle annuel. *Terre et Vie* : 410-439.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1974a. - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. Influence de la sécheresse de l'année 1972/73 sur l'avifaune. *Terre et Vie*, 28 : 95-123.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1974b. - Une colonie de *Quelea quelea* (L) établie sur roseaux au Sénégal. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, XXV : 67-71.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1978a. - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. Étude d'une communauté avienne. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, XIII : 3-34.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1978b. - Éléments de comparaison entre *Quelea quelea* (L) et *Passer luteus* (Lichtenstein) dans les savanes tropicales de l'Ouest africain. *Cah ORSTOM, sér. Biol.*, XIII : 347-358.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1980. - Has the Golden Sparrow replaced the Black-faced Dioch in West-Africa? *17 Congr Int. Orn* : 1150-54.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1982. - Dates de reproduction des oiseaux de Sénégambie. *Bonner Zool. Beit.*, 33 : 249-268.

MOREL (G. J.) et MOREL (M.-Y.), 1990. - Les oiseaux de Sénégambie. Notices et cartes de distribution. *Didactiques*, ORSTOM. 178 p.

MORSE (D. H.), 1971. - The insectivorus bird as an adaptative strategy. *Annuel Review of Ecology and Systematics*, 2 : 177-200.

NDIAYE (A.), 1974. - Recherches sur la diminution des populations de *Quelea quelea* (L) dans la vallée du fleuve Sénégal. Thèse doctorat 3e cycle. Université Paris-VI.

POUPON (H.), 1979. - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 115, 352 P., 46 fig., 7 cartes ann. n. et coul., Paris.

ROUX (F.), JARRY (G.), MAHÉO (R.) et TAMISIER (A.), 1976. - Importance, structure et origine des populations d'Anatidés hivernant dans le delta du Sénégal. *Oiseau et RFO*, 46 : 299-336 : 47 : 1-24.

SCHOENER (T. W.), 1974. - Resource partitioning in ecological communities. *Science*, 185 : 27-39.

SERVENTY (D. L.), 1971. - Biology of desert birds. *In* Farner D. S. and King J. R. Avian biology. Academic Press. New York and London.

URBAN (E. K.), FRY (C. H.) et KEITH (S.), 1986. - The birds of Africa. Vol. II. Academic Press, London.

WARD (P.) 1965a. - Feeding ecology of the Black-faced Dioch *Quelea quelea* in Nigeria. *Ibis*, 107 : 173-214.

WARD (P.), 1965b. - The breeding biology of the Black-faced Dioch *Quelea quelea* in Nigeria. *Ibis*, 107 : 326-349.

WARD (P.), 1977. - Quelea investigations project, Nigeria. Final report 1972-1975. Center for Overseas Pest Research, London : 57.

WIENS (J. A.), 1989. - The ecology of bird communities, 2 vol. Cambridge University Press.

WILLOUGHBY (E. J.), 1971. - Biology of larks (Aves : Alaudidae) in the central Namib Desert. *Zoo. Afri*, 6 : 133-176.

Samir I. GHABBOUR, Marguerite A. RIZK,
Wafaï Z. A. MIKHAIL

Bilan hydrique de quelques invertébrés hypogés de la région de Mariout (Égypte)

Le cas du cafard des sables *Heterogamia syriaca* Sauss.

Cet article est dédié à la mémoire de Wilhelm KUHNELT, professeur d'écologie animale à l'Institut de zoologie de l'université de Vienne, en Autriche, décédé en 1988, qui nous a beaucoup aidés en nous faisant partager sa grande connaissance de l'écologie des invertébrés dans les déserts.

INTRODUCTION

Le problème de la survie des êtres vivants dans les zones arides a toujours intrigué les chercheurs biologistes (EDNEY, 1977 ; CRAWFORD, 1981 ; LOUW et SEELY, 1982 ; WALLWORK, 1982). Les mécanismes de survie mis en œuvre par les vertébrés ne sont pas utilisables par les invertébrés, généralement de trop petite taille et limités dans leurs déplacements. Certaines espèces d'invertébrés profitent cependant de la sève d'une rare végétation (cas de quelques phytophages), des jus de cadavres (cas des larves de diptères) ou bien se déplacent vers des zones plus humides (cas des sauterelles). D'autres, comme les espèces détritivores qui vivent enfouies dans le sol, doivent se contenter d'une nourriture de faible valeur nutritive, éparse et peu abondante. Il s'agit généralement d'arthropodes saprophages qui se nourrissent de la matière végétale morte ; cette litière, accumulée sur le sol et exposée aux aléas du climat, est le plus souvent abritée sous la couronne des plantes désertiques. Dans ce travail, nous examinerons quelques aspects du bilan hydrique de l'un de ces arthropodes détritivores hypogés, qui habite le désert côtier méditerranéen de la région de Mariout, en Égypte septentrionale ; il s'agit d'une blatte, *Heterogamia syriaca* Sauss. (Polyphagidae, Dictyoptera) ; la femelle aptère vit enfouie dans le sable et le mâle ailé s'aventure dans la strate arbustive.

CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU

La côte méditerranéenne occidentale d'Égypte s'étend d'Alexandrie à Salloum et, vers le sud, presque jusqu'au niveau de Ouadi El-Natroun, à mi-chemin entre Alexandrie et Le Caire. Cette zone côtière a été décrite par AYYAD et GHABBOUR (1977) et GHABBOUR *et al.* (1977). L'influence maritime se fait nettement sentir jusqu'à 10 km à l'intérieur des terres, alors qu'elle devient plus faible au-delà de cette limite et qu'elle s'atténue à 80 km plus au sud. Ces 2 parties ont été nommées (AYYAD *et al.*, 1984) :

- zone méditerranéenne aride atténuée ;
- zone méditerranéenne intérieure aride accentuée.

La pluviosité est faible, de l'ordre de 130 à 180 mm.an^{-1}, à seulement 100 km de la côte, et de l'ordre de 0 mm.an^{-1}, à 200 km dans le désert hyperaride du Sahara.

L'humidité relative de l'air (HR) est en moyenne de 63 % au printemps, de 61 % en automne, de 65 % en hiver, mais de 72 % en été (voire de 80 % en août) malgré l'absence de pluie. Les températures minimales de la zône côtière sont plus élevées et les écarts thermiques moins prononcés, en moyenne, qu'à l'intérieur (BOULOS, 1975). Les sols sont calcaires avec davantage d'intrusions siliceuses vers l'intérieur (ABDEL-KADER *et al.*, 1975).

La région de Mariout est caractérisée par une série de crêtes parallèles à la côte qui deviennent plus hautes et plus consolidées vers l'intérieur des terres. Elles sont séparées par une série de dépressions qui, en direction du sud, vont en s'élargissant, avec des sols de plus en plus profonds, d'origines alluviale et lacustre.

La végétation de cette zone se compose d'arbustes et de buissons ; vers le sud, ils se raréfient et, pour une même espèce, leur taille et leur volume diminuent de manière graduelle. On y rencontre la passerine (*Thymelaea hirsuta*), le rétam (*Lygos raetam*) et plusieurs Chénopodiacées avec une dominance de *Anabasis articulata* qui forme, en compagnie d'autres plantes de plus petite taille, l'essentiel du couvert végétal ligneux. En hiver, les plantes annuelles se développent avec une densité et une biomasse qui varient selon la pluviosité. Précisons que, à partir de 1975, la hauteur des pluies n'a atteint que 100 à 150 mm.an^{-1}. La végétation était normalement pâturée par des troupeaux de chèvres et de moutons.

La faune du sol dans la zône côtière de Mariout est composée principalement de protozoaires, de nématodes, de mollusques et d'arthropodes. Le cafard des sables en est l'espèce la plus importante du point de vue pondéral et il constitue entre 40 et 60 % des effectifs de la mésofaune totale (la mésofaune comprend les animaux dont la taille excède 1 mm). La faune du sol est presque entièrement dépendante des arbustes, des plantes épineuses et des buissons auprès desquels elle trouve refuge et nourriture grâce à l'accumulation de litière. Les représentants de la faune du sol ne se trouvent dans les espaces libres entre les arbustes et les buissons qu'en période d'accouplements ou après les pluies lorsque le sol est encore uniformément et suffisamment mouillé.

Les études écologiques que nous avons menées dans le cadre des projets Samdene (AYYAD et GHABBOUR, 1977 ; KASSAS, 1979) et Remdene (AYYAD, 1983) ont eu pour cadres 2 sites, l'un sur les dunes littorales à Gharbaniat, à 53 km à l'ouest d'Alexandrie et l'autre dans la dépression non saline entre la troisième et la quatrième crêtes à 10 km au sud de la côte, et à 20 km plus à l'ouest. Le premier site appartient à la zone dite «aride atténuée» et le second se trouve dans la zone dite «aride accentuée». Le site de Gharbaniat est aujourd'hui un village touristique, tandis que le site d'Omayed est devenu Réserve de la biosphère dans le cadre du programme Mab (*Man and Biosphere*) de l'Unesco en 1981 ; il a été déclaré Zone naturelle protégée par décret du Premier ministre en 1986 (AYYAD et GHABBOUR, 1986).

PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET MESURES EFFECTUÉES

Des travaux menés aux États-Unis sur une espèce proche de cafard des sables, *Arenivaga investigata*, ont montré que cette blatte possède la capacité d'absorber de la vapeur d'eau lorsque l'humidité relative de l'air est de 82 % (EDNEY et MC FARLANE, 1974) ; d'autres recherches révélaient que l'espèce d'Égypte, *Heterogamia syriaca*, équilibrait sa balance hydrique corporelle vers 75 % d'humidité relative (VANNIER et GHABBOUR, 1983). On peut trouver dans cette étude écophysiologique l'habitus d'un exemplaire femelle de cette espèce, face dorsale et face ventrale, montrant la forme du corps en bouclier parfaitement adaptée à la vie désertique xérophile.

Les individus de *Heterogamia syriaca* ont été récoltés dans les 2 sites de Gharbaniat et d'Omayed. Ils étaient ensuite conservés vivants dans des boîtes de Petri pendant plusieurs jours afin de les acclimater à la vie en captivité. D'autres individus, aussitôt capturés, étaient directement introduits dans les dispositifs expérimentaux.

Perte et gain d'eau à humidité relative constante

L'humidité relative de l'air a été maintenue constante à l'aide de solutions d'acide sulfurique à concentration variable dans des ballons de verre à fond plat (fig. 1). Le tableau I montre les concentrations d'acide sulfurique qui permettent d'obtenir différentes humidités relatives à 20 °C (*d'après* ABEL, 1956). La tension de vapeur d'eau à l'équilibre est atteinte après 24 heures et les animaux, introduits par 2 à l'intérieur du ballon, sont enfermés dans un filet de nylon suspendu au-dessus de la solution hygroscopique sans contact avec le liquide. Le chlorure de calcium déshydraté a été utilisé pour obtenir une atmosphère desséchée (0 % HR) (fig. 1). Les animaux ont été pesés avant leur introduction dans le dispositif expérimental, puis à la fin de l'expérience. Les animaux trouvés morts mais en bon état ont été déshydratés à 70 °C, puis pesés pour obtenir leur poids sec. Les flacons expérimentaux étaient placés à une température de 20 ± 2 °C, en été, et à 29 ± 2 °C, en hiver. SOLOMON (1951) avait constaté que les variations d'humidité relative à l'intérieur de volumes semblables n'oscillaient que de 0, 5 % entre 20 et 30 °C. Les pelotes fécales produites par les blattes au cours des expériences ont été ramassées et pesées pour en défalquer la masse du poids frais initial. Les animaux qui décédaient ou qui muaient au cours des expériences n'étaient pas pris en compte dans les résultats.

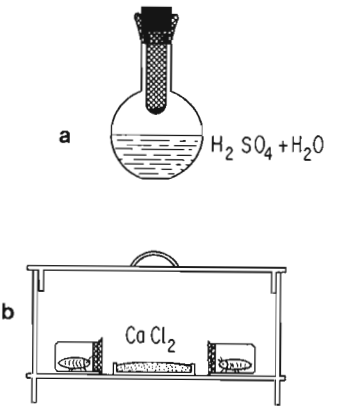


FIGURE 1 - *Dispositifs expérimentaux pour l'établissement du bilan hydrique des cafards des sables : (a) utilisation des solutions d'acide sulfurique, (b) utilisation du chlorure de calcium.*

Tableau I - Concentration des solutions d'acide sulfurique et les humidités relatives correspondantes à 20° C

Volume acide sulfurique	% HR à 20°C	% HR approximée
2,5	97,2	97,0
5,0	95,5	96,0
10,0	90,0	90,0
15,0	82,3	82,0
20,0	71,6	72,0
25,0	60,2	60,0
30,0	48,2	48,0
35,0	36,5	37,0
40,0	25,6	26,0
35,0	15,0	15,0
50,0	6,2	6,0
60,0	2,5	3,0
70,0	0,75	0,88
80,0	0,75	0,2
90,0	0,08	0,1

Pour un volume de 100 ml, *d'après* ABEL (1956).

Variation de la teneur en eau corporelle chez les animaux transférés d'une hygrométrie à l'autre

Après déshydratation partielle dans une atmosphère à fort déficit hygrométrique, les animaux étaient ensuite transférés dans une ambiance plus riche en vapeur d'eau pour tester leur capacité d'absorption de vapeur d'eau, selon la méthode de VANNIER (1976). Dans presque tous les cas, les poids secs ont été déterminés à la fin des expériences. Des manipulations de transferts en sens inverse ont été également effectuées.

Absorption de vapeur d'eau par les cadavres

Des cafards ont été délibérément sacrifiés par déshydratation totale au-dessus d'un bain d'acide sulfurique pur ou de chlorure de calcium à la température de 20 °C pendant 24 heures et leur teneur en eau initiale a été calculée. Puis ils ont été placés au-dessus d'un volume d'eau pure qui engendrait une tension de vapeur saturante et ils ont été pesés à intervalles réguliers. Le taux d'absorption de vapeur d'eau a été calculé en admettant que le cadavre possède la même surface corporelle que l'animal vivant car la déshydratation complète ne provoque pas de rétraction du corps selon EDNEY (1977). La surface tégumentaire a été calculée en fonction du poids frais d'après la formule allométrique :

$$S = KW^{2/3}$$

où :
S = surface corporelle
W = poids frais
K = constante dimensionnelle.

Chez *Arenivaga investigata,* la constante K est égale à 12 selon EDNEY et MC FARLANE (1974) et nous avons pris la même valeur pour *Heterogamia syriaca* qui possède les mêmes mensurations. L'utilisation de cette formule a été précédemment expliquée par VANNIER (1975).

Mesure de la température critique

Au-dessus d'une certaine température de l'air ambiant, la perte d'eau corporelle s'accélère brutalement. L'explication généralement admise de ce phénomène réside dans la dissociation de la couche cireuse épicuticulaire qui sert de frein au transfert hydrique corporel dans les conditions climatiques normales (CLOUDSLEY-THOMPSON, 1967). Mais il arrive dans certains cas que la destructuration de cette couche protectrice se manifeste en plusieurs phases (TOOLSON, 1978). Pour déterminer cette température critique chez *Heterogamia syriaca,* des individus ont été placés à l'intérieur de bocaux en présence de chlorure de calcium pendant une période de trois à quatre heures ; ils ont été ensuite soumis à des températures qui passaient de 20 à 70 °C, en utilisant pour chaque niveau thermique des spécimens différents. Des pesées ont été effectuées à intervalles réguliers : de 5 en 5 °C entre 25 et 60 °C et de 2,5 en 2,5 °C entre 60 et 70 °C. Les pelotes fécales, quand elles étaient produites, ont été pesées pour soustraire leur masse du poids frais initial. Tous les individus ainsi testés ont été déshydratés à 70 °C pendant 16 heures afin d'obtenir leur poids sec.

RÉSULTATS

Comportement du cafard des sables vis-à-vis de l'humidité dans son milieu naturel

Les populations de cafard des sables ont été échantillonnées tous les mois, entre 1975 et 1977, dans les 2 sites étudiés, à Gharbaniat et à Omayed ; dans les 2 sites, l'humidité du sol a été mesurée simultanément à la surface et à des profondeurs de 20 cm et de 50 cm. A cette dernière profondeur, GHABBOUR et MIKHAIL (1977) avaient constaté que la composition chimique du milieu intérieur des cafards était étroitement liée à l'humidité actuelle. Les mêmes auteurs avaient constaté un rythme saisonnier particulier chez *Heterogamia syriaca* : (1) hiver, décembre-mars ; (2) printemps, avril-mai ; (3) été, juin-septembre ; (4) automne, octobre-novembre. Ce découpage du cycle annuel a été utilisé pour composer le tableau II. GOMAA *et al.* (1978) ont établi la correspondance des valeurs de pF et des humidités actuelles. Auparavant, VANNIER (1971) avait montré la signification écologique des valeurs remarquables du pF par rapport aux valeurs de l'humidité relative de l'air dans les interstices du sol. Dans un article de synthèse paru en 1987, cet auteur a reconnu le sol et tous les corps poreux comme milieux de transition entre l'hydrosphère et l'atmosphère qui permettent à la biosphère de conquérir les milieux terrestres aériens (notion de porosphère).

Pendant la période d'échantillonnage, on se rend compte que le cafard des sables ne subit presque jamais un déficit de saturation de l'atmosphère du sol. Il est curieux d'ailleurs de constater que les périodes d'humidité relative inférieure à 100 % ne se rencontrent qu'à Gharbaniat, site pourtant considéré comme le plus humide, puisqu'il est le plus proche de la mer, mais dont le sol présente une granulométrie plus grossière. Pour les 2 sites et durant la période d'échantillonnage, la figure 2 montre les densi-

Tableau II - Évolution de l'état hydrique du sol à 50 cm de profondeur dans les 2 sites entre 1975 et 1977 (% humidité)

SAISON	N	MOYENNE %	ÉCART-TYPE	MIN.	MAX.	pF	% HR
			A. Gharbaniat				
hiver 75	8	5,4	0,6	1,3	4,6	-2,5	100
print. 75	12	3,4	1,2	1,9	5,5	2,5-4,2	100
été 75	19	1,8	1,0	0,0	3,2	4,7-5,0	93-100
aut. 75	18	3,2	0,4	2,7	4,0	2,5-4,2	100
hiver 76	42	3,4	1,4	0,9	8,0	2,5-4,2	100
print. 76	6	1,9	1,1	0,6	2,9	4,7-5,0	93-100
été 76	24	1,8	0,9	0,7	2,9	4,7-5,0	93-100
aut. 76	6	3,1	0,2	2,9	3,5	2,5-4,2	100
hiver 77	24	4,8	2,0	2,1	8,3	2,5-4,2	100
print. 77	6	3,5	1,5	1,1	4,7	2,5-4,2	100
été 77	6	3,3	0,6	2,9	4,6	2,5-4,2	100
aut. 77	6	3,0	0,3	2,7	3,5	2,5-4,2	100
Relations état hydrique (%) du sol et pF : 1 % = 6 ; 1,5 % = 5 ; 1,7 % = 4 ; 2,3 % = 4,2, 5,2 % = 2,5							
			B. Omayed				
hiver 75	6	4,9	0,8	3,8	6,2	4,2-4,7	100
print. 75	12	3,3	1,7	1,1	6,7	do	100
été 75	24	1,4	0,8	0,3	2,9	do	100
aut. 75	18	2,2	0,8	1,0	3,7	do	100
hiver 76	42	1,8	1,0	0,5	3,8	do	100
print. 76	6	1,8	0,7	1,1	2,8	do	100
été 76	18	1,3	0,6	0,3	2,6	do	100
aut. 76	6	2,3	0,8	1,4	3,2	do	100
hiver 77	24	1,5	0,4	0,9	2,2	do	100
print. 77	6	2,1	0,7	0,8	2,8	do	100
été 77	6	2,6	1,0	1,3	4,2	do	100
Relations état hydrique (%) du sol et pF : 1 % = 4,7 ; 6,5 % = 4,2							
% HR correspondants à différents pF :	pF > 6 = HR < 48 % pF 5 à 6 = 48 % HR pF 4,7 à 5 = 93 % HR pF 4,2 à 4,7 = 100 % HR pF 2,5 à 4,2 = 100 % HR pF < 2,5 = 100 % HR						

tés et les biomasses estimées, par hectare, de cafards des sables ; pour plus de détails sur la méthode de prélèvement et d'étude-calcul, voir GHABBOUR *et al.* (1977) ; non seulement on peut constater l'absence de synchronisation entre l'évolution des populations dans les 2 sites, mais au contraire, lorsque l'une est en hausse, il apparaît que l'autre est en baisse. Cette alternance démographique semble bien significative. C'est l'humidité du sol qui règle ce décalage car ses variations ne sont elles-mêmes pas synchrones dans les 2 sites prospectés (tabl. I). Dans les 2 sites, la relation linéaire entre la densité de cafards des sables et l'humidité du sol à 50 cm de profondeur est significative (fig. 3) ; on constate que la population d'Omayed, site le moins humide, réagit plus

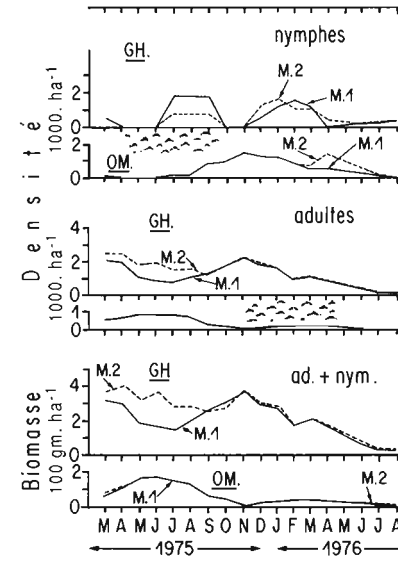


FIGURE 2 - *Densités et biomasses des peuplements de cafards des sables* Heterogamia syriaca *dans les deux sites de Gharbaniat et Omayed, entre 1975 et 1977, exprimées en termes de populations par hectare (voir* GHABBOUR et al., *1977 pour plus de détails sur la méthode).*

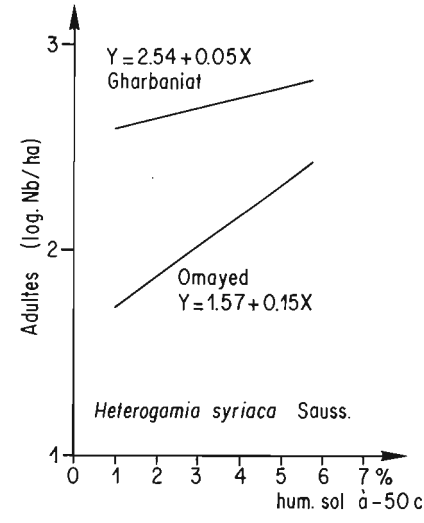


FIGURE 3 - *Droites de régression linéaire de la densité des peuplements de cafards des sables (estimée par hectare), par rapport à l'humidité du sol à 50 cm de profondeur, dans les 2 sites, Gharbaniat et Omayed, durant la période 1975-1977.*

rapidement aux variations de l'humidité du sol que celle de Gharbaniat. Ceci peut s'expliquer probablement par le fait que les contraintes écologiques sont beaucoup plus sévères à Omayed et que les cafards des sables sont davantage sensibilisés par les variations climatiques. Les fluctuations mensuelles de poids frais, de poids secs et de teneurs en eau corporelle (population en provenance de Gharbaniat) décrivent une courbe sinusoïdale (fig. 4). La régression linéaire poids frais-poids secs évolue d'une saison à l'autre (fig. 5).

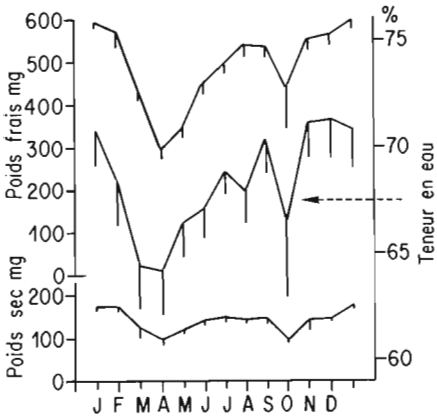


Figure 4 - *Évolution mensuelle des moyennes des poids frais, des poids secs, et de la teneur d'eau corporelle, des cafards des sables non acclimatés. Les lignes verticales représentent les amplitudes des observations. La plupart de ces effectifs proviennent du site de Gharbaniat.*

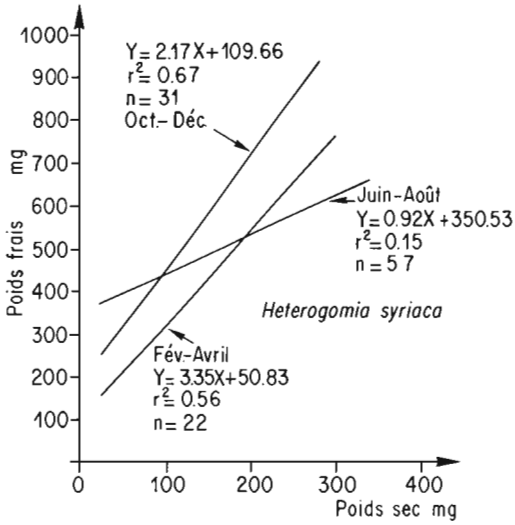


Figure 5 - *Droites de régression linéaire entre poids frais et poids secs des cafards des sables provenant directement du milieu naturel, au cours de trois saisons différentes.*

Perte ou gain d'eau à hygrométrie constante

Pour une période donnée, la perte hydrique d'un animal par rapport au taux initial d'eau corporelle est d'autant plus importante que le déficit hygrométrique de l'air est prononcé (fig. 6).

Après un jour d'expérience à 97 % HR, les animaux perdent seulement 1 % de leur eau initiale, mais ils peuvent en gagner 2 % au bout de trois jours. Dans une atmosphère à 82 %, ils perdent 2 % de leur eau initiale après un jour d'expérience et continuent à en perdre jusqu'à 6 % au bout du troisième jour. Le premier jour, ceux qui sont placés dans une ambiance à 72 % HR perdent 5 % de leur eau initiale et ceux qui sont placés à 60 % HR, jusqu'à 10 %. Confrontées à des humidités relatives de 37 %, 15 %, 6 %, 0,8 %, 0,2 % et 0 % (chlorure de calcium), les blattes ont perdu de 7 à 40 % de leur eau initiale au bout du premier jour, mais elles ont mieux résisté pendant

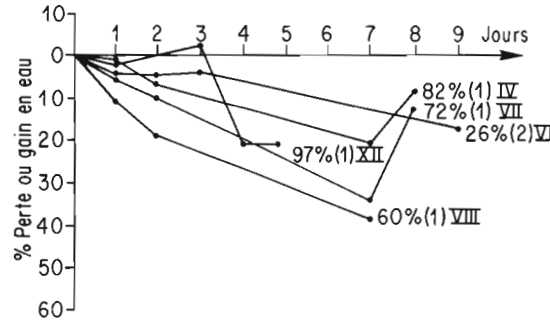


FIGURE 6 - *Moyennes des taux de pertes ou de gains d'eau des cafards des sables maintenus dans des atmosphères à humidité relative (HR) constante, exprimées en pourcentages de la teneur initiale d'eau corporelle. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre d'individus testés, et les chiffres romains représentent les mois où s'est déroulée l'expérience.*

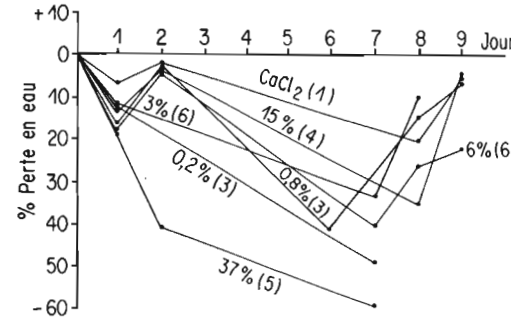


FIGURE 7 - *Même légende que pour la figure précédente, mais pour des HR(s) plus basses.*

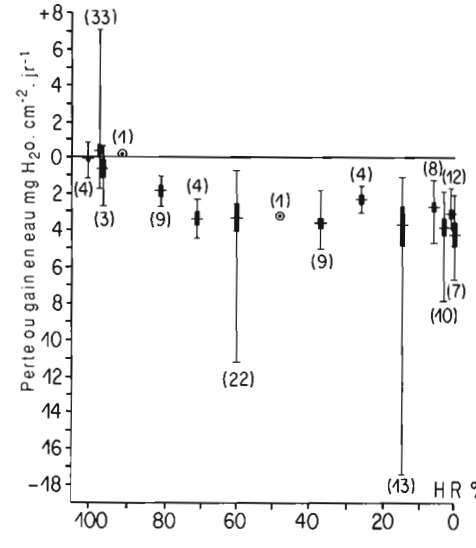


FIGURE 8 - *Moyennes des taux de pertes ou de gains d'eau des cafards des sables maintenus dans des atmosphères d' HR constante, exprimées en terme de flux : mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$. Les lignes verticales représentent les amplitudes des observations, les bandes verticales, les écarts-types, et les lignes horizontales les moyennes. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre des individus testés et les chiffres romains le mois de l'expérience. Les observations sans chiffre ont été faites durant plus d'un mois.*

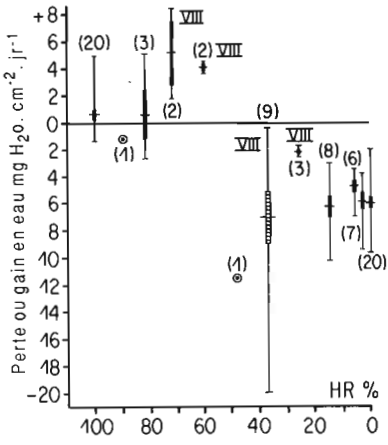


FIGURE 9 - *Même légende que la figure précédente, mais pour des cafards des sables placés dans une atmosphère d'HR constante immédiatement après leur capture sur le terrain, sans acclimation préalable au labo.*

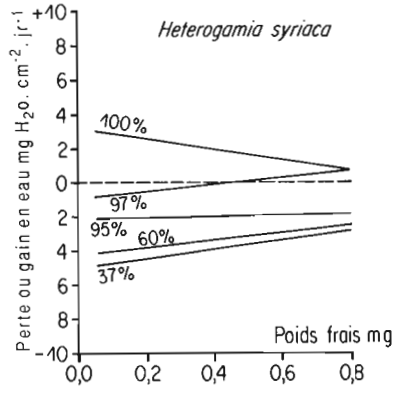


FIGURE 10 - *Droites de régression linéaire des pertes ou des gains d'eau des cafards des sables par rapport aux poids frais, à humidité relative constante. Les valeurs en % placées sur chaque droite indiquent l'humidité relative.*

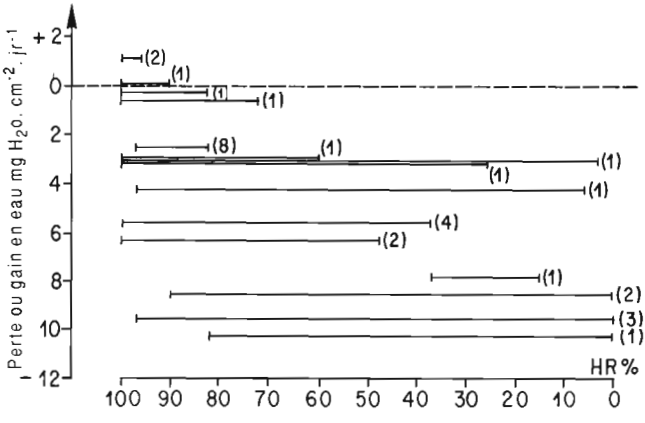


FIGURE 11 - *Moyennes des taux de pertes ou de gains d'eau des cafards des sables transférés d'une HR élevée à une HR plus basse. Les lignes horizontales représentent l'HR initiale (à gauche) et finale (à droite). Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre d'individus testés.*

les deux jours suivants (fig. 7), ce qui peut traduire une sorte de régulation physiologique au cours de cette seconde période. Dans tous les cas examinés, les pertes hydriques sont peu importantes, par comparaison avec d'autres animaux de taille semblable comme les cloportes. Ceci témoigne de la forte résistance à la sécheresse des cafards des sables à l'intérieur de la porosphère pendant un certain nombre de jours.

Si la perte et le gain d'eau sont mesurés en terme de flux hydrique par unité de surface corporelle (mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$), on constate que les animaux sont capables de contrôler leurs échanges hydriques vers l'atmosphère à raison de 2 à 4 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$ pour le premier jour, pour des exemplaires préalablement équilibrés dans les boîtes de Petri (fig. 8), à toutes les humidités relatives entre 0 et 80 %. De plus, on vérifie l'existence d'un équilibre à 100 % HR et même un gain de 0,3 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$ à 97 % HR.

Lorsque les cafards sont traités en provenance directe du terrain sans passer par une période d'acclimatation, on constate 2 phénomènes bien contrastés ; entre 0 % et 5 % HR, la perte d'eau au bout d'un jour est de 6 à 7 $mg.cm^{-2}.j^{-1}$, tandis qu'entre 50 et 100 % HR, les cafards semblent gagner de l'eau atmosphérique à raison de 0,5 à 5 $mg.cm^{-2}.j^{-1}$. Le gain hydrique entre 60 % et 72 % HR est remarquablement élevé surtout quant il s'agit d'individus récoltés en août. Les pertes et les gains d'eau sont plus marqués chez les jeunes immatures que chez les adultes de plus grande taille (fig. 10).

Variations de la teneur en eau corporelle chez les animaux transférés d'une humidité relative à l'autre

Après acclimatation à humidité relative élevée, les cafards sont placés ensuite dans une atmosphère à faible humidité relative et vice versa. Les individus acclimatés entre 90 % et 100 % HR maintiennent leur gain hydrique entre 0,1 et 1 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$, mais pour les individus acclimatés dans une atmosphère à humidité relative inférieure à 90 %, les pertes d'eau corporelle sont très importantes et peuvent atteindre 10 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$ (fig. 11). Chez les animaux acclimatés aux humidités relatives basses, puis transportés dans des ambiances à humidités relatives plus élevées (fig. 12), le gain hydrique devient important pour atteindre une valeur de 5 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$. S'il existe des pertes hydriques, elles n'excèdent pas 4 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$. Quand il y a un gain, celui-ci est un peu inférieur à celui obtenu chez l'animal mort, qui est de l'ordre de 5 mg $H_2O.cm^{-2}.j^{-1}$ à 100 % HR et de 6 mg $H2O.cm^{-2}.j^{-1}$ à 97 % HR (*cf. infra*).

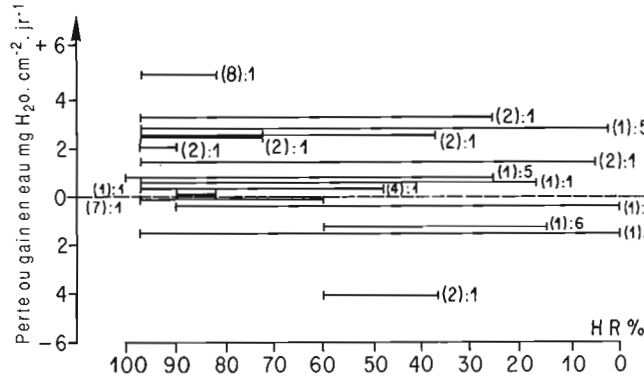


FIGURE 12 - *Moyennes des taux de pertes ou de gains d'eau des cafards des sables transférés d'une HR faible à une HR élevée. Les lignes horizontales représentent l'HR initiale (à droite) et finale (à gauche). Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre des individus testés, et faisant suite, le nombre de jours de l'expérience.*

Absorption de vapeur d'eau par les cadavres

Les animaux morts ont été déshydratés dans une atmosphère à 0 % HR (chlorure de calcium), puis ils ont été placés dans une ambiance à 97 % ou à 100 % HR (tabl. III et fig. 13). Le taux d'absorption d'eau atmosphérique à 97 % HR est plus élevé, de presque 25 %, qu'à 100 % HR. Les cadavres de 220 mg de poids frais en moyenne ont gagné juqu'à 37 % de leur poids à 97 % HR, avec un taux d'absorption de 6,3 mg H_2O .cm^{-2}.j^{-1}, tandis que les cadavres de 196 mg de poids frais n'ont gagné que 30 % de leur poids à 100 % HR, avec un taux d'absorption de 5,0 mg H_2O.cm^{-2}.j^{-1}. Il faut noter que ces gains ne sont pas forcément dus à l'absorption mais aussi à l'adsorption. Dans le contexte de notre étude, nous n'avons pas pu distinguer ces 2 phénomènes de fixation d'eau corporelle chez *Heterogamia syriaca*.

Tableau III - Perte hydrique en atmosphère desséchée et gain par le corps de l'animal mort en ambiance humide chez *Heterogamia syriaca*

JOUR	N	MOYENNE MG POIDS FRAIS	ÉCART-TYPE	% CHANGEMENT
Initial	7	501,6	54,2	--
1er	7	360,8	47,8	- 28,1
2e	7	280,6	35,5	- 22,2
7e	7	155,9	7,3	- 8,9
14e	7	154,1	7,1	- 0,2
Transfert à une atmosphère d'humidité relative élevée				
1er	2*	219,9	27,1	+ 31,9
1er	5**	195,7	5,8	+ 29,4

* Transfert à 97 % HR
** Transfert au-dessus de l'eau pure (ca. 100 % HR)

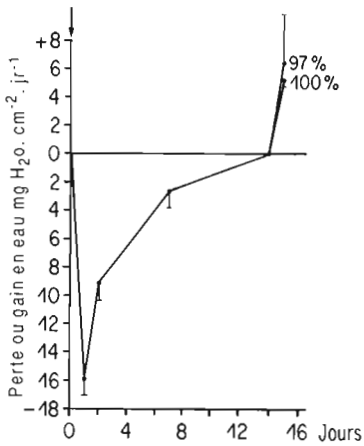


FIGURE 13 - *Moyennes des taux de pertes des cafards des sables sacrifiés par déshydratation au-dessus du chlorure de calcium, et des taux de gains lorsqu'ils étaient placés dans des atmosphères d'HR de 97 % et de 100 %. Les lignes verticales représentent l'écart-type de la moyenne.*

Mesure de la température critique

La figure 14 montre la perte d'eau corporelle du cafard des sables en fonction de l'évaluation de la température ambiante. Ces insectes perdent 0,01 $mgH_2O.cm^{-2}.heure^{-1}$ chaque fois que la température de l'air augmente de 1 °C entre 20 et 40 °C ; pendant cette période, la perte hydrique n'a pas dépassé 1 mg $H_2O.cm^{-2}.h^{-1}$. En revanche, les animaux perdent leur eau corporelle de manière significative à partir de 40 °C avec un flux de 0,16 mg $H_2O.cm^{-2}.heure^{-1}$ (pour un croît de 1 °C jusqu'à 70 °C, le flux atteint la valeur de 5 $mg.cm^{-2}.h^{-1}$). La courbe de variation de flux est ajustée à 2 droites de régression linéaire qui se coupent à 42,5 °C. Ce point de rupture peut être considéré comme la température critique à laquelle la couche épicuticulaire cireuse se modifie. Au-delà de cette limite, le flux s'accroît brutalement pour atteindre 6 $mgH_2O.cm^{-2}.h^{-1}$. La température critique est proche de la température létale qui se définit comme la limite thermique où 50 % des individus meurent dans un délai de 30 min à 24 h. Chez *Heterogamia syriaca*, la mortalité est de 25 % à 40 °C, de 50 % à 42 °C, de 100 % à 45 °C. Notons que l'on a enregistré une faible perte hydrique à 60 °C malgré les conditions léthales pour l'espèce.

Par ailleurs, VANNIER et GHABBOUR (1983), en utilisant une méthode microgravimétrique, ont trouvé que la couche cireuse de *Heterogamia syriaca* conserve son rôle protecteur jusqu'à une température de 56 °C. Il est donc probable que cette couche lipidique se dissocie en plusieurs phases sous l'effet de la chaleur avant de perdre ses propriétés d'imperméabilité à la diffusion de la vapeur d'eau. Cette période de fusion de la couche cireuse correspond d'ailleurs à la phase d'activité motrice des cafards des sables, qui a été mesurée dans la plage thermique de 40 à 56 °C (VANNIER et GHABBOUR, 1983). Il est possible que la chaleur puisse rythmer la vie des cafards dans le désert, surtout à la surface du sable qui peut parfois atteindre la température critique quand le soleil est au zénith.

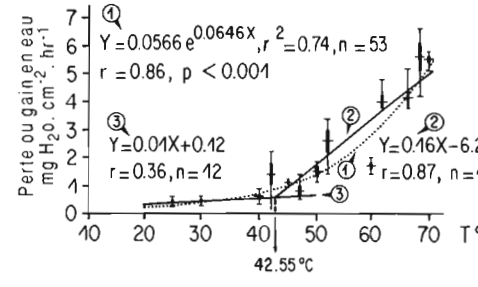


FIGURE 14 - *Droites de régression linéaire illustrant les deux phases de perte d'eau corporelle des cafards des sables exposés à des températures de 20 à 70 °C. Les lignes verticales représentent les amplitudes des observations, les bandes verticales l'écart-type en plus ou en moins des moyennes, et les lignes horizontales les moyennes. Les deux droites se croisent à 42,5 °C. Toutefois, la courbe exponentielle est aussi représentée. Chaque droite ou chaque courbe est représentée par son équation avec son coefficient de corrélation.*

DISCUSSION

En évoquant la vie animale dans les zones arides, et en particulier au Sahara, on distingue 2 types d'adaptation, l'une à la sécheresse, l'autre à la chaleur. Il vient aussi à l'esprit la présence de 2 grands groupes d'animaux désertiques :

- le premier (insectes et reptiles) comprend des espèces «préadaptées», pourvues de téguments imperméables et de mécanismes néphridiens particuliers ;
- le second (mammifères et oiseaux) est représenté par des espèces «non adaptées», qui se sont néanmoins adaptées à la vie désertique après un long apprentissage et au prix d'une forte sélection naturelle.

En réalité, ces 2 groupes ne concernent qu'un petit nombre d'espèces par rapport à l'ensemble de celles qui représentent ces classes zoologiques. En effet, la vie dans les déserts exige des adaptations très poussées que l'on rencontre chez les fourmis et chez les coléoptères (surtout les Ténébrionides), ces 2 groupes de loin les plus abondants dans les zones arides. Les coléoptères peuvent équilibrer leur balance hydrique corporelle grâce à la forte épaisseur de leur tégument, en particulier au niveau de leurs élytres, et à leur capacité de récupérer l'eau de rosée au cours d'un nycthémère. Les fourmis maintiennent leur bilan hydrique grâce à ce que l'on appelle une «physiologie sociale» qui leur permet d'entretenir un degré hygrométrique élevé et constant à l'intérieur de leur fourmilière, quelles que soient les variations climatiques extérieures. Les cafards des sables ont recours à d'autres moyens pour se maintenir et se développer dans le désert côtier méditerranéen d'Égypte où le climat est très inhospitalier :

- ils utilisent leur réserve de graisse qui, au cours de la lipolyse, leur fournit de l'eau de synthèse en quantité suffisante pour supporter la saison chaude et sèche ;
- ils exercent un contrôle de leur perte d'eau transpiratoire lorsque l'humidité relative de l'air diminue ;
- ils possèdent la capacité d'absorber de l'eau atmosphérique aussi longtemps que le degré hygrométrique de l'air ambiant est égal ou supérieur à 75 %. Ce phénomène d'absorption de vapeur d'eau est d'ailleurs amplifié chez les formes immatures, comme les nymphes (fig. 10) ;
- leur température létale est élevée, de sorte qu'ils peuvent conserver le contrôle de leur perte hydrique corporelle jusqu'à 40 °C ; au-delà de cette limite thermique, l'efficacité de leur couche épicuticulaire cireuse pour freiner le passage de la vapeur d'eau se manifeste encore jusqu'à 56 °C ;
- la forme circulaire et bombée du corps, qui ressemble à un bouclier pourvu d'une frange de poils à sa périphérie, contribue à renforcer son adaptation à la vie désertique ; VANNIER et GHABBOUR (1983) ont montré que *Heterogamia syriaca* perdait moins d'eau face dorsale que face ventrale.

Malgré ces remarquables adaptations et d'autres qui restent encore à découvrir, *Heterogamia syriaca* est incapable de s'aventurer dans les zones hyperarides du Sahara comme le font les fourmis et les ténébrionidés. Les cafards des sables sont donc limités aux régions où l'humidité relative de l'air dans la porosphère est compatible avec leur physiologie. Ils trouvent un confort hydrique relatif en profondeur car ce sont des insectes inféodés aux sables non consolidés. Lorsque le sol devient compact et que la porosphère régresse, les cafards des sables se raréfient. C'est précisément le cas là où le pâturage est contrôlé ou interdit (CANCELA DA FONSECA *et al.*, 1984). On peut donc conclure que *Heterogamia syriaca* est une espèce fouisseuse, caractéristique des biotopes de la zone xéro-méditerranéenne à couvert végétal formé d'arbustes et d'épineux, soumis au surpâturage, avec un sol sableux, pauvre en matière organique, meuble, qui offre une porosphère volumineuse, sous un climat qui permet le maintien d'une humidité relative de l'air, à l'intérieur du sol, entre 75 et 80 %, pour satisfaire l'équilibre de la balance hydrique corporelle des individus.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont heureux de remercier monsieur le professeur AYYAD *de l'université d'Alexandrie, directeur des projets Samdene et Remdene, et toutes les instances qui ont prêté leur concours à ces deux projets, l'université d'Alexandrie, l'académie de la Recherche scientifique et technologique, la US/Epa et la fondation Ford. Nous remercions aussi MM.* VANNIER *et* LE FLOC'H *pour le soin pris au perfectionnement de notre manuscrit, et M.* TARIK LABIB *pour son aide précieuse.*

S. I. GHABBOUR, M. A. RIZK, W. Z. A. MIKHAIL : *zoologistes*, Département des ressources naturelles, Institut de recherches et d'études africaines de l'université du Caire, 12 613 Giza, Le Caire, Égypte

Bibliographie

ABDEL-KADER (F. H.), GEWAIFEL (I.) et EL-ZAHABY (M. N.), 1975. - A study of calcium carbonate in a toposequence at Bourg El Arab Area, Egypt. *Egypt. J. Soil Sci.*, 15 : 1-10.

ABEL (W. O.), 1956. - Die Austrochnungsresistenz der Laubmoose. *S. B. Akad. Wiss., math., nat.*, K., 1, 165 : 619-707.

AYYAD (M. A.), 1983. - The experience of Samdene and Remdene Projects. Paper presentated at : 3rd Symp. Environmental Sciences in Developing Countries, Cairo, Egypt, Apr. 1983, 20 p.

AYYAD (M. A.), ABDEL-RAZIK (M.) et MEHANNA (A.), 1984. - Climatic and vegetational gradients in the Mediterranean desert of Egypt. *Bull. Soc. bot. France*, 131 : 129-143.

AYYAD (M. A.) et GHABBOUR (S. I.), 1977. - Systems Analysis of Mediterranean Desert Ecosystems of Northern Egypt (Samdene). *Environ. Conserv.*, 4 : 91-101.

AYYAD (M. A.) et GHABBOUR (S. I.), 1986. - The Omayed Biosphere Reserve : History and future prospects. Paper presented at : Atelier sur les réserves de la biosphère en région méditerranéenne, Réserve de la biosphère des Cévennes, Florac, France, sept. 1986 : 20 p.

BOULOS (L.), 1975. - L'Étage saharien en Égypte : ses divisions et ses caractéristiques écologiques et floristiques. Publ. Cairo. Univ. *Herbarium*, 6 : 7-14.

CANCELA DA FONSECA (J. P.), GHABBOUR (S. I.) et HUSSEIN (A. K.), 1984. - Characterization of soil mesaufauna in a xero-Mediterranean ecosytem after a 3-year grazing managment. *Ecol. Mediterr.*, 10 : 121-131.

CLOUDSLEY-THOMPSON (J P.), 1967. - *Microecology*, Studies in Biology 6, Arnold, London, 49 p.

CRAWFORD (C. S.), 1981. - *Biology of Desert Invertebrates*. Springer-verlag, Berlin, 282 p.

EDNEY (E. B.), 1977. - *Water Balance in Land Arthropods*. Springer-Verlag, Berlin, 282 p.

EDNEY (E. B.) et MC FARLANE (J.), 1974. - The effect of temperature on transpiration in the desert cockroach Arenivaga investigata, and in Periplaneta americana. *Physiol. Zool.*, 47 : 1-12.

GHABBOUR (S. I.), 1988. - La réserve de la biosphère d'Omayed : problèmes et propositions pour réhabilitation. Séminaire sur l'application du «Plan d'action pour les réserves de la biosphère», en région méditerranéenne, Barcelone, Espagne, oct. 1988, (en préparation).

GHABBOUR (S. I.) et MIKHAIL (W. Z. A.), 1977. - Variations in chemical composition of Heterogamia syriaca Sauss. (Polyphagidae, Dictyoptera) ; a major component of soil fauna in the Mediterranean coastal desert of Egypt. *Rev. Biol. Ecol. Méditerr.*, 4 : 89-104.

GHABBOUR (S. I.), MIKHAIL (W. Z. A.) et RIZK (M. A.), 1977. - Ecology of soil fauna of Mediterranean desert ecosystems in Egypt. I.- Summer populations of soil mesofauna associated with major shrubs in the littoral sand dunes. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 14 : 429-459.

GOOMA (A. M.), FATHI (A.), EL-ZAHABY (E. M.), MOUKABEL (M.) et NAGIB (M.), 1978. - Morphological, chimical and hydrophysical soil characteristics. *Samdene Progress Report*, 4, 3, ch. 5, 55 p.

KASSAS (M.), 1979. - *Analysis and management of Mediterranean desert ecosystems*. Proc. Int. Samdene Workshop, Alexandria, Egypt, jan. 1979, University of Alexandria, 178 p.

LOUW (G. N.) et SEELY (M.), 1982. - *Ecology of desert organisms*. Longmans, London, 194 p.

SOLOMON (M. E.), 1951. - Control of humidity with potassium hydroxide, sulphuric acid, or other solutions. *Bull. Entomol. Res.*, 42 : 543-554.

TOOLSON (E. C.), 1978. - Diffusion of water through the arthropod cuticules : Thermodynamic considerations of the transition phenomenon. *J. Thermal Biol.*, 3 : 69-73.

VANNIER (G.), 1971. - Signification de la persistance de pédofaune après le point de flétrissement permanent dans les sols. *Rev. Écol. biol. sol.*, 8 : 343-365.

VANNIER (G.), 1975. - Étude de la rétention hydrique chez l'insecte collembole *Tetrodontophora bialensis*. *Pedobiologia*, 15 : 68-80.

VANNIER (G.), 1976. - Principaux modes d'étude de la balance hydrique chez les acariens. *Acarologia*, 18 : 3-19.

VANNIER (G.), 1987. - The porosphere as an ecological medium emphasized by Professor Ghilarov's work on soil animal adaptations. *Biol. Fert. Soils*, 3 : 39-44.

VANNIER (G.) et GHABBOUR (S. I.), 1983. - Effects of rising ambient temperature in the cockroach *Heterogamia syriaca* Sauss. from the Mediterranean coastal desert of Egypt. *In* : Ph. Lebrun *et al.* (eds.), *New Trends in Soil Biology*, Louvain-la-Neuve, Belgique : 441-453.

WALLWORK (J. A.), 1982. - *Desert Soil Fauna*. Praeger, New York, 296 p.

Henri-Noël Le Houérou

Recherches expérimentales sur la tolérance du mouton barbarin à l'inanition et à la restriction alimentaire

Relations entre la consommation d'énergie et la variation de poids

INTRODUCTION, PROBLÉMATIQUE

Contrairement aux cultures fourragères ou aux pâturages semés, l'évaluation de la production consommable d'un terrain de parcours pose des problèmes complexes.

Les difficultés tiennent à plusieurs causes :

- l'hétérogénéité de la végétation, à la fois dans sa composition floristique, dans sa structure et dans sa répartition spatiale ;
- le nombre élevé d'espèces plus ou moins consommées par le bétail, selon leur stade de développement phénologique (ce nombre peut atteindre plusieurs dizaines en un site donné) ;
- la présence d'espèces ignorées du bétail à titre temporaire ou permanent.

Le plus souvent, les évaluations quantitative et qualitative de la valeur d'un parcours sont effectuées par l'estimation de la phytomasse fourragère présente à des intervalles de temps déterminés. Cette estimation peut s'effectuer par des méthodes destructrices (coupe, récolte) ou non. Dans ce dernier cas, on utilise des méthodes indirectes et des techniques diverses, plus ou moins appropriées.

Une telle évaluation ne peut cependant constituer qu'une approximation relativement grossière, en raison de la difficulté pour l'expérimentateur de simuler - ne serait-ce que de manière approchée - le choix alimentaire des animaux. C'est pourquoi, autant que possible, on a recours à des essais de charge, où l'instrument de mesure de la phytomasse consommée et de sa valeur alimentaire est constitué par l'animal utilisateur habituel du parcours dont on se propose de mesurer la production consommable. On ne vise pas à une alimentation optimale des animaux mais seulement à mesurer les quantités apparemment consommées dans des conditions acceptables pour l'éleveur. Bien entendu, des essais de charges peuvent être effectués pour de nombreuses autres raisons : valeur alimentaire de la biomasse présente, palatabilité des espèces, préférences alimentaires, etc.

En connaissant, d'une part, le nombre de jours de pacage, la surface du parcours et les besoins alimentaires des animaux et, d'autre part, la composition floristique, la structure et la phytomasse présente et supposée consommable, ainsi que la valeur bro-

matologique, on peut évaluer la valeur instantanée du parcours avec une approximation suffisante pour l'utilisateur. La répétition saisonnière de l'essai permet ainsi d'estimer la valeur pastorale annuelle ou à long terme du parcours étudié.

Mais cette méthode présente également des difficultés dont la complexité matérielle de mise en œuvre et le coût, élevé par rapport à la simple évaluation de la phytomasse, ne sont pas les moindres. L'expérimentateur se heurte par ailleurs à 2 difficultés méthodologiques importantes :

- le nombre minimal d'animaux, nécessaire pour obtenir des résultats représentatifs de la réalité ;
- le moment où retirer les animaux de la parcelle à évaluer de façon à s'assurer que tout le fourrage consommable a été effectivement consommé.

Le problème des repousses au cours de la période d'essai peut être résolu soit par un choix judicieux de la période, soit par l'utilisation de cages ; la méthode utilisée ici suppose, évidemment, que les besoins théoriques d'entretien des animaux soient connus, ce qui ne pose pas de problème particulier.

Habituellement la technique consiste à accepter une perte de poids des animaux que l'on fixe arbitrairement à une limite préétablie qui peut varier entre 5 et 25 % du poids vif, selon le type habituel de gestion des parcours, la nature des animaux et le système de production dans lequel on se trouve.

La limite arbitraire de perte de poids admissible étant choisie, il se présente alors un second problème : quel déficit alimentaire attribuer à la perte de poids mesurée chez les animaux ? Autrement dit, quel est le taux de conversion de l'unité de perte de poids en unités d'énergie déficitaire ? La connaissance de ce taux de conversion est évidemment nécessaire à l'évaluation de la production effective du parcours.

Le sujet est très mal documenté. Il existe, bien entendu, une très riche littérature sur les relations entre le gain de poids et la consommation d'énergie chez les ruminants domestiques, principalement pour les animaux en croissance. Il existe également des données, beaucoup moins abondantes, sur le métabolisme en régime de jeûne chez les bovins et chez les ovins (Benedict et Ritzman, 1927 ; Blaxter, 1962). Cependant, nous n'avons trouvé que 2 références relatives au sujet qui nous préoccupe (Meyer et Clawson, 1964 ; Meyer *et al.*, 1982) ; au plus, ces références concernent-elles de jeunes béliers castrés, issus de la race croisée de Californie. Il ne semble pas exister de références sur la race barbarine ni sur des ovins adultes menés en élevage extensif.

La race barbarine *lato sensu* constitue une importante population ovine en Afrique du Nord (Égypte, Libye, Tunisie) et au Proche-Orient (Syrie, Iraq, Arabie Saoudite, Jordanie, Turquie, Israël) ; elle comprend environ 60 millions de têtes. Sa particularité anatomique et physiologique d'accumuler du tissu adipeux dans la queue en fait un animal particulièrement adapté aux zones arides et à la pénurie périodique de fourrage. Il était donc intéressant, à de nombreux titres, d'étudier les réactions du mouton barbarin adulte à la sous-nutrition, situation chronique dans l'aire géographique d'extension de la race.

Les résultats obtenus par Meyer et Clawson (1964) sur de jeunes béliers castrés, âgés de cinq mois, montrent une réponse non linéaire à la restriction alimentaire, avec des taux de conversion de 11 à 12,8 Mcal énergie brute (EB) de déficit énergétique par rapport à la ration d'entretien pour chaque kilogramme de perte de poids vif sur une période de 42 jours : soit environ 4,3 à 5 unités fourragères laitières (UFL) de déficit énergétique net par kilogramme de perte de poids. C'est-à-dire 5 UFL pour une ration qui représente 65 % des besoins d'entretien et 4,3 UFL pour une ration qui correspond à 33 % des besoins énergétiques d'entretien.

Le nombre de régimes de restriction alimentaire administrés dans l'expérimentation mentionnée ci-dessus est insuffisant pour déterminer les taux de conversion sous des régimes de sous-nutrition relativement faibles ou, au contraire, intenses.

MÉTHODES, TECHNIQUES ET MOYENS

L'expérimentation, objet de la présente communication, a été menée en Libye en 1982 au Projet de développement pastoral de Wishtata à 45 km au sud-est de Tarhuna, à mi-chemin entre cette ville et celle de Beni Walid. Le site se trouve à 32° 25′ de latitude nord et 12° 38′ de longitude est ; son altitude est de 450 m.

Les principales caractéristiques climatiques sont :

- une pluviosité moyenne annuelle de 135 mm, répartis d'octobre à avril ;
- une moyenne des températures minimales journalières de janvier de 5,7 °C ;
- une moyenne des températures maximales journalières de juillet de 36,4 °C ;
- une température moyenne annuelle de 21 °C ;
- une évapotranspiration potentielle annuelle évaluée à 1 500 mm (LE HOUÉROU *et al.*, 1982).

Faute de jeunes béliers en nombre suffisant, les animaux utilisés étaient de jeunes brebis de dix-huit à vingt-quatre mois non encore saillies. Les animaux présentaient un poids de 45,5 kg ± 2,5 kg. 11 groupes de 7 animaux ont été constitués ; chaque groupe, qui représentait au départ la variation de poids de l'ensemble du lot, a été soumis à un régime différent, depuis le jeûne absolu jusqu'à la mise à disponibilité de 171 % de la ration d'entretien, calculée d'après les données de la littérature (JARRIGE *et al.*, 1978). Les régimes initialement calculés et prévus représentaient respectivement 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 et 200 % de la ration d'entretien ; mais, par suite d'un nombre d'incidents et d'accidents mineurs, les rations réelles administrées ont été les suivantes :

- groupe A, jeûne complet, eau *ad lib.* ;
- groupe B, 25 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe C, 48 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe D, 68 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe E, 87 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe F, 102 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe G, 120 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe H, 126 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe I, 142 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe J, 159 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.* ;
- groupe K, 171 % de la ration d'entretien, eau *ad lib.*

L'alimentation au cours de la période compensatoire était fournie *ad lib.* et composée de la même manière, paille-urée et grain d'orge. Les groupes A, B et C furent réalimentés progressivement jusqu'à la ration *ad lib.* pendant une durée de sept à dix jours avec une croissance de la ration de 100 $g.j^{-1}$ en paille-urée et en grain.

Les animaux étaient maintenus en permanence dans des enclos carrés de 5 m de côté, situés à l'air libre, sans ombrage, à proximité de leur zone habituelle de parcours. Ces enclos comprenaient une aire individuelle d'alimentation, de 1 m^2 environ, et un parc commun, de repos et d'exercice, de 18 m^2.

L'expérimentation a duré cinq mois (du 4 juillet au 28 novembre 1982), après une période préexpérimentale d'adaptation à la ration qui a duré quarante jours (du 25 mai au 3 juillet). Cette période, relativement longue, a été nécessaire d'une part pour ajuster la ration d'entretien et pour adapter les animaux à ce type de fourrage et à l'urée et, d'autre part, pour entraîner le personnel d'encadrement et d'exécution à la rigueur nécessaire à l'expérimentation.

La ration se composait d'éléments largement disponibles dans la région, orge en paille et en grain, récoltés sur place, et urée du commerce à 46 % d'azote. La proportion d'urée ajoutée à la paille, initialement de 1,5 % sur la matière sèche, fut réduite à 1 % au cours de la période préexpérimentale, à la suite d'un léger symptôme d'intoxi-

cation sur un animal. La quantité maximale d'urée ingérée par jour a été ainsi de 4 g.tête^{-1}.j^{-1} au cours de la période expérimentale, pour des animaux qui ingéraient 400 g de MS de paille et 450 g de grain d'orge. Le mélange était opéré par dilution de 200 g d'urée dans 10 l d'eau pour chaque balle de paille de 24 kg à 93 % de MS.

En raison de la limite supérieure d'ingestion de la paille dans les rations les plus abondantes, les proportions de paille-urée et de grain ont varié en fonction de la ration dans les fourchettes suivantes :

- paille, de 53 % (lot B) à 21 % (lot K), en pourcentage de la MS du menu ;
- grain, de 47 % (lot B) à 79 % (lot K).

L'apport azoté était ainsi :

- grain, de 60 % (lot B) à 85 % (lot K) ;
- urée, de 40 % (lot B) à 15 % (lot K).

L'apport d'urée correspond à la nécessité d'éliminer le problème de carence azotée afin que les variations de poids résultent seulement du régime énergétique et qu'elles ne puissent être attribuées à un éventuel déséquilibre de la ration, raisonnement vérifié et confirmé au cours de la période préexpérimentale de quarante jours (*cf. supra*).

Pendant la période de croissance compensatoire, l'alimentation comprend les mêmes éléments, fournis *ad lib.* ; l'offre journalière était égale à la consommation de la veille augmentée de 25 %. Toutefois, le groupe A, soumis au jeûne, a reçu une ration croissante jusqu'à une ration *ad lib.* sur une période de dix jours ;

Les animaux avaient accès individuellement à une ration calculée pour chaque animal en fonction de son poids initial. La ration de paille était distribuée le matin, entre 9 h et 10 h, et celle de grain d'orge le soir, entre 16 h et 17 h. L'eau était disponible *ad lib.*, sauf au cours de la nuit qui précédait la pesée hebdomadaire. Pour l'aliment et pour l'eau, les quantités offertes et refusées étaient pesées quotidiennement avant la distribution de paille, le matin ; pour l'aliment, la pesée concernait chaque animal, mais pour l'eau, disponible en commun, nous ne disposons que des consommations journalières par groupe.

Les animaux, dûment déparasités et vaccinés, sont demeurés sous contrôle vétérinaire quotidien depuis le début de la période préexpérimentale jusqu'à la fin des mesures.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Consommation et valeur énergétique de la paille

La période préexpérimentale et l'expérimentation proprement dite, basées sur 2 058 observations journalières, ont montré qu'une ration de paille à 1 % d'urée, complémentée par 400 à 450 g.tête^{-1}j^{-1} de grain d'orge, présente une valeur énergétique nette de 0,52 à 0,54 UFL.kg^{-1} MS*. Le chiffre de 0,54 UFL EN.g^{-1} MS résulte de 1 386 observations effectuées sur 77 animaux pendant la période préexpérimentale de quarante jours ; celui de 0,52 UFL EN.g^{-1} MS provient du groupe de contrôle F, d'abord de 7 animaux puis de 6 (ration d'entretien), pendant 112 jours, soit 672 observations. Al Khazraji *et al.* (1981) ont obtenu en Libye les chiffres de 0,53-0,55 UFL.kg^{-1} MS

*Ces chiffres ont été obtenus à partir du maintien constant du poids atteint par tâtonnement à partir du calcul des besoins théoriques. La valeur du grain d'orge étant connue et virtuellement constante dans la littérature (se basant sur la MS), la valeur de la paille-urée dans le mélange s'obtient par différence.

avec les mêmes proportions de paille et de concentré sur des agneaux barbarins âgés de trois à neuf mois avec des consommations journalières de paille d'orge de 25 à 35 $g.kg^{-0.75}$, tandis que nous avons obtenu une consommation maximale de 23 $g.kg^{-0.75}$, c'est-à-dire 400 $g.tête^{-1}.j^{-1}$. Les valeurs plus élevées trouvées par AL KHAZRAJI s'expliquent par la nature du concentré utilisé (son de blé + tourteau de soja + tourteau de coton + grains d'orge et de blé) qui contient 15 % de protéines brutes digestibles, c'est-à-dire 2 fois plus que le grain d'orge utilisé ici. La paille d'orge sans concentré et sans urée présente une valeur de 0,44 à 0,47 $UFL.kg^{-1}$ MS selon divers auteurs (KARAM *et al.*, 1977 ; KEARL *et al.*, 1979 ; DEMARQUILLY, 1981 ; ECONOMIDES *et al.*, 1981 ; LE HOUÉROU *et al.*, 1983 ; ALIBES et TISSERAND, 1990 ; etc.).

La consommation maximale de paille a augmenté progressivement avec la proportion de grain dans la ration, jusqu'à un maximum, puis elle a diminué progressivement lorsque la proportion de grain a dépassé 60 % de la MS de la ration (fig. 1). La consommation maximale de 400 g de MS de paille par tête et par jour a été obtenue pour une ingestion de 450 g de grain d'orge. Ces chiffres sont comparables à ceux obtenus par AL KHAZRAJI *et al.* avec un concentré plus riche en azote (*cf. supra*) : 425 $g.t^{-1}.j^{-1}$ pour la paille et 500 $g.t^{-1}.j^{-1}$ pour le concentré.

La consommation de paille sans concentré ne dépasse pas 250 g $MS.t^{-1}.j^{-1}$. Elle retombe progressivement à cette valeur lorsque la quantité de grain ingérée atteint 1 000 $g.t^{-1}.j^{-1}$.

Pour les groupes E à K, où la paille était fournie *ad lib.*, les proportions paille/grain consommés ont été les suivantes :

E, 1,17 ; F, 1,06 ; G, 0,80 ; H, 0,51 ; I, 0,39 ; J, 0,32 ; K, 0,23.

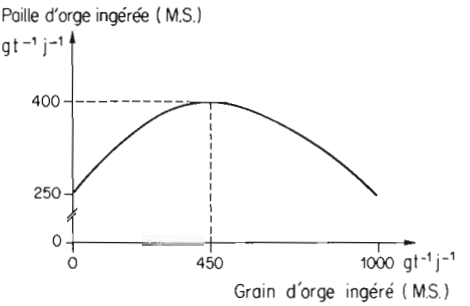


FIGURE 1- *Consommation de paille en fonction de la consommation de grain d'orge.*

Besoins d'entretien

Les besoins énergétiques d'entretien en stabulation ont été calculés d'après les données de la littérature : 400 MJ d'énergie métabolisable (EM) par kilogramme de poids métabolique ($kg^{0,75}$) par jour (= 95 kcal EM ou 0,033 UFL ou 57 kcal EN) (JARRIGE *et al.*, 1978). Le calcul s'est révélé parfaitement exact (fig. 1, 2 et 3). Les besoins en protéines brutes ont été calculés d'après les mêmes sources : 2,52 g PBD par $kg^{0,75}$ par jour (JARRIGE *et al.*, 1978), en se basant sur un taux de digestibilité de 75 % des protéines issues de l'urée.

Ces rations d'entretien ont effectivement permis le maintien à peu près constant du poids des animaux qui y ont été soumis pendant les 190 jours des périodes préexpérimentale et expérimentale.

Relations entre l'énergie consommée et le changement de poids

L'inanition

Le groupe A est resté sans autre ingestion que de l'eau pendant 62 jours. La perte de poids moyenne a été de 17,33 kg soit 275 $g.j^{-1}$. Il y a eu cependant des différences substantielles entre les animaux puisque les pertes ont varié de 14,7 à 19,9 kg, soit 223 à 316 $g.j^{-1}$. la perte de poids par rapport à la situation initiale a été en moyenne de 38 % avec un minimum de 32 % et un maximum de 46 %, c'est-à-dire des pertes journalières moyennes de 0,61 % avec un minimum de 0,52 et un maximum de 0,74 % par rapport au poids initial (figs. 2 et 3).

Bien entendu, pendant les huit premiers jours de jeûne, la perte de poids, de 750 $g.j^{-1}$ en moyenne, a été supérieure aux chiffres ci-dessus en raison de l'élimination progressive du contenu du tractus digestif. Du 8e au 48e jour, elle est restée sensiblement constante, à 255 $g.j^{-1}$ en moyenne, puis elle s'est subitement accélérée du 48e au 62e jour, avec des pertes de 420 $g.j^{-1}$, en moyenne.

La perte de poids attribuable à l'élimination du contenu du tractus digestif peut être estimée à (750 x 8) - (255 x 8) = 4 kg. La perte de poids réelle est donc de 17,33 - 4 = 13,33 kg de poids vif corporel ; c'est-à-dire une perte moyenne de 215 $g.t^{-1}.j^{-1}$ sur 62 jours. Le déficit énergétique par rapport au poids brut initial moyen de 45,73 kg a donc été de 17,59 $kg^{0,75}$ x 0,033 UFL = 0,58 $UFL.j^{-1}$ soit 35,96 UFL ou 62,21 Mcal EN sur une période de 62 jours. Le taux de conversion du déficit énergétique en perte de poids a donc été de 35,96 UFL/17,33 kg = 2,08 $UFL.kg^{-1}$, soit de 2,1. Les chiffres extrêmes ont été les suivants :

- A6, 34,72 / 19,9 = 1,74 ;
- A7, 36,14 / 14,7 = 2,46 fig. 3).

Si on effectue le calcul sur le poids net corporel (sans le contenu digestif), on obtient : 45,73 - 4 = 41,73 = 16,42 $kg^{0,75}$. Le déficit énergétique est alors de : 16,42 x 0,033 UFL = 0,54 $UFL.j^{-1}$, soit sur la période de 62 jours : 0,54 x 62 = 33,48 UFL ou 57,92 Mcal EN. Le taux de conversion du déficit énergétique en perte de poids a donc été alors 33,48 UFL/16,42 kg = 2,04 $UFL.kg^{-1}$ de perte (soit 2 $UFL.kg^{-1}$). Mais si les taux de conversion sont calculés non plus sur la base du poids initial mais sur celle du poids moyen au cours de la période de 62 jours de jeûne, on obtient une moyenne de 31,50 UFL/17,33 kg = 1,82 UFL de déficit par kilogramme de perte de poids vif.

2 animaux sont morts : le premier (A5) le 56e jour et le second (A4) le 63e jour. Ces issues fatales ne peuvent être reliées ni au poids initial, ni au poids final, ni à la perte de poids, puisque parmi les animaux touchés se trouvaient le plus lourd du lot et celui dont le poids égalait la moyenne. Un animal a été sacrifié à la fin de la période de jeûne pour déterminer les différentes composantes du poids vif et de la carcasse. Par rapport aux animaux de même poids initial sacrifiés à la fin de la période préexpérimentale, cet animal se singularisait par les caractéristiques suivantes :

- l'absence de graisse apparente externe et interne ;
- un volume de sang réduit de moitié (0,74 kg au lieu de 1,5 kg) ;
- un rendement de carcasse de 46 % au lieu de 53 % ;
- un poids d'entrailles réduit de 30 % (7 kg au lieu de 10 kg).

La croissance compensatoire s'est prolongée pendant douze semaines à un rythme presque aussi élevé que celui de la perte de poids, avec un gain moyen quotidien de 230 g, soit près de 20 kg en trois mois. Mais si le gain de poids est calculé seulement à partir de la deuxième semaine (pour éliminer l'effet de l'accumulation stomacale), la croissance réelle a été supérieure à ce chiffre de 10 % environ (250 $g.t^{-1}.j^{-1}$) c'est-à-dire un taux virtuellement identique à celui de la perte de poids (255 $g.t^{-1}.j^{-1}$) (fig. 3).

Là aussi on observe des différences considérables d'un individu à l'autre : A7 a repris son poids initial de 46 kg en sept semaines, soit un gain moyen journalier de près de 310 g (maximum observé [mo] = 340 g) ; tandis que A2 n'a repris son poids initial de 44,5 kg qu'en onze semaines avec des gains journaliers moyens de 234 g (mo = 257 g) ; en revanche, A6 n'a pas repris son poids initial de 43,5 kg en douze semaines malgré un gain journalier de 202 g (mo = 222 g), après, il est vrai, une perte de 46 % de son poids initial.

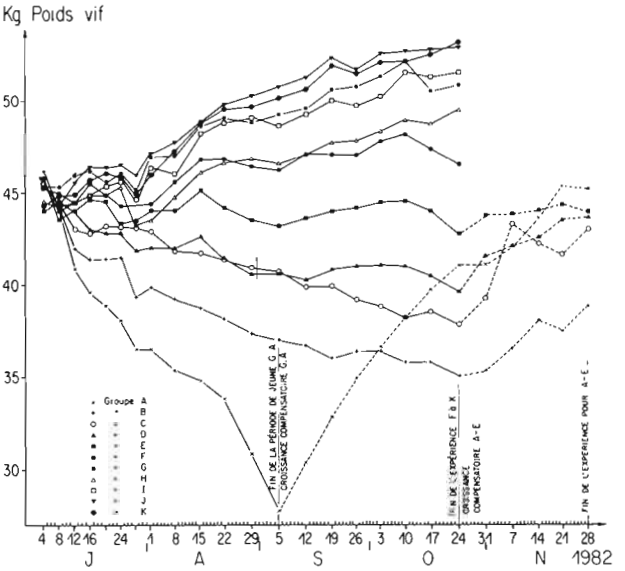


FIGURE 2 - *Changements moyens de poids vif par groupe.*

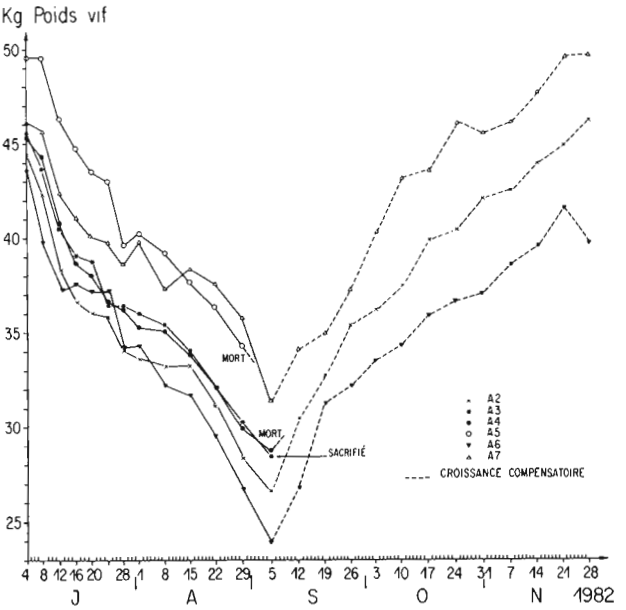


FIGURE 3 - *Changements de poids vif individuel, groupe A.*

Tableau I - Taux de sous-alimentation et perte de poids

Groupes	Ration en % entretien	Perte de poids enkg	Perte de poids %	Perte en $g.j^{-1}$
B	25	11,10	24	99,1
C	48	8,37	18	74,7
D	68	5,35	12	47,8
E	87	0,37	0,8	3,3

Tableau II - Taux de conversion du déficit énergétique à la perte de poids par rapport au poids initial

Groupe	Déficit énergétique UFL/112 j	Perte de poids Kg/112 j	Facteur de conversion
B	49,78	11,10	4,48
C	36,56	8,37	4,36
D	22,23	5,35	4,16
(E)	(8,56)	0,37	(23,13)
Moyenne	36,19	8,27	4,33

Tableau III - Déficits énergétiques, perte de poids et taux de conversion par rapport au poids moyen au cours de la période de sous-nutrition

Groupes	Déficit énergétique	Perte de poids	Facteur de conversion
B	44,78	11,10	4,03
C	31,46	8,37	3,76
D	19,91	5,35	3,72
(E)	(8,35)	(0,37)	(23,14)
Moyenne	32,05	8,27	3,84

Le taux de conversion en phase de croissance compensatoire a été de 4,76 UFL par kilogramme de gain de poids vif.

Ces chiffres montrent la résilience et la flexibilité considérables du mouton barbarin à la restriction alimentaire et son aptitude à reprendre rapidement un poids et un état physiologique normaux après des périodes prolongées de carence alimentaire aiguë. Ce fait était bien connu empiriquement depuis très longtemps, mais il n'avait pas fait l'objet de mesures précises, à notre connaissance.

La sous-alimentation

4 groupes d'animaux ont reçu une ration inférieure aux besoins d'entretien de la façon indiquée au tableau I.

Les différences entre groupes sont hautement significatives ($0{,}0002 < p < 0{,}02$). Les taux de conversion entre le déficit par rapport à la ration d'entretien au poids initial et la perte de poids sont indiqués au tableau II.

Lorsque les taux de conversion sont déterminés par rapport au poids moyen au cours de la période de restriction nous avons les résultats indiqués au tableau III.

En d'autres termes, dans la fourchette de perte de poids de 40 à 100 $g.t^{-1}.j^{-1}$ (2,28 à 5,71 $g.kg^{-0,75}$), le facteur de conversion est de 4,3 UFL ± 0,05 de déficit énergétique par kilogramme de poids perdu par rapport au poids initial et de 3,84 UFL par rapport au poids moyen de la période de restriction alimentaire. En parlant de poids initial, on se réfère, bien entendu, à des animaux en état d'embonpoint «normal».

Si les différences de taux de conversion entre les groupes B, C, D ne sont pas significatives, en revanche elles le sont très hautement entre ces 3 groupes, d'une part, et le groupe A, d'autre part. Le taux de conversion du groupe E n'a, bien évidemment, aucune signification en raison de l'infime perte de poids. La différence de taux de conversion entre ce groupe et le groupe F, dont la ration était de 102 % des besoins d'entretien, n'est pas significative, bien que la consommation énergétique ait différé de 15 % en faveur de ce dernier. Nous avons d'un côté (E) une perte de 3,3 $g.t^{-1}$ et de l'autre (F) un gain de 3,0 $g.t^{-1}.j^{-1}$. On serait tenté d'en inférer que le calcul des besoins d'entretien ne peut être très précis, puisqu'on observe une relative «élasticité» de la réponse des animaux ; ceci expliquerait les chiffres de besoins d'entretien sensiblement différents

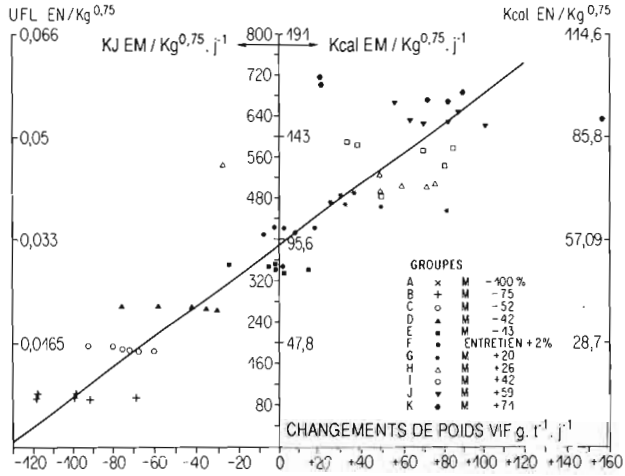


FIGURE 4 - *Ingestion d'énergie et variations de poids vif chez les brebis barbarines non gestantes agées de dix-huit à vingt-quatre mois, Whishtata, juillet-août 1982.*

Tableau IV - La croissance compensatoire (35 jours)

Groupes	Poids initial kg	Poids final kg	Gain kg	Energie ingérée UFL	Facteur de conversion UFL.kg^{-1} gain
B	34,90	38,82	3,92	28,56	7,29
C	37,96	42,96	5,00	27,90	5,58
D	39,84	43,58	3,74	28,84	7,71
(E)	(42,63)	(43,58)	(0,75)	29,10	(38,80)
Moyenne	37,57	41,79	4,22	28,43	6,86

Tableau V - Pertes et gains moyens journaliers, groupes A-E

Groupe	Perte moyenne g.t^{-1}.j^{-1}	Période de perte, j	Gain moyen g.t^{-1}.j^{-1}	Période de gain, j
A	275	62	233	77
B	99	112	110	35
C	75	112	150	35
D	48	112	70	35
E	3,3	112	10	35

Tableau VI - Caractéristiques du gain de poids dans les rations excédentaires par rapport aux besoins d'entretien

Groupe	Ingestion globale UFL/112 j	Gain de poids kg/112 j	Facteur de conversion global	Ingestion en excès de l'entretien	Facteur de conversion de l'excès
(F)	(67,27)	(0,33)	(203,85)	(1,19)	(3,61)
G	80,96	4,73	17,11	13,76	2,91
H	85,64	5,13	16,69	17,44	3,40
I	95,15	6,58	14,46	27,95	4,25
J	110,54	8,37	13,20	41,10	4,91
K	117,15	8,27	14,17	48,83	5,90
Moyenne	97,89	6,62	14,78	29,82	4,50

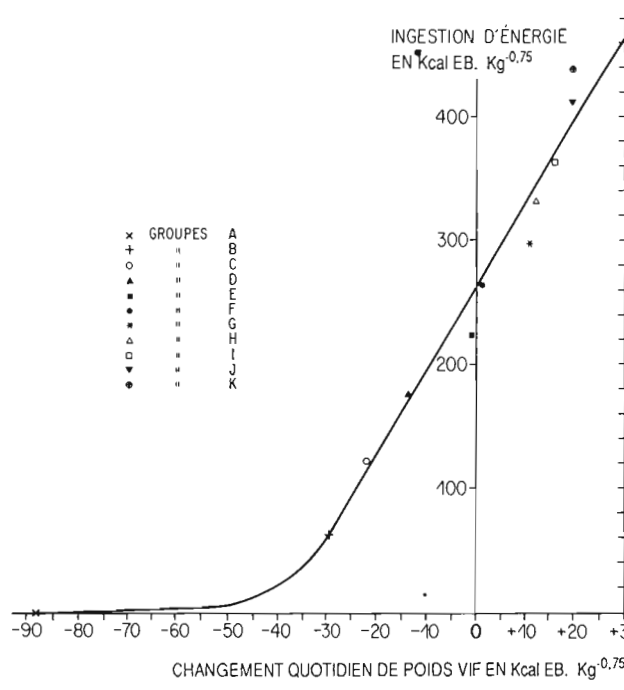


FIGURE 5 - *Changements de poids vif en fonction de l'ingestion d'énergie en kcal EB. kg^{0,75}.*

trouvés par divers auteurs dans des zones géographiquement différentes et dans des conditions contrastées d'élevage.

La variabilité individuelle du taux de conversion à l'intérieur de chaque groupe est élevée (figs. 4 et 5) :

- 3,85 à 6,85 dans le groupe B ;
- 3,40 à 5,51 dans le groupe C ;
- 2,90 à 6,24 dans le groupe D.

La moyenne des 3 groupes est de 4,33 avec un écart-type de 0,98, un coefficient de variation de 22 % et une erreur standard sur la moyenne de 0,054.

LA CROISSANCE DE COMPENSATION

Les caractéristiques principales de la période de croissance compensatoire sont indiquées au tableau IV. Le taux de conversion moyen de 6,9 UFL par kilogramme de gain de poids vif pendant la période compensatoire est voisin de celui trouvé par KARAM *et al.* (1977) dans l'embouche d'agneaux barbarins de Libye : 6,7 à 8,1, selon l'âge des animaux (trois à neuf mois).

Mais ici encore on observe de grosses différences individuelles à l'intérieur de chaque groupe :

- 598 % (1,0 à 5,98 kg de gain) dans le groupe B ;
- 205 % (2,1 à 5,1 kg de gain) dans le groupe C ;
- 188 % dans le groupe D.

Ce taux global de conversion est 2,2 fois plus élevé que le taux global de 15,13 UFL.kg^{-1} de gain observé chez des animaux qui n'ont pas subi de restriction alimentaire (tabl. VI, facteur global de conversion).

Le tableau V montre l'extraordinaire faculté d'adaptation du mouton barbarin à la sous-nutrition et sa capacité de retrouver très rapidement sa condition initiale avec des taux de conversion très élevés pendant la période de récupération. On note des différences considérables de taux de conversion entre individus soumis à des régimes identiques, ainsi qu'on pouvait s'y attendre avec des populations qui n'ont subi d'autre sélection que celle du milieu. Ces différences se retrouvent chez les mêmes animaux aussi bien en phase d'amaigrissement qu'en phase de croissance pondérale ou à l'entretien (*cf. supra*).

Le gain de poids vif en l'absence de restriction préalable

Le tableau VI montre les caractéristiques de changement de poids en fonction de l'énergie ingérée et les taux de conversion correspondants dans les groupes F à K.

Si l'on compare les moyennes des taux de conversion de déficit énergétique-perte de poids (tabl. II) et d'excès énergétique-gain de poids (tabl. VI), on constate que les chiffres sont sensiblement identiques, pour les gammes de pertes et de gains considérées : 4,33 UFL.kg^{-1} de perte et 4,5 UFL.kg^{-1} de gain.

En d'autres termes, dans les conditions de l'expérience - proches des conditions de l'élevage traditionnel dans les steppes arides nord-africaines -, le taux de conversion du déficit énergétique ou celui de l'excès d'énergie de la ration seraient sensiblement identiques : 4,4 UFL par kilogramme de perte ou par kilogramme de gain (figs. 5 et 6).

Ce résultat nous a étonné ; il est cependant identique à celui que Mayer et Clawson (1964) obtiennent pour une perte de poids de 33 % par rapport au poids initial, chez de jeunes béliers castrés de race croisée californienne, d'après les calculs que nous avons effectués à partir des données publiées par ces auteurs.

Il faut souligner de nouveau l'extrême variabilité du taux de conversion d'un animal à l'autre, y compris à l'intérieur de chaque groupe, aussi bien en régime d'alimentation restreinte qu'en régime d'alimentation abondante. Le tableau VII donne un aperçu de cette variabilité avec les paramètres statistiques qui s'y rapportent.

Tableau VII - Variabilité des changements de poids et des taux de conversion dans les divers régimes expérimentés

Groupes	Changements * poids moyen kg.t^{-1}	ET* kg.T^{-1}	CV* %	ES* UFL.kg^{-1}	Tx Conv. UFL.kg^{-1}	ET* %	CV*	ES*
A	- 17,33	1,56	9	0,59				
B	- 11,10	1,91	17	0,72	1,36	0,30	22	0,12
C	- 8,37	1,15	14	0,43	3,54	0,56	16	0,23
D	- 5,35	1,74	32	0,66	8,63	2,23	26	0,91
E	- 0,37	1,11	300	0,42				
F	+ 0,33	0,74	224	0,28				
G	+ 4,73	2,12	45	0,80	19,77	6,98	35	2,85
H	+ 5,13	2,04	40	0,77	15,40	6,17	40	2,51
I	+ 6,58	2,23	34	0,84	18,39	7,34	41	2
J	+ 8,37	1,62	19	0,61	13,68	2,73	20	1
K	+ 8,27	5,14	62	1,94	23,67	19,28	83	7,87

* ET : écart-type ; CV : cœfficient de variation ; ES : erreur standard (ET / $\sqrt{n}$)

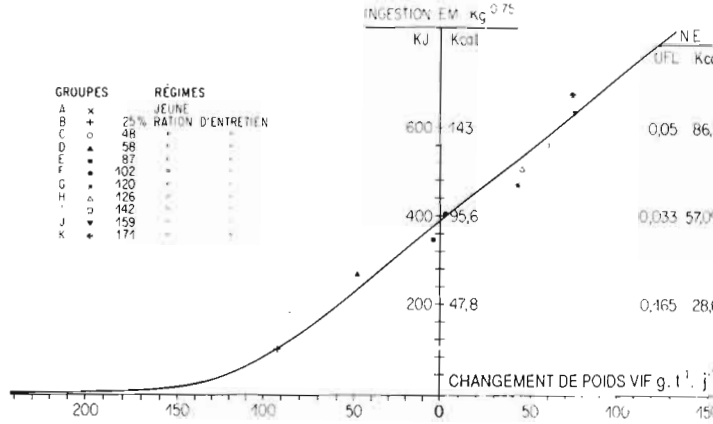


FIGURE 6 - *Ingestion d'énergie et variations de poids vif chez la brebis barbarine non gestante agée de dix-huit à vingt-quatre mois, Whishtata, juillet-octobre 1982.*

On voit que certains groupes montrent une variabilité relativement modérée (A, B, C, J), tandis que d'autres (E, F, K) présentent une variabilité extrême. Cette variabilité est très supérieure à celle rencontrée habituellement dans des expériences de cette nature. Elle peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'une population de tout-venant d'une race locale qui n'a subi aucune sélection artificielle, alors que les expérimentations sont habituellement effectuées en station sur des animaux de races pures longuement sélectionnées, ou issus de croisements entre celles-ci, et donc beaucoup plus homogènes du point de vue génétique.

Une des conséquences de cet état de fait est qu'il faudrait travailler, avec de telles populations de races locales non sélectionnées, sur des lots beaucoup plus importants, probablement de l'ordre de 20 à 25 animaux par traitement, ce qui devient coûteux et extrêmement compliqué sur le plan de l'organisation matérielle. De tels effectifs permettraient sans doute d'obtenir des coefficients de variation acceptables, égaux ou inférieurs à 10 % à l'intérieur de chaque traitement.

Cette variabilité, cependant, ne présente pas que des inconvénients ; c'est évidemment un mécanisme d'adaptation et de survie dans des conditions marginales de nutrition mais c'est aussi un puissant outil potentiel de sélection. L'étude de cette variabilité montre l'existence de sujets d'élite, capables de performances comparables à celles d'animaux hautement améliorés, au sein de populations aux performances moyennes ou médiocres. De fait, les animaux utilisés ici appartenaient à un troupeau de 2 000 têtes où, en 1982, un agneau a atteint le poids de 48 kg à 105 jours, soit un gain moyen journalier de 430 g. La tradition orale rapporte des gains moyens de 600 g.j^{-1} à trois mois dans les populations locales de barbarin du Sud tunisien et de Libye. Le chiffre de 430 g que nous avons observé nous rend cette tradition orale moins suspecte que nous ne l'aurions cru *a priori* (LE HOUÉROU *et al.*, 1983).

INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DES RELATIONS ENTRE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LE CHANGEMENT DE POIDS CHEZ LE MOUTON BARBARIN

Sur les données brutes et pour toute la durée de l'expérimentation (112 jours), l'équation générale est :

$Y = 11,6 + 0,29\ X$; ($r = 0,76$; $n = 66$; $p < 0,05$)

ou :

Y = changement de poids en kilogramme par période

X = Ingestion d'énergie en MJ EM.kg$^{-0,75}$.

Le changement quotidien, exprimé en g.t^{-1} est de :

Y = 103,3 = 0,29 X ; (r = 0,76 ; n = 66 ; p < 0,05)

ou :
X est exprimé en kJ EM.kg$^{-0,75}$.
Avec l'élimination de 5 animaux aux performances «aberrantes» pour diverses raisons (G1, H4, K1, K2, K4), on obtient, sur l'ensemble de la période expérimentale, l'équation :

Y = - 21 + 0,46 X ; (r = 0,76 ; n = 66 ; p < 0,005)

ou :
X est exprimé en MJ EM.kg$^{-0,75}$.
Sur une base journalière, l'équation devient :

Y = 23,6 + 0,46 X - 359,7 ; (r = 0,92 ; n = 66 ; p < 0,000001)

ou :
X est exprimé en kj EM.kg$^{-0,75}$.
La consommation d'énergie en fonction du changement de poids s'exprime par la relation :

Y = 371 + 2,76 X + 0,005 X ; (r = 0,97 ; n = 66)

avec les intervalles de confiance suivants, au seuil de 0,95 :
346,49 < a < 372,763
2,5354 < bl < 2,9869
0,00397 < b2 < 0,0061
F (0,95, 2, 50) = 19,5
F (0,9995, 2, 50) = 200.

Les différences de poids entre groupes sont significatives à hautement significatives (0,02 < p < 0,0001) entre les groupes A, B, C, D, d'une part, et entre l'ensemble de ces groupes et les autres groupes, d'autre part. Les différences entre E et F ne sont pas significatives au seuil de 0,95 (p < 0,25), bien que la consommation d'énergie ait différé de 15 % en faveur de F. Le niveau de signification entre les groupes G à K n'est acceptable que si on élimine les cas aberrants (G1, H4, K1, K2, K4), soit une élimination de 5 animaux sur 30, c'est-à-dire environ 17 %. Dans ce cas : 0,0001 < p < 0,02. Les relations entre la consommation d'énergie et le changement de poids sont indiquées sur les graphiques des figures 1, 2, 3, 4 et 5.

Consommation d'eau

La consommation moyenne d'eau a été de 3,5 kg.t^{-1}.j^{-1} de juin à novembre. Cette consommation a dépendu de l'interaction de 2 facteurs principaux : consommation journalière de matière sèche et température journalière moyenne maximale hebdomadaire. La relation polynomiale entre la consommation d'eau et celle de matière sèche (la teneur de la ration en matière sèche étant constante, environ 75 % dans la pailleurée et 93 % dans le grain) s'écrit par l'équation :

Y = 3,66/- 0,16 + 0,00037 X - 79 + 0,00005 X - 7220
(r = 0,92 ; p < 0,025)

ou :
Y = consommation d'eau en $kg.t^{-1}.j^{-1}$
X = consommation de MS $Kg.t^{-1}.j^{-1}$.

L'intervalle de confiance au seuil de 0,95 est :
$3,50 < a < 3,82$; $0,022 < b1 < 0,029$; $0,00013 < b2 < 0,00023$
L'équation linéaire est à la limite de signification au seuil de 95 % de probabilité :
$Y = 3,69 + 0,01\ X - 79$; ($r = 0,90$; $p > 0,05$)

Dans une autre expérimentation, réalisée au même endroit, la consommation d'eau sur dix mois (décembre-octobre) a été de 3,5 $kg.t^{-1}.j^{-1}$ pour les animaux soumis au pâturage ou à une ration exclusive d'arbustes non halophiles. Une ration composée exclusivement d'halophytes (*Atriplex* spp.) doublait la consommation d'eau, qui atteignait 7 $kg.t^{-1}.j^{-1}$, avec un maximum de 12 $kg.t^{-1}.j^{-1}$ sous des températures maximales journalières de 36 à 40 °C (Le Houérou *et al.*, 1983).

CONCLUSIONS

Il semble bien que les taux de conversion entre la perte et le gain de poids, d'une part, et le déficit ou l'excès d'énergie par rapport aux besoins d'entretien, d'autre part, soient identiques dans une assez large fourchette de perte et de gain (- 25 % à + 25 % du poids initial) chez la brebis barbarine adulte non reproductrice. Le chiffre moyen est de 4,3 UFL d'excès ou de déficit par rapport aux besoins d'entretien pour chaque kilogramme de changement de poids (7 612 kcal EN = 31,7 MJ EN = 12 760 kcal EM = 53 MJ EM), à l'intérieur de la fourchette de changement de poids définie ci-dessus.

Ce chiffre permet de calculer avec une approximation suffisante la production fourragère consommable dans un essai de charge, pour autant que l'équilibre protéique de la ration soit maintenu. C'est une application intéressante pour le pastoraliste.

Les populations «tout-venant» de moutons barbarins non sélectionnés, en élevage traditionnel, montrent une variabilité très élevée des taux de conversion d'un animal à l'autre à l'intérieur d'un troupeau donné. Les performances moyennes modérées de la race cachent l'existence d'une majorité d'animaux médiocres à très médiocres, d'une part, et d'une minorité d'animaux, d'autre part, dont les performances très élevées soutiennent la comparaison avec les meilleures races précoces.

La variabilité des taux de conversion paraît beaucoup plus accusée dans le gain de poids que dans la perte.

Le mouton barbarin se caractérise par une tolérance exceptionnelle à la restriction alimentaire et par son aptitude à regagner très rapidement son poids initial lorsque la pénurie s'achève, puisqu'il peut perdre plus de 40 % de son poids normal initial en deux mois de jeûne et le reprendre sur une période comparable avec des aliments relativement pauvres.

La croissance compensatoire subséquente à une période de restriction alimentaire est très rapide ; les gains journaliers peuvent alors atteindre le double des pertes journalières subies au cours des périodes de pénurie. Le taux de conversion de brebis adultes jeunes, non gestantes, en période compensatoire est comparable à celui des agneaux de la même race à l'embouche (6 à 8 $UFL.kg^{-1}$ de gain de poids vif).

La valeur énergétique de la paille complémentée de 1 % d'urée, dans une ration composée environ pour moitié de paille et de grain d'orge (en pourcentage de matière sèche de la ration) est de 0,52 - 0,54 $UFL.kg^{-1}$ MS.

La consommation de paille peut atteindre 23 $g.kg^{-0,75}$ (400 $g.t^{-1}.j^{-1}$) lorsqu'elle est complémentée par 400 à 450 g de grain d'orge. Lorsque la ration d'orge dépasse 500 $g.t^{-1}.j^{-1}$, la consommation de paille diminue jusqu'à un minimum absolu de 250 g pour un complément de 1 000 g de grain. Cette consommation est identique à celle de la paille pure servie sans complément énergétique ni complément azoté.

Des rations composées de 50 % de paille-urée et de 50 % de grain d'orge permettent d'obtenir de bonnes performances sur des animaux adultes, avec des gains de 75 $g.t^{-1}.j^{-1}$ sur des animaux déjà en excellent état d'embonpoint, et jusqu'à 150 à 390 $g.t^{-1}.j^{-1}$ en phase de croissance compensatoire, avec des taux de conversion de 6 à 8 $UFL.kg^{-1}$ de gain dans ce dernier cas.

Une conséquence potentiellement importante sur le plan économique semble se dégager de ces considérations : il ne paraît pas nécessaire ni désirable de maintenir un poids constant des animaux tout au long de l'année, s'agissant des brebis barbarines. En effet, des pertes de poids de 15 à 25 % sont absorbées sans problème et sans réduction des performances reproductrices des animaux en raison de la flexibilité de la race en matière de variation pondérale. D'autres essais (DUMANCIC et LE HOUÉROU, 1981 ; LE HOUÉROU *et al.*, 1983) montrent par ailleurs que les performances reproductrices ne semblent pas affectées par des pertes de poids temporaires de 25 % par rapport à l'embonpoint normal au cours du cycle annuel. Dans le cas évoqué, un lot de 84 brebis, après une perte de poids de 25 % pendant plusieurs mois, a produit 106 % d'agneaux avec une alimentation uniquement basée sur le parcours, ce qui constitue un taux de prolificité remarquable pour de telles conditions, s'agissant de la barbarine.

H.-N. LE HOUÉROU : *écologue*, Cefe/CNRS, BP 5051, 34033 Montpellier cedex 01

BIBLIOGRAPHIE

ALIBES (X.) et TISSERAND (J.-L), 1990. - Tableaux de la valeur alimentaire pour les ruminants des fourrages et sous-produits d'origine méditerranéenne. 137 p., *Options Médit.*, sér. B, n° 4, Ciheam, Paris.

AL KHAZRAJI (A. K.), AL KHOJA (M. N.), AL KASSHAB (A. H.) et MOMEN (S.), 1981. - The effect of straw/concentrate ratios on the performance of growing barbary lambs. 16 p. *Mimeo*, Agric. Res. Cent., Proj. Lib. 06, FAO, Tripoli, Libya.

AL KHAZRAJI (A. K.), AL KHOJA (M. N.) et GHARIANI (S. B.), 1982. - Ensiling straw treated vith urea or urea and Sodium hydroxide. 16 p. FAO, Lib/06, Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.

BENEDICT (F. G.) et RITZMAN (S.), 1927. - The metabolism of fasting steers. *Carnegie Insti. Public.*, 337.

BLAXTER (K. L.), 1962. - The fasting metabolism of adult wether sheep. *Brit. J. Nat.*, 16 : 615.

DEMARQUILLY (J.) *et al.*, éd., 1981. - Tableaux de la valeur alimentaire pour les ruminants des fourrages et sous-produits d'origine Méditerranéenne. 84 p. *Options Médit.* Intern. Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies, Zaragoza.

DUMANCIC (D.) et LE HOUÉROU (H.-N.), 1981. - *Acacia cyanophylla* as supplementrary feed for small stock in Libya. *J. of Arid Envir.*, 4 : 161-167.

ECONOMIDES (S.), HADJIPANAYIOTOU (M.) et GEORGHIADES (E.), 1981. - The nutritive value of straw and barley and lucerne hay, and the effect of nitrogen supplementation on the nutritive value of straw to sheep. 8 p. *Techn. bull.* 39, Agric. Res. Inst. Nicosia, Cyprus.

JARRIGE (R.), éd., 1978. - Alimentation des ruminants. 597 p., Inst. nat. rech. agro., Versailles.

KARAM (H. A.), HORSZCZARUK (F.), EL TOHAMI (M. N.) et MOMEN (S.), 1977. - Lamb fattening in the Jamahiriya. 23 p., FAO/Lib/06, Agric. Res. Centre, Tripoli.

KEARL (L. C.), HARRIS (L. E.), LLOYD (H.), FARID (M.) et WARDELI (M.), 1979. - Arab and Middle-east tables of feed compositon. 554 p. Internat. Feedstuffs Institute, Utah, Agric. Exp. Stn., Logan, USA.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1982. - Experiments on the relations between energy consumption and body weight change in dry, fat-tail barbary ewes. 13 p. *Mimeo. Techn. Doc.* N° 41, Lib/018, FAO & Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.

LE HOUÉROU (H.-N.), DUMANCIC (D.), ESKILEH (M.), SCHWEIGUTH (D.) et TELAHIQUE (T.), 1982. - Anatomy and physiology of a browsing trial : a methodological approach to fodder shrubs evaluation. 65 p., 16 figs. *Techn. Doc.* n°28, Lib/018, FAO and Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.

LE HOUÉROU (H.-N.), DUMANCIC (D.) ABUZID (A.), EL MABRUK (A.), ESKILEH (M.) et TARHUNI (M.), 1983. - Feeding shrubs to sheep in Libya : intake, feed value and performance. 60 p. 7 figs., *Techn. Doc.* n° 50, Lib/018, FAO and Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.

LE HOUÉROU (H.-N.), DUMANCIC (D.) et ESKILEH (M.), 1983. - Energy intake and live weight change in dry, fait-tail barbary ewes. 71 p., 11 figs., *Techn. Doc.* n°48, lib/018, FAO and Agric. Res. Centre, Tripoli, Libya.

MEYER (J. H.) et CLAWSON (W.J.), 1964. - Under nutrition and subsequent realimentation in rats and sheep. *J. An. Sces.*, 23 : 214-224.

MEYER (J. H.), LUEKER (C.E.) et SMITH (J. D.), 1956. - Influence of food and energy restriction and subsequent recovery on body composition and food utilization of rats. *J. Nutr.*, 60 : 121.

MEYER (J. H.), WEIR (W. C.) et TORELL (D. T.), 1982. - Response of immature sheep to partial starvation. *J. An. Sces.*, 21 : 916.

WILSON (P. N.) et OSBOURN (D. F.), 1960. - Compensatory growth after undernutrition in mammals and birds. *Biol. Rev.*, 35 : 324.

Amor M'TIMET

Les lœss sahariens et l'amélioration de leurs propriétés géotechniques

Cas des Matmata et de leurs bordures, Tunisie

INTRODUCTION

Dans le Sud tunisien comme dans l'ensemble des zones arides du monde, les faibles précipitations constituent une grave contrainte pour la mise en valeur et la gestion de l'espace rural, dont les ressources naturelles, par ailleurs, sont plus souvent limitées.

Dans ce contexte climatique, le massif des Matmata, d'une superficie estimée à 202 500 ha, se développe sur 3 régions naturelles (LE HOUÉROU, 1959) (fig. 1) :

- les Dahars septentrionaux ;
- le massif des Matmata proprement dit ;
- les glacis de raccordement avec la plaine de la Jeffara.

Dans ce cadre, s'est accumulé et conservé, sur des épaisseurs souvent remarquables, du matériau sablo-limoneux calcaire, dit lœss des Matmata ou limon à nodules calcaires. Dans les vallées et les vallons, quasiment secs, les habitants de ces zones ont édifié, à partir de ce matériau lœssique, de petits barrages (tabias) ; ceux-ci collectent les eaux de ruissellement, plus ou moins chargées, dont ils permettent l'infiltration ; ils favorisent l'accumulation des produits de l'érosion sur des surfaces le plus souvent vouées à l'arboriculture ou à la céréaliculture (jessours). La distribution des sols dans ces microbassins est rapportée à la figure 2. Dans ce lœss quaternaire très étendu (COUDÉ-GAUSSEN *et al.*, 1983 ; M'TIMET, 1983), l'érosion hydrique se manifeste sous diverses formes (ravinement) ; lors des années exceptionnelles (1933, 1969, 1979), elle conduit à la destruction de ces petits ouvrages d'hydraulique agricole de surface, bien décrits par BONVALLOT (1980) ; de grandes masses d'eau, devastatrices, sont ainsi libérées (BONVALLOT, 1980 ; M'TIMET, 1979).

La lutte pour la protection de ces ouvrages revêt plusieurs aspects ; en vue d'améliorer éventuellement la résistance de ces ouvrages à l'érosion hydrique, elle peut conduire, par exemple, à envisager l'addition au matériau lœssique de margine (eau et résidus organiques collectés après décantation du produit obtenu lors du premier broyage des olives pour l'extraction de l'huile). L'évaluation des améliorations apportées par une telle addition nécessite que soient d'abord connues les caractéristiques physiques, mécaniques et géotechniques du lœss et qu'elles soient, si possible, comparées aux caractéristiques mesurées du nouveau produit (lœss additionné de margine).

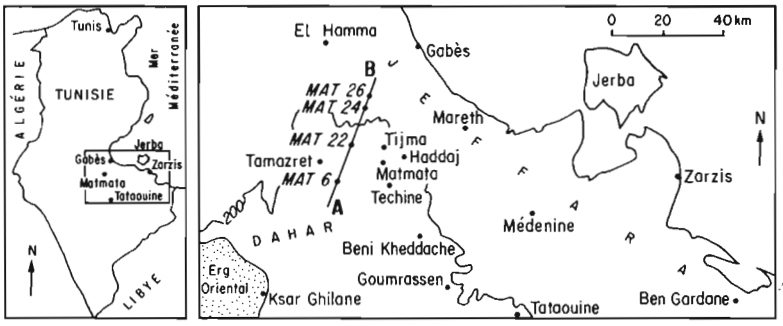


FIGURE 1 - *Situation.*

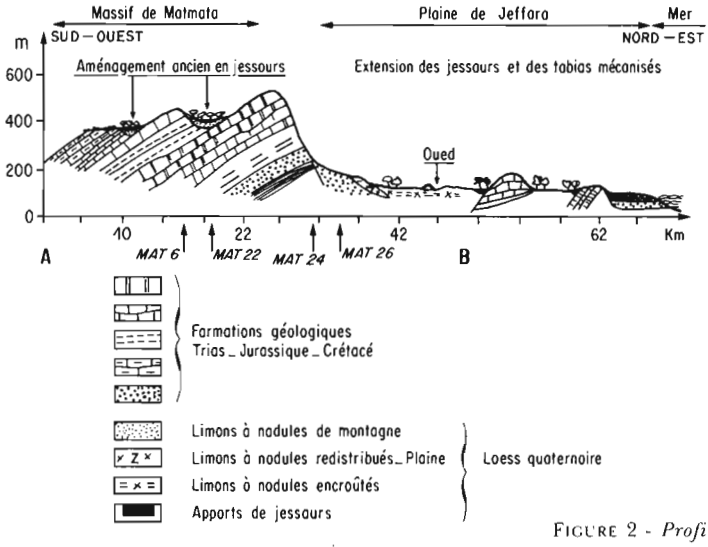


FIGURE 2 - *Profil géologique et zone de contact Matmata-Jeffara.*

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour des matériaux lœssiques dont les caractéristiques granulométriques sont rapportées au tableau I, les paramètres suivants ont été mesurés :

- la vitesse d'infiltration déterminée *in situ* par la méthode Müntz à la surface du sol et par la méthode de Porchet pour la tranche de sol ;
- les limites d'Atterberg pour l'appréciation de la consistance du sol ;
- le comportement du sol au compactage «essai Proctor» ;
- la résistance au cisaillement mesurée à la boîte de Casagrande ;
- la stabilité structurale par les tests Hénin réalisés en laboratoire ;
- la propension au ruissellement et à l'érosion, étudiée sur des placettes de 1 m² à l'aide d'un minisimulateur de pluies.

Tableau I - Granulométrie des sols avec décarbonatation

Horizon (cm)	Argile	Limons totaux	Sables fins	Carbonate de calcium
ZONE JEBEL				
MAT 6 (Secteur A)				
0 - 20	16	22	46	21
35 - 55	12	17	65	4
65 - 85	11	19	51	15
85 - 120	8	23	58	15
MAT 22 (Secteur B)				
5 - 30	10	19	66	7
50 - 70	8	20	60	5
90 - 100	17	11	53	23
130 - 150	12	11	67	12
200 -230	10	13	51	24
300 -330	6	20	58	14
ZONE PLAINE				
MAT 24 (Secteur A)				
5 - 40	02	21	67	10
80 - 100	11	25	37	25
150 -170	12	20	66	2
250 - 270	04	24	48	24
MAT 26 (Secteur B)				
5 - 10	08	12	55	23
20 - 40	08	7	40	48
80 - 100	10	8	35	48
120 - 150	29	9	35	28

Une expérimentation a également été menée sur les modifications entraînées par l'addition de margine au niveau des propriétés mécaniques et géotechniques du lœss de la région de Matmata-Nouvelle (plaine).

RÉSULTATS

Propriétés physiques, mécaniques et géotechniques du lœss

LA PERMÉABILITÉ

Les valeurs mesurées pour le lœss des Matmata sont les suivantes :
- de 3,06 à 5,76 $cm.h^{-1}$ en surface (méthode Müntz) ;

- de 11,3 à 17,6 cm.h-1 en profondeur jusqu'à 1,20 m (méthode Porchet).

Le lœss apparaît donc comme un matériau assez perméable ; les valeurs fortes obtenues s'expliquent également, en partie, par la présence de nombreuses fentes latérales bien développées dans certains sols.

Les limites d'Atterberg

Les limites mesurées varient comme suit pour ce lœss :
- limite de liquidité (Ll) de 19 à 27,5 % ;
- limite de plasticité (Lp) de 15 à 21 %.

Les valeurs de l'indice de plasticité (Ip), calculé comme la différence Ll - Lp, sont comprises entre 2,5 et 7,0, dans cette situation et selon les échantillons. Ces valeurs peuvent être comparées à celles obtenues (tabl. II), en France par exemple, pour des sols de textures différentes (BLPC, 1973 ; Demdami, 1981) :
- lœss et alluvions argileuses du Sündgau ;
- formations sablo-limoneuse et limono-argileuse de la région de Narbonne.

La concordance est bonne entre les valeurs obtenues pour les lœss des Matmata et du Sündgau ainsi que pour les sols sablo-limoneux de la région de Narbonne. Les 2 autres formations présentent, quant à elles, des valeurs nettement plus élevées.

Resituées sur un diagramme de plasticité, ces valeurs indiquent bien que, aux Matmata, nous sommes en présence d'un matériau lœssique de type «silt» ou limon peu plastique. La faible capacité de rétention à l'eau, au pF 4,2, mesurée au laboratoire, est en corrélation avec la pauvreté du lœss en argile et en matière organique. De telles caractéristiques pourraient signifier que ce lœss ne présente que peu de risque de faillage ou de glissement quoique la faible pente de la courbe de liquidité atteste d'un passage brutal à l'état liquide.

Tableau II - Comportement des sols à texture variable (Demdami, 1981 ; BLPC, (Paris 1981)

Type de sol	L 1 (%)	L p (%)	I p
1. Vieux lœss ; Sündgau (France)	28,3	19,3	9
2. Sol sablo-limoneux ; Narbonne (France)	27	20	7
3. Sol limono-argileux ; Narbonne (France)	41	21	20
4. Alluvions argileuses ; Sündgau (France	45,9	21,26	24,6
Valeurs maximales pour le lœss des Matmata (Tunisie)	27,5	21	7

L 1 = limite de liquidité
L p = limite de plasticité
I p = indice de plasticité = L 1 - L p

Le comportement au compactage

Ce test fait ressortir l'effet mécanique relatif d'un poids sur le matériau associé à de l'eau. Dans notre situation, un tel test permet, en particulier, d'évaluer les contraintes du lœss lors de l'édification des petits barrages d'hydraulique agricole déjà évoqués. C'est, en particulier, la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus pour le matériau «amélioré» (*cf. infra*) qui permettra d'évaluer l'intérêt de ce dernier. Les divers

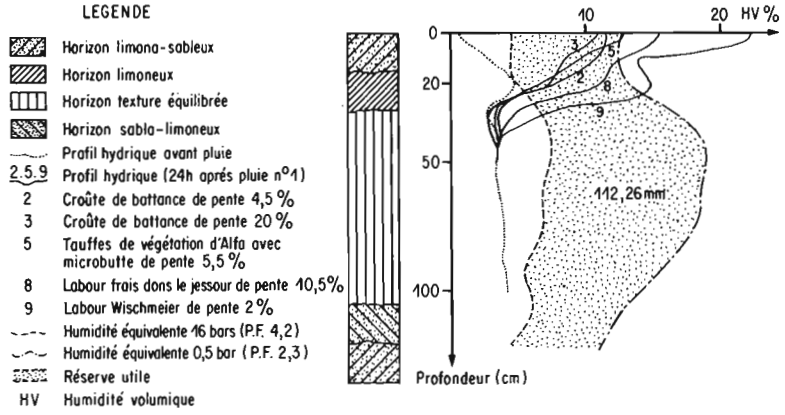


FIGURE 3 - *Profils hydriques comparés des états de surface de sol (résultats obtenus au minisimulateur de pluies).*

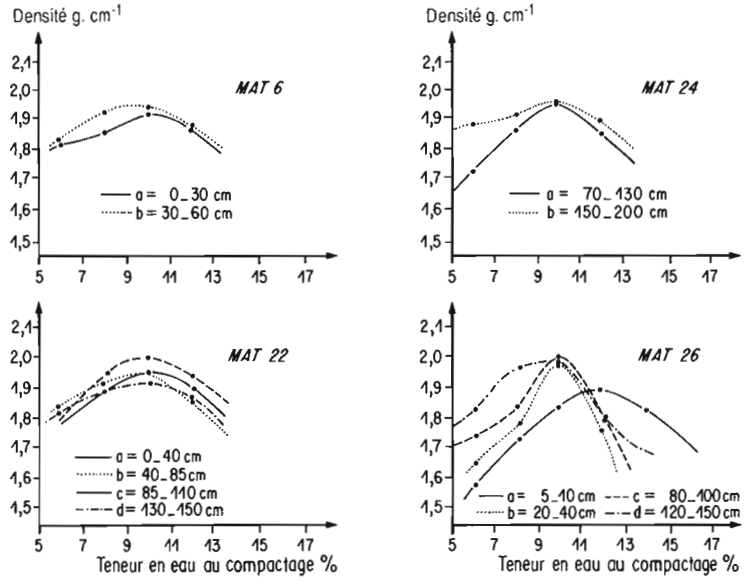


FIGURE 4 - *Courbe de Proctor de différents sols sur lœss (profils MAT 6, 22, 24, 26).*

états de surface, plus ou moins compactés, des impluviums ont des répercussions sur l'importance du ruissellement et sur celle de l'érosion en nappe ainsi que le laissent entrevoir les profils hydriques (fig. 3) réalisés lors d'essais au simulateur de pluies sur un microbassin (M'TIMET, 1987).

La densité sèche, à l'optimum Proctor, est variable d'un profil à un autre mais également d'un horizon à un autre d'un même profil. Pour les divers profils et les divers horizons étudiés cette valeur exprimée en $g.cm^{-3}$ varie de 1,9 à 2,00 (fig. 4). La qualité et la quantité d'argile et la teneur en calcaire contribuent à élever ou à abaisser les valeurs de cette densité et la relation entre ces différents facteurs est très forte. En effet, de telles variations ont été mesurées à partir de profils de sol (MAT 6, 22, 24 et 26) assez pauvres en matière organique et par conséquent riches en calcaire (la valeur du calcaire fin, de l'ordre de 16 %, peut atteindre 22 %). Les valeurs les plus faibles de cette densité sèche ont été mesurées dans la partie amont des Matmata, où ces sols sont relativement riches en sables fins et en calcaire.

La résistance au cisaillement

Son calcul permet une meilleure connaissance de la stabilité des versants et de la propension du matériau étudié à l'érosion hydrique linéaire. Selon la loi de Coulomb, la résistance au cisaillement (δ exprimée en kg $f.m^{-2}$ répond à la formule) :

$$\delta = C + o \operatorname{tg} \phi$$

où :
C = la cohésion en kg $f.m^{-2}$
o = la pression normale en kg $f.m^{-2}$
ϕ = l'angle de frottement interne.

Des essais réalisés, à la boîte de cisaillement, sur les lœss des Matmata ont donné des valeurs de ϕ comprises entre 29° et 36° (tabl. III). De fait, pour qu'un versant composé d'un matériau qui possède les caractéristiques de ϕ du lœss des Matmata soit stable, il faut que son angle de versant (i) demeure inférieur à 29°. Les versants limoneux du secteur montagneux des Matmata, avec des pentes de l'ordre de 26° (qui atteignent parfois 30° et même 32°), ont un angle (i) compris entre 15° et 18°(tabl. III).

Tableau III - Résultats des essais de cisaillement sur 3 matériaux lœssiques (profils de sols MAT 6, 8 et 24)

	Profil sur lœss	Profondeur (cm)	Teneur eau (%)	Densité sèche ($g.cm^{-3}$)	Cohésion	Angle (°)
Plaine						
		80 - 100	11	1,90	0	35
	x MAT 24	150 - 170*	12	1,91	0	31
Jebel						
	x MAT 6	0 - 20	11	1,93	0	32
		35 - 55*	12	1,90	0	36
	x MAT 8	170 - 190*	11	1,95	0	33
		300 - 320	12	1,98	0	29

* Niveau rouge.

Compte tenu de cet ensemble de données, il ne peut y avoir, dans la situation des Matmata, de manifestation de l'instabilité des versants par glissement, ce qui confirme l'une de nos interprétations (*cf. supra*). De fait, dans la nature, on n'observe que le développement de griffes d'érosion et de ravines profondes.

La stabilité structurale

Selon leur stabilité, les matériaux réagissent différemment lorsqu'ils sont placés en contact avec de l'eau ; les aggrégats, qui peuvent former l'essentiel d'un matériau donné, se détruisent sous l'effet de certains processus tels que le gonflement, la dispersion ou l'explosion, lors de la pénétration de l'eau (Baver, 1956 ; Hénin *et al.*, 1958). Les résultats du traitement à l'alcool, à l'eau ou au benzène (méthode Hénin) indiquent les pourcentages d'aggrégats de taille moyenne qui sont stables (tabl. IV). Outre que les aggrégats sont plus détruits au benzène ou à l'eau qu'à l'alcool, il apparaît à la lecture de ce tableau que les pourcentages d'aggrégats stables sont jusqu'à 5 fois plus élevés en plaine que dans le secteur montagneux (zone Jbel). Comme dans la méthode Hénin les sables grossiers sont soustraits, ceci paraît dû surtout à la richesse relative du matériau de plaine en carbonates et en matière organique, ce qui entraîne une meilleure cohésion des aggrégats à l'état humide (cf. fiches d'analyse MAT 6 et 26 en annexes). De ces données, il est possible de déduire un indice de stabilité structurale (Is) de ces aggrégats. Pour le secteur Jbel (en amont) les valeurs de log. 10 Is sont supérieures à 1 ce qui traduit une mauvaise stabilité structurale. En plaine (aval), les valeurs de log10 Is restent égales ou inférieures à 0,8 et ces faibles valeurs sont révélatrices d'une bonne stabilité structurale. Dans le secteur Jbel, où la stabilité structurale est faible à moyenne, la pellicule de battance omniprésente en surface accroît le ruissellement et réduit donc les risques.

Tableau IV - Pourcentages d'aggrégats, de taille moyenne, restés stables après traitement à l'alcool, à l'eau ou au benzène (M'timet, 1983)

Matériau	Zone Jbel (amont)		Zone plaine (aval)	
traitement	MAT 28 (25-80 cm) rouge	MAT 28 (130-200 cm) beige	MAT 26 (20-40 cm)	MAT 83 (20-40 cm)
Alcool	2,50 %	2,5 %	14,5 %	1,6 %
Eau	1,25 %	2,1 %	8,2 %	4,8 %
Benzène	1,00 %	2,0 %	4,5 %	2,6 %

L'érodibilité

Conscient de l'importance des organisations pelliculaires superficielles et des états de surfaces (Hillel, 1960, 1964 ; Valentin, 1981 ; Escadafal *et al.*, 1986) sur les régimes hydriques du sol et sur l'érodibilité, nous avons effectué des mesures à l'aide d'un simulateur de pluies (Asseline et Valentin, 1978) sur un microbassin du secteur Haddaj-Tijma (fig. 1) représentatif des glacis lœssiques du Pléistocène supérieur de la région.

Le protocole prend en compte :

- les pluies de référence (P1, P2,, P3) dont l'intensité (I en $mm.h^{-1}$) et la hauteur (H en mm) sont déterminées suite à l'interprétation des données climatiques disponibles dans la région (stations de Matmata et de Gabès) ;
- les types de sols et d'utilisation du sol retenus, considérés comme les plus représentatifs dans la région (M'TIMET, 1987) où les secteurs montagneux (à forte pente) sont dominés par une végétation steppique souvent dégradée et où les plaines sont généralement cultivées (céréaliculture) ou plantées (arboriculture).

Les valeurs de l'ensemble de ces variables prises en considération sont rapportées au tableau V, de même que les résultats relatifs à :

- la hauteur de pluie infiltrée (W en mm) ;
- le coefficient de ruissellement «efficace» (Kre %) calculé selon la formule :

$$Kre : \frac{Ir}{Pe}$$

où :

Ir = lame ruisselée (mm)

Pe = pluie efficace (mm) ;

- le coefficient de ruissellement (Kru %) ;
- l'érodibilité (en $kg.ha^{-1}$).

Il ressort assez nettement de cet ensemble de données que :

- la pluie efficace (proportion des hauteurs de pluies précipitées qui se sont réellement infiltrées), qui n'atteint que 20 % sur la croûte de battance (avec forte pente), atteint jusqu'à 80 % dans le labour ;
- les fortes averses n'engendrent pas, *a priori*, les fortes infiltrations et les pluies d'intensités inférieures à 80 $mm.h^{-1}$ sont les plus bénéfiques ;
- le coefficient de ruissellement (Kru %) atteint 79,7 % sur la croûte de battance (à forte pente) ; la valeur la plus faible est celle obtenue sur le labour traditionnel en plaine. Dans ce dernier cas, le ruissellement est même inférieur à celui mesuré sur le labour «Wischmeier». Le ruissellement maximal dépend également des états de surface, de la pente, de la technique culturale ainsi que d'un certain nombre d'autres facteurs non étudiés ici : état hydrique initial, direction des labours, type et recouvrement de la végétation naturelle en place, etc. (FLORET *et al.*, 1989) ;
- il n'y a pas de relation simple et étroite entre l'importance du ruissellement et la quantité de sol érodé ; celle-ci peut être accrue ou diminuée en fonction d'autres variables : état du surface, pente, etc. L'érosion, qui varie ici de 0,188 à 17,9 $t.ha^{-1}$, dépend donc essentiellement de l'organisation superficielle, de la couverture végétale et de l'état hydrique initial. Ainsi, si nous considérons 2 états, un labour traditionnel et une croûte de battance (à 20 % de pente), ils présentent respectivement des Kru de 18,9 % et de 79,7 % et une érosion de 479 $kg.ha^{-1}$ et de 522 $kg.ha^{-1}$. Exprimés en kilogrammes de produits érodés par millimètres d'eau ruisselée, nous obtenons respectivement 28 kg $ha^{-1}.mm^{-1}$ et 8 kg $ha^{-1}.mm^{-1}$ de pluie ruisselée, soit une variabilité de 1 à 3,5. Tous ces processus d'érosion sont confirmés à l'échelle des ouvrages de petite hydraulique agricole par l'importance de l'alluvionnement, surtout en années pluvieuses, à l'aval du barrage.

Tableau V - Résultats globaux des simulations de pluie à Haddaj-Matmata

			INTENSITÉ (mm.h⁻¹)					HAUTEUR (mm)				
État des surfaces	(%)	Pente pluie	Réf. I1	I2	I3	I4	I5	Précip. (H)	Infilt. (W)	Kre %	Kru %	Érodibilité kg.ha⁻¹
Surfaces très		P1	21,0	30,2	84,1	-	-	33,8	10,6	73,4	68,7	1 086
caillouteuses	20	P2	30,4	60,0	-	-	-	25,1	5,4	81,7	78,5	338
avec gravillons		P3	120,0	-	-	-	-	30,0	9,1	72,8	69,7	65
		Total	-	-	-	-	-	88,9	25,1	75,9	72,3	1 489
Croûte		P1	20,0	31,6	79,2	0,1	79,2	35,6	18,6	52,63	47,7	412
de battance		P2	29,8	1,0	29,8	60,4	-	25,7	6,3	76,9	75,5	371
	4,5	P3	118,5	-	-	-	-	29,6	4,6	86,2	84,4	949
	Total	-	-	-	-	-	90,9	29,5	71,9	69,2	1 732	
		P1	21,0	31,3	83,0	-	-	33,9	9,4	79,2	72,3	224
	20	P2	30,0	61,6	-	-	-	25,4	6,4	79,1	74,7	83
		P3	125,4	-	-	-	-	31,4	2,5	95,3	92,1	275
		Total	-	-	-	-	-	90,7	18,3	84,5	79,7	582
		P1	20,0	38,4	78,2	-	32,2	32,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Labour frais	10,5	P2	31,0	60,0	-	-	26,3	24,5	12,8	12,8	6,9	0,0
dans le jessour		P3	122,4	-	-	-	30,6	15,4	52,7	52,7	49,8	479
		Total	-	-	-	-	89,1	72,1	21,8	21,8	18,9	479
		P1	19,6	30,0	81,2	61,6	-	48,2	38,4	43,3	20,3	201
Labour 2		P2	81,2	61,6	30,0	48,2	-	19,4	10,9	47,4	43,5	0,0
Wischmeïer		P3	29,8	64,2	-	-	-	27,1	24,0	28,5	11,2	0,0
		P4	119,2 -	-	-	-	-	29,8	3,6	92,5	87,9	402
		Total	-	-	-	-	-	124,5	76,9	52,9	40,7	603
Touffes de végétaux		P1	20,1	29,6	84,0	-	-	33,1	18,5	47,4	44,1	188
d'alfa	5,5	Total	-	-	-	-	-	33,1	18,5	47,4	44,1	188
avec microbuttes(T1)												
Croûte de battance		P1	20,1	29,6	84,0	-	-	33,4	15,6	56,7	53,4	279
+	11	P2	-	-	-	-	-	-				
T. végétale		P3	-	-	-	-	-	-				
peu dense		Total	-	-	-	-	-	33,4	15,6	56,7	53,4	279
		P1	20,2	30,1	80,4	-	-	32,7	11,9	70,2	63,6	345
Sol battu nu 9		P2	42,2	29,7	59,2	-	-	27,5	8,7	73,0	68,2	327
		P3	129,0-	-	-	-	-	32,3	3,2	92,9	90,1	395
		Total	-	-	-	-	-	92,5	23,8	78,7	73,7	1367
Croûte de battance		P1	20,4	30,5	81,2	-	-	32,6	22,7	30,8	30,5	182
+		P2	31,4	59,2	-	-	-	25,3	9,5	66,3	62,4	97
T. végétale		P3	122,4 -	-	-	-	-	30,6	5,1	89,7	83,2	549
peu dense (T3)		Total	-	-	-	-	-	88,5	37,3	62,2	58,7	828

Effet de l'addition de margine sur les propriétés géotechniques du lœss

Les récentes expériences (SELMENE et BOUAZIZ, 1982 ; FRIAA, 1983) réalisées sur la margine, à l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (Énit) ont démontré que ce sous-produit de l'oléiculture, peut être valorisé par son utilisation en vue d'améliorer les propriétés géotechniques du lœss utilisé pour la création des routes et des pistes rurales. À partir de là, l'idée de l'appliquer également à la consolidation des levées de terre des ouvrages de petite hydraulique nous a paru intéressante pour tenter de réduire les risques de destruction (*cf. supra*).

L'addition de margine (dans la proportion de 13 à 14 %) a entraîné, en particulier au niveau du comportement au compactage et de la résistance au cisaillement, quelques améliorations, que nous allons examiner.

LE COMPORTEMENT AU COMPACTAGE

Les résultats rapportés au tableau VI (à comparer avec ceux du tableau III, obtenus pour les matériaux originels) attestent d'une amélioration de la cohésion qui est passée de 0 à 5,4 %.

Tableau VI - Caractéristiques géotechniques du lœss additionné de la margine (effectués à l'Énit)

PROFIL SUR LOESS	PROFONDEUR TENEUR EN MARGINE (%)	OPTIMUM PROCTOR SÈCHE g.cm^{-3}	DENSITÉ	COHÉSION	ANGLE (°)
Plaine (aval)					
MAT 26	0 - 20	12,5	1,77	4,5	62
	20 - 40	12,5	1,85	4,5	60
Jebel (amont)					
MAT 28	50 - 70	13	1,86	2,8	56
	70 - 90	12,5	1,87	3,8	60
MAT 82	10 - 30	13,1	1,85	3,5	62
	30 - 50	14	1,87	5,0	64
Sol sableux sans margine (environs de Tunis)					30 - 40°
Formation argileuse sans margine (environs de Tunis)					70 - 80°

LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

Les valeurs de l'angle ϕ (tabl. VI et fig. 6) sont à comparer à celles obtenues sur les matériaux originels (tabl. III). Il est aisé de s'apercevoir que, par addition de margine, ϕ est ainsi passé de valeurs comprises entre 29° et 35° à des valeurs comprises entre 56° et 66°.

Il ressort de ces améliorations que la margine peut être utilisée avec profit dans la réalisation d'ouvrages en terre compactée et son addition au lœss permet sans nul doute de gagner à la fois sur l'emprise des ouvrages, sur le volume de terre nécessaire à leur confection et sur leur résistance au ravinement.

CONCLUSIONS

Depuis 1980, un projet de lutte contre l'érosion sur les lœss des Matmata a été mis en œuvre ; il concerne également ces microbarrages, en terre compactée et consolidés par des pierres, qui barrent les petites vallées et qui permettent, par l'accumulation des eaux et des terres, le développement de la céréaliculture et de l'arboriculture.

Diverses propositions ont été faites :

- protection des pentes fortes, à matériau lœssique épais, contre l'érosion par la mise en défens (si la végétation naturelle existe) ou le reboisement ;
- construction de terrasses ;
- intensification des plantations fruitières derrière les ouvrages ;
- construction ou creusement de citernes de captage des eaux de ruissellement qui, en outre, pourront être utilisées pour l'arrosage des plantations.

À ce faisceau d'actions, nous ajoutons désormais celle, en cours, qui consiste en l'addition de margine aux terres de remblais utilisées pour la construction des microbarrages. Nous espérons que la connaissance, à approfondir, de l'intérêt de la margine contribuera à résoudre les graves problèmes du ruissellement et de l'érosion qui, en zone aride tunisienne, accentuent dangereusement le déficit en eau et accroissent d'autant la difficulté pour les êtres vivants de s'adapter à la sécheresse.

A. M'Timet : *pédologue*, ministère de l'Agriculture, Direction des sols, Tunisie

Bibliographie

ASSELINE (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-349.

BAVER (L. D.), 1956. - Soil physics. J. Wiley and Sons, New York, Chapman and Hall, London 3e ed. XVIII, 489 p.

BOIFFIN (J.), 1984. - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse doct. ing. Paris Ina, 320 p.

BONVALLOT (J.), 1980. - Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médenine. Tunisie du Sud ES 161 - Division des sols, Tunis.

BLPC (Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées), 1973. - Remblais sur les sols compressibles. Paris, n° spécial.

COUDÉ-GAUSSEN (G.), OLIVE (P.) et ROGNON (P.), 1983. - Datation des dépôts lœssiques et variations climatiques à la bordure Nord du Sahara algéro-tunisien. *Rev. géol. dynam. et géol. phy.*, vol. 24n, fasc. 1 : 61-73, Paris.

DEMDAMI (L.), 1981. - Étude géotechnique des sols du Sündgau. Thèse de 3e cycle, univ. Paris-VI, 162 p.

DEPLOEY (J.), 1983. - Runoff and rill generation on sandy and loamy top soil. *Z. Geomorph.*, NP 46 : 15-23.

DUCHAUFOUR (P.), 1970. - Précis de pédologie. Masson, Paris, 481 p.

EL AMANI (S.), HADRI (H.), CHABBI (A.), M'TIMET (A.) et MAMOU (A.), 1984. - Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie, 67 p. CRGR, Tunis.

ESCADAFAL (R.), M'TIMET (A.) et ASSELINE (J.), 1986. - Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar Sud Tunisien). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Direction des sols Tunis., 57 p., ES 231.

Flanders research centre for soil erosion and soil conservation, 1985. - Assessment of soil surface sealing and crusting. Proceeding of the symposium held ineghen, Belgium, Ed. F. Callebaut, 374 p.

FLORET (C.), M'TIMET (A.) et PONTANIER (R.), 1989. - Caractérisaton écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols en zone aride. ORSTOM, Tunis, Cepe/CNRS, Montpellier, *multigr.* 44 p.

FRIAA (A.), 1983. - Matériaux locaux en Tunisie : quelques perspectives d'utilisation en génie civil. *In* Appopriate Building Materials for low Coast Housing Slon : 190-199.

HÉNIN (S.), 1976. - Cours de physique du sol. 2 vol. initi. *Doc. techn.* n°s 28 et 29, ORSTOM, Paris, 159 p.

HÉNIN (S.), MONNIER (G.) et COMBEAU (A.), 1958. - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agro.*, 1 : 73-92.

HILLEL (D.), 1960. - Crust formation in Lœssial soil. 7th int. cong. soil sci. Madison : 1-33 : 330-337.

HILLEL (D.), 1964. - Infiltration and rainfall runoff as affected by surface crusts VIIIth Intern. Congress of soil science, Bucharest, Romania, 1 : 53-62.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1959. - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. Inst. rech. sah. univ. Alger, Mémoire h.-s., 617 p.

M'TIMET (A.), 1979. - Étude du bassin versant d'oued Métameur (Zone aval) E. 545 - Division des sols, Tunis, 134 p. + annexes, 3 cartes h.-t.

M'TIMET (A.), 1981. - Les limons à nodules : le matériau, les sols, la sauvegarde et la mise en valeur. Communic. au 1er Congrès national des sciences de la terre. Tunis 28 septembre-4 octobre 1981, 7 p.

M'TIMET (A.), 1983. - Contribution à l'étude pédologique des limons des Matmatas (Sud Tunisien), Thèse 3e cycle. Univ. P.-et-M.-Curie, Paris, 183 p. + annexes, 7 cartes h.-t.

M'TIMET (A.), 1984. - Sauvegarde des Oasis du Gouvernorat de Gabès (Réactualisation sommaire des données pédologiques) CRDA Gabès, Arrondissement des sols, 16 p.

M'TIMET (A.), 1987. - Évaluation de la sensibilité des sols arides à l'érosion hydrique (étude de simulation de pluies sur les sols d'un microbassin type jessour - Matmata). Tunisie présaharienne, ES 240, 51 p. Direction des sols, Tunis.

REMY (J.-L.), 1971. - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique. Signification des limites d'Atterber en matière de travail du sol. *Ann. Agro.*, n° 22, 5 : 267-290.

SELMENE et BOUAZIZ, 1982. - Étude d'un sol traité à la margine. Projet de fin d'études. ÉNIT, Département de génie civil, Tunis, 38 p.

TERAGUI (K.) et PECK (R. B.), 1961. - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Dunod Éd., Paris, 565 p.

VALENTIN (C.), 1981. - Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de région subdésertique (Agadez, Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse de 3e cycle, Paris, *Études et thèses ORSTOM*, 1985, 259 p.

VAN KEULEN (H.), 1975. - Simulation water and herbage growth in arid regions. Wageningen Centre for agricultural publishing and documentation, 176 p.

WISCHMEIER (W.), 1959. - A rainfall index o for anniversal soil - lœss equation. *Agron. Eng.*, 39, 8 p.

Annexe 1

FICHE ANALYTIQUE

PROFIL
MAT 6
Jebel

	Horizon		9									HRZ
	Groupe		13	AD SD	AD SD	AD SD						GR
	Sous-groupe		17									SG
	(Famille)		21									FM
	(Série)		25									SR
	(Région)		29									RG
	Numéro du sac		33									SAC
	Profondeur minimale en cm		37	5	35	65						PMI
	Profondeur maximale		41	20	55	85						PMA
Granulométrie en 10^{-2}	Refus		45									REF
	Carbonate de calcium Tot.		49	1,2 21	2,9 4	15						CDC
	Argile		53	16 12	12 14	11 21						ARG
	Limon fin	2 à 20 μ	57	6 22	5 8	5 9						LMF
	Limon grossier	20 à 50 μ	61	16 28	12 19	14 21						LMG
	Sable fin	50 à 200 μ	65	46 36	65 58	51 49						SBF
	Sable grossier		69	T –	T –	T –						SBG
			73	1	1	1	1	1	1	1	1	CARTE
Matières organiques en 10^{-3}	Carbone		13	0,14	0,07	0,08						C
	Azote		17	0,005	0,025	0,035						N
	M.O.		21	0,24	0,12	0,13						AH
	Acides humiques bruns		25									AHB
	Acides humiques gris		29									AHG
	Acides fulviques		33									AF
Acidité	pH eau 1/2,5		37	7,8	8,0	7,9						PHE
	pH chlorure de potassium		41									PHK
Cations échangeables en mé	Calcium	Ca^{++}	45									CAE
	Magnésium	Mg^{++}	49									MGE
	Potassium	K^{+}	53									KE
	Sodium	Na^{+}	57									NAE
	Capacité d'échange T		61	6,8	5,2	5,2						T
Acide phosphorique en 10^{-3}	Phosphore total PPM		65	157,0	–	–						PT
	Phosphore assim. Truog		69									PAT
			73	2	2	2	2	2	2	2	2	CARTE
	Phosphore assim. Olsen		13	138	138	113						PAO
	Phosphore ass. citrique		17									PAC
Eléments totaux (triacide) en 10^{-2}	Gypse		21	5	2	3						PRT
	Résidu		25									RSD
	Silice	SiO_2	29									SI
	Alumine	Al_2O_3	33									AL
	Fer Total	Fe_2O_3	37	27,0	27,0	20,8						FE
	Titane	TiO_2	41									TI
	Manganèse	MnO_2	45									MN
	Fer libre	Fe_2O_3	49	6,0	6,5	5,0						FEL
en mé	Calcium	Ca^{++}	53									CA
	Magnésium	Mg^{++}	57									MG
	Potassium	K^{+}	61	2,93	3,17	2,35						K
	Sodium	Na^{+}	65									NA
Structure et caractéristiques hydriques	Porosité en 10^{-2}		69	48,4	41,96	46,15						PRS
			73	3	3	3	3	3	3	3	3	CARTE
	pF 2,7		13	14,7	9,5	13,3						PF2
	Saturation %		17	34,0	32,0	35,0						PF3
	pF 4,2		21	5,2	4,9	5,4						PF4
	Instabilité structurale log		25	1,3	2,33	1,8						IS
	Perméabilité log 10 K		29	2,05	1,88	1,5						PMB
Sels solubles, extrait pâte saturée en mé	Conductivité L en m-mho/cm		33	2,9	2,3	[illegible]						L
	Chlorures	Cl^{-}	37	4,[illegible]	4,[illegible]	8,5						CL
	Sulfates	SO_4^{--}	41	36,6	36,8	40,0						SO4
	Carbonates	CO_3^{--}	45									CO3
	Bicarbonates	HCO_3^{-}	49	1,0	1,6	1,0						HCO
	Calcium	Ca^{++}	53	30,0	29,5	34,0						CAS
	Magnésium	Mg^{++}	57	5,0	9,0	6,5						MGS
	Potassium	K^{+}	61	0,2	0,1	0,9						KS
	Sodium	Na^{+}	65	2,7	2,9	8,1						NAS
extrait un dixième	Conductivité L 1/10 en m-mho/cm		69									L 10
			73	4	4	4	4	4	4	4	4	CARTE

Annexe 2

FICHE ANALYTIQUE

PROFIL
MAT 26
Plaine

	Horizon		9									HRZ
	Groupe		15	AD SD	AD SD	AD SD	AD SD					GR
	Sous-groupe		17									SG
	(Famille)		21									FM
	(Série)		25									SR
	(Région)		29									RG
	Numéro du sac		33									SAC
	Profondeur minimale en cm		37	5	20	80	120					PMI
	Profondeur maximale		41	10	40	100	150					PMA
Granulométrie en 10^{-2}	Refus		45	22	18	23						REF
	Carbonate de calcium		49	21	48	48	28					CDC
	Argile		53	8 11	8 24	10 22	29 6					ARG
	Limon fin	2 à 20 μ	57	3 11	2 17	2 22	2 30					LMF
	Limon grossier	20 à 50 μ	61	9 6	5 7	6 8	7 17					LMG
	Sable fin	50 à 200 μ	65	55 72	40 50	35 45	35 42					SBF
	Sable grossier		69	T 1	T 2	T 2	T 1					SBG
			73	1	1	1	1	1	1	1	1	CARTE
Matières organiques en 10^{-3}	Carbone		13	0,3	0,27	–	–					C
	Azote		17	0,035	0,05	0	0,01					N
	M.O.		21	0,51	0,46	–	–					AH
	Acides humiques bruns		25									AHB
	Acides humiques gris		29									AHG
	Acides fulviques		33									AF
Acidité	pH eau 1/2,5		37	8,4	8,6	8,3	9,7					PHE
	pH chlorure de potassium		41									PHK
Cations échangeables en mé	Calcium	Ca^{++}	45									CAE
	Magnésium	Mg^{++}	49									MGE
	Potassium	K^{+}	53									KE
	Sodium	Na^{+}	57									NAE
	Capacité d'échange		61	4,3	3,8	4,8	5,2					T
Acide phosphorique en 10^{-3}	Phosphore total	PPM	65	170,0	200,0	105,0	140,0					PT
	Phosphore assim. Truog		69									PAT
			73	2	2	2	2	2	2	2	2	CARTE
	Phosphore assim. Olsen		13	50,0	30,0	35,0	125,0					PAO
	Phosphore ass. citrique		17									PAC
Eléments totaux (triacide) en 10^{-2}	Gypse %		21	T	T	T	18,0					PRT
	Résidu		25									RSD
	Silice	SiO_2	29									SI
	Alumine	Al_2O_3	33									AL
	Fer total	Fe_2O_3	37	14,4	10,4	12,4	16,8					FE
	Titane	TiO_2	41									TI
	Manganèse	MnO_2	45									MN
	Fer libre	Fe_2O_3	49	4,2	2,7	2,7						FEL
en mé	Calcium	Ca^{++}	53									CA
	Magnésium	Mg^{++}	57									MG
	Potassium	K^{+}	61	2,6	1,76	1,82	2,17					K
	Sodium	Na^{+}	65									NA
Structure et caractéristiques hydriques	Porosité en 10^{-2}		69	46,34	47,2	50,39						PRS
			73	3	3	3	3	3	3	3	3	CARTE
	pF 2,7		13	14,5	11,5	13,5	11,6					PF2
	Saturation %		17	34,0	33,0	35,0	44,0					PF5
	pF 4,2		21	7,5	8,3	7,5	7,2					PF4
	Instabilité structurale	log	25	1,6	1,6	1,9	1,49					IS
	Perméabilité	log 10 K	29	1,67	1,31	1,23	–					PMB
Sels solubles, extrait pâte saturée en mé	Conductivité L en m-mho/cm		33	0,8	1,63	0,51	2,67					L
	Chlorures	Cl^{-}	37				12,0					CL
	Sulfates	SO_4^{--}	41				30,0					SO4
	Carbonates	CO_3^{--}	45				–					CO3
	Bicarbonates	HCO_3^{-}	49				2,1					HCO
	Calcium	Ca^{++}	35				34,0					CAS
	Magnésium	Mg^{++}	57				4,0					MGS
	Potassium	K^{+}	61				0,19					KS
	Sodium	Na^{+}	65				3,0					NAS
extrait un dixième	Conductivité L 1/10 en m-mho/cm		69									L 10
			73	4	4	4	4	4	4	4	4	CARTE

Guy BOUTEYRE

Une calamité pour l'agriculture en zone aride :

la salinisation des terres irriguées en basse vallée de l'Euphrate (République arabe syrienne)

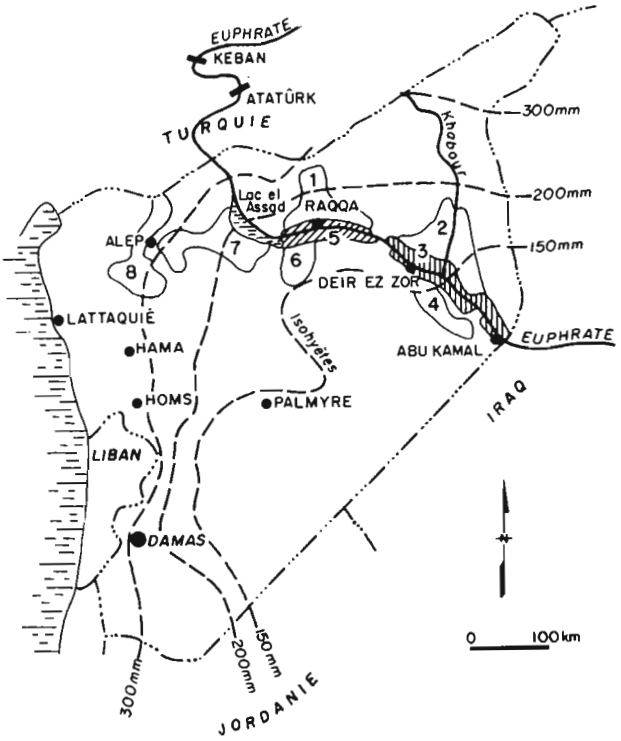
INTRODUCTION

À l'exception de ses zones côtières, à l'ouest, la Syrie bénéficie d'un climat méditerranéen chaud et sec au nord, méditerranéen subdésertique très chaud au sud et à l'est. La culture irriguée est possible sur une grande partie du territoire grâce à l'Euphrate, dont la source se trouve dans les zones montagneuses d'Arménie, en Turquie. Ce fleuve a été barré à Tabqa, en amont de Raqqa. Une retenue de plus de 80 km de long, le Lac El Assad, a été créée, qui est la pièce maîtresse de l'aménagement hydroélectrique du bassin de l'Euphrate, avec 2 grands axes agricoles : mise en culture de zones quasi désertiques de part et d'autre de la vallée et modernisation de l'agriculture existante dans la vallée, en aval du barrage (fig. 1).

En 1973-74, au moment où la construction du barrage se terminait, le Gouvernement syrien a demandé simultanément à plusieurs sociétés étrangères d'ingénierie des études de développement hydroagricole pour chacune des unités du bassin de l'Euphrate. Les premières réalisations, sur le secteur pilote de Raqqa, jamais cultivé auparavant, ont mis en évidence l'importance des problèmes techniques dus au gypse, dans la plupart des unités d'aménagement en bordure de la vallée proprement dite, et aussi les difficultés d'installer des populations non préparées aux cultures prévues. Au même moment, les autorités ont pris conscience de la nécessité et de l'urgence d'améliorer la situation de l'agriculture dans la vallée elle-même. En effet, les sols, mis en culture par irrigation dans les années cinquante pour produire du coton et des céréales, étaient gravement affectés par la salinisation, surtout dans la partie aval de la vallée. Les rendements étaient en forte baisse et plusieurs milliers d'hectares, totalement stérilisés, étaient abandonnés.

Le Groupement d'études et de réalisations des sociétés d'aménagement régional (Gersar) et la Société centrale pour l'équipement du territoire (Scet), organismes français, ont réalisé les études en basse vallée de l'Euphrate de 1975 à 1985, depuis les diagnostics de base et les études de faisabilité jusqu'aux projets détaillés. Les premières réalisations d'importance, qui concernaient le drainage, ont débuté en 1983.

Une description du milieu physique est nécessaire pour comprendre l'occupation des terres ainsi que les effets de la salinisation sur les sols et sur les eaux dans la basse vallée de l'Euphrate. Elle permettra de saisir les orientations données aux études en vue d'élaborer et de proposer une méthode de mise en valeur réellement applicable, fondée sur un système de drainage adapté aux conditions locales.



GRANDES UNITES (Superficies en milliers d'ha)

1.- Bassin du Balikh	192
2.- Bas-Khabour (Différé)	70
3.- Basse vallée del'Euphrate	126
4.- Mayadin (abandonné)	40
5.- Moyenne vallée de l'Euphrate	30
6.- Rassafé (abandonné)	40
7.- MésKéné	116
8.- Plaine d'Alep (prévision)	137

Figure 1 - *Localisation schématique des unités d'aménagement du bassin de l'Euphrate.*

LE MILIEU PHYSIQUE EN BASSE VALLÉE DE L'EUPHRATE

Situation générale

La basse vallée de l'Euphrate forme une sorte de ruban vert cultivé, sensiblement rectiligne, dans le désert syrien jusqu'à la frontière iraqienne. Sur une longueur de 170 km, sa largeur varie de 5 à 14 km et sa pente, très régulière, est très faible : 0,25 m.km^{-1} en moyenne.

Deir-ez-Zor, ville principale et chef-lieu du Mohafazat, est à 330 km d'Alep et à 500 km de Damas. Des traces très anciennes d'occupation humaine ont été reconnues dans de nombreux tells : entre autres Bugros, Achara et Mari qui fut une capitale importante au XXVe siècle av. J.-C. Des fortifications en ruines jalonnent la vallée : Doura-Europos, construite par un lieutenant d'Alexandre le Grand, Halabié-Zalabié, élevée par les Byzantins, le château de Mayadin, érigé par les Arabes.

Climat

Les totaux moyens annuels des précipitations, pour les 2 stations de Deir-ez-Zor et d'Abu Kamal, sont de 163 mm et de 109 mm, avec la même répartition de novembre à avril et la même sécheresse totale en été. Les températures maximales dépassent

45 °C en juillet et en août ; les températures minimales peuvent être inférieures à - 5 °C de décembre à février. L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée selon la formule de Penman modifiée est de 2 100 mm, avec une pointe de 420 mm en juillet et un minimum de 30 mm en décembre.

Si les cultures d'été (coton, sésame, melon, pastèque, etc.) doivent toute leur eau à l'irrigation, celles d'hiver (céréales) en reçoivent une part, très aléatoire, des précipitations.

Géologie - Géomorphologie

La basse vallée de l'Euphrate est inscrite dans des formations quasi horizontales du Mio-Pliocène d'origine lagunaire, avec des marnes, du gypse, des calcaires à la base, et des grès assez fins au sommet. Un épanchement basaltique assez étendu, daté du Plio-Quaternaire, couronne les hauteurs entre Raqqa et Deir-ez-Zor.

Entaillant ces sédiments de 80 à 100 m, à l'amont, et de 50 à 60 m, à l'aval, l'Euphrate a apporté 10 à 20 m d'alluvions au Quaternaire supérieur et à l'Holocène. Il a d'abord déposé 5 à 15 m d'alluvions caillouteuses, constituées de quartz, de silex et de roches métamorphiques. Après des remaniements superficiels, d'origine éolienne, et des apports latéraux localement riches en gypse, le fleuve a déposé des alluvions holocènes épaisses de plusieurs mètres qui forment 2 niveaux bien distincts, séparés par un talus de 2 à 3 mètres :

- le niveau supérieur constitue des surfaces homogènes et très étendues dans la vallée ; les matériaux sont de texture limono-argileuse. Pour la commodité du langage, ces alluvions seront désignées sous le terme de «subrécentes» ;
- le niveau inférieur, proche du fleuve, regroupe en réalité plusieurs apports difficiles à distinguer avec certitude ; les matériaux sont de texture limono-sableuse et même franchement sableuse. Ces alluvions seront désignées sous le terme de «récentes».

En coupe transversale (fig. 2), la basse vallée de l'Euphrate est dissymétrique, avec une falaise gypseuse haute en rive droite et un talus de cailloutis alluvial localement encroûté par le gypse et par le calcaire en rive gauche.

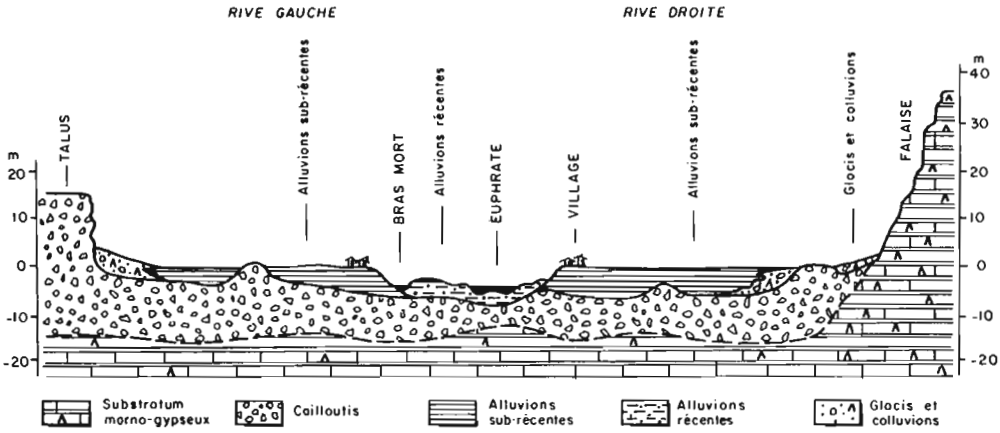


FIGURE 2 - *Coupe transversale schématique de la basse vallée de l'Euphrate.*

Hydrologie

L'Euphrate n'a qu'un seul affluent pérenne, le Khabour, en rive gauche. Il reçoit quelques affluents temporaires, en rive droite, qui collectent les eaux de bassins versants très étendus, dans le désert syrien.

Au début des années soixante-dix, le débit moyen de l'Euphrate était de l'ordre de 900 $m^3.s^{-1}$, avec des extrêmes voisins de 5 000 $m^3.s^{-1}$, en mai, et de 250 $m^3.s^{-1}$, à la fin de l'été. Sans concertation, les Turcs et les Syriens ont élevé les barrages de Keban et de Tabqa qu'ils ont remplis simultanément, avec pour effet de priver pratiquement d'eau l'Iraq durant l'opération. Depuis, les Turcs ont construit encore un barrage, qu'ils viennent de remplir, et ils en prévoient un autre beaucoup plus important, celui d'Atatürk. Actuellement, le débit minimal moyen en aval du barrage syrien de Tabqa est programmé pour être de 470 $m^3.s^{-1}$ en septembre, ce qui constitue une ressource en eau très importante pour l'agriculture. Comme la vocation de ce barrage est la production prioritaire d'électricité, un second barrage a dû être construit récemment, un peu en aval, pour réguler les volumes d'eau mis à la disposition de l'irrigation.

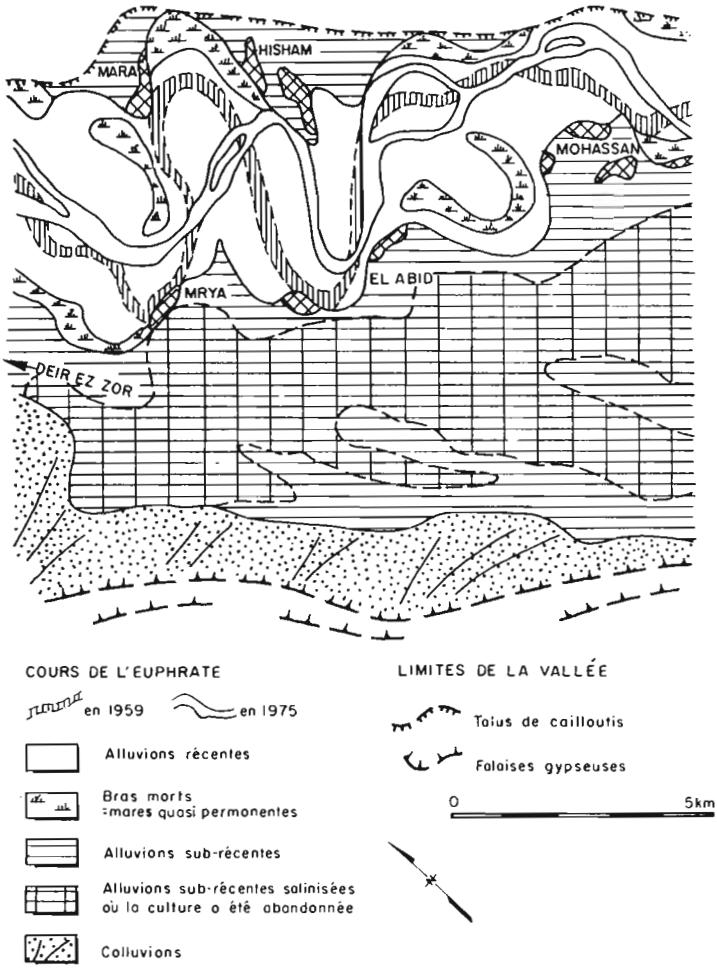


FIGURE 3 - *Extrait réduit de la carte géomorpho-pédo-physiographique à 1/50 000.*

Le tracé de l'Euphrate a connu des changements importants dans la partie de la vallée occupée par les alluvions récentes. L'extrait de carte (fig. 3) illustre le déplacement des méandres de 1959 (cartes russes au 1/25 000) à 1975 (photographies aériennes syriennes). Ce processus, normal et très rapide dans cette région aride, laisse des méandres abandonnés, qui constituent des mares peu profondes, quasi permanentes.

Hydrogéologie

2 aquifères ont été reconnus :

- aquifère régional profond, Mio-Pliocène, pratiquement sans relation avec la vallée ;
- aquifère alluvial de l'Euphrate. Le réservoir de cet aquifère a une structure bicouche : il est constitué à la base par les dépôts grossiers, cailloutis et sables, et au sommet par les alluvions fines holocènes. À la base, ce réservoir est limité par le substratum marno-gypseux qui peut être considéré comme imperméable, ainsi que l'ont montré plusieurs tests ponctuels. Transversalement, il est limité par le fleuve qui est drainant. Les apports latéraux sont réduits à des arrivées d'eaux superficielles ou infiltrées à la suite des précipitations hivernales. Comme les 2 couches du réservoir ont des transmissivités très contrastées, tout se passe comme si les limons holocènes étaient essentiellement le siège des transferts verticaux, tandis que les écoulements horizontaux avaient lieu dans le cailloutis situé au-dessous.

L'OCCUPATION DES SOLS ET LA SALINISATION

Historique

L'irrigation a existé depuis la plus haute antiquité en basse vallée de l'Euphrate, comme en témoignent les écrits de Mari ; ce site se trouve à une dizaine de kilomètres en amont d'Abu-Kamal sur les alluvions subrécentes. Il est difficile d'imaginer la géographie de la vallée en cette période, alors que les alluvions récentes n'étaient pas encore déposées. Il ne reste rien des installations d'irrigation de l'époque. Peut-être ont-elles été détruites, comme le fut Mari, au XVIIIe siècle av. J.-C. par HAMMOURABI, roi de Babylone célèbre par ailleurs par son code qui réglementait avec vigueur et bon sens la plupart des actes de la vie en Mésopotamie, en particulier la production agricole et l'irrigation.

Les Arabes ont pratiqué l'irrigation en basse vallée de l'Euphrate ainsi que semblent en témoigner des réseaux importants de levées artificielles de terre, visibles en rive droite à une dizaine de kilomètres au sud de Deir-ez-Zor. Des traces existent aussi en rive gauche en aval du confluent du Khabour. Cette occupation avait peut-être commencé avec les Abbassides au IXe siècle de l'ère chrétienne (HAROUN AL-RACHID, sultan de Baghdad, avait fait de Raqqa sa capitale d'été). Là encore, la topographie de la vallée était certainement différente de l'actuelle car les alluvions récentes n'étaient sans doute pas encore toutes déposées. La date d'abandon de ces installations n'est pas connue.

En fait, une agriculture permanente n'existe en basse vallée de l'Euphrate que depuis la fin du siècle dernier, avec la fixation d'éleveurs venus du sud. Jusqu'à la fin des années trente, seules les alluvions récentes étaient cultivées, avec une irrigation d'appoint alimentée par des norias installées près des berges. Comme le drainage naturel de ces alluvions est bon en général, les problèmes de salinité y sont limités aux abords de quelques bras morts.

Ce n'est qu'après la fin de la Seconde Guerre mondiale que le développement des moyens de pompage dans l'Euphrate, avec des moteurs thermiques puissants et rustiques, a permis l'irrigation des alluvions subrécentes. Des réseaux ont été créés dans tous les villages, qui donnaient lieu à toutes sortes d'accords entre les possesseurs des terres et ceux des pompes et des canaux.

Situation de l'agriculture

Le coton a été le moteur principal du développement de la région. La vallée de l'Euphrate a été jusqu'à maintenant une sorte de paradis sans parasites pour cette culture qui produit des fibres mi-longues appréciées. Après des travaux d'endiguement et de nivellement, la totalité des surfaces irrigables a été occupée. Les dernières zones mises en valeur l'ont été à la fin des années soixante en amont de Deir-ez-Zor. Outre le coton et les céréales d'hiver, le sésame et les fourrages d'été occupent des surfaces assez importantes. Certaines parties de la vallée s'étaient spécialisées dans la production en grand de melons et de pastèques qui trouvaient d'excellents débouchés au Liban. Les alluvions récentes sont plus particulièrement orientées vers le maraîchage pour la consommation locale. La production animale est peu importante et les vergers sont rares. Quelques plantations de peupliers fournissent le seul bois d'œuvre disponible dans la région.

En 1975, une enquête a recensé près de 3 000 stations de pompage, dont 2 200 en rivière et 800 de reprise, pour desservir les 126 000 ha géographiques irrigables gravitairement. Sans compactage initial, tous les canaux en terre, sur des centaines de kilomètres, ont des pertes en eau très importantes (jusqu'à 25 % en extrémité de réseau primaire). Les agriculteurs ont une très bonne technicité dans la conduite de l'irrigation et dans le maniement de l'eau. Les parcelles sont divisées en bassins de submersion de petite taille, qui épousent tous les détails du relief. Cette technique, voisine de celle des oasis d'Arabie, permet des irrigations répétées. Elle est très différente de celle des agriculteurs du centre et du sud de l'Iraq, qui n'effectuent que quelques irrigations d'appoint, sur des céréales d'hiver installées sur des parcelles en général mal nivelées.

Étendue de la salinisation

Peu de temps après la mise en culture, des manifestations de salinité sont apparues, d'abord comme un «mitage» sur certaines parcelles. Elles se sont rapidement étendues à des surfaces importantes qui ont été abandonnées et qui portent des vestiges longtemps reconnaissables de canaux en terre et de diguettes. Les zones les plus atteintes sont les parties centrales des grandes zones d'alluvions subrécentes. Les parcelles qui dominent les alluvions récentes ont continué de produire.

Le tableau I montre la répartition des surfaces abandonnées et des sols salés dans l'ensemble de la vallée en 1976-1978 et leur évolution en 1984. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la superficie de chaque type d'alluvion pour chacun des principaux tronçons de la vallée, d'amont en aval. Les sols abandonnés sont notés A ; ils ont une conductivité électrique supérieure à 30 $dS.m^{-1}$ dans l'extrait de pâte saturée. Les sols peu ou pas salés sont notés N ; leur conductivité est inférieure à 6 à 8 $dS.m^{-1}$. Les sols plus ou moins salés sont notés S.

Les superficies abandonnées sont plus importantes à l'aval qu'à l'amont sur les alluvions subrécentes, surtout en rive droite pour une raison mal expliquée.

Tableau I - Répartition des sols affectés par la salinisation en (1976-1978) et leur évolution en 1984, basse vallée de l'Euphrate.

		Rive droite						Rive gauche					
	Km	Alluvions Subrécentes			Alluvions Récentes			Alluvions Récentes			Alluvions Subrécentes		
		A	S	N	A	S	N	N	S	A	N	S	A
Halabie Zalabie	0												
		2	15	83	/	4	86						
Deir-ez-Zor	50												
Khabour	85							85	13	2	72	16	2
Doura		(30)	(15)	(55)									
Europos	135	13	20	67	2	7	91						
		(41)	(14)	(45)									
Abu Kamal	170	31	16	53	2	7	91	86	10	4	67	18	15
Total		18	18	64	1	9	90	86	1	3	68	17	15
Projection pour l'ensemble en 1984		32	15	53	1	9	90	86	11	3	56	15	29

Une projection (fig. 4) pour la décennie à venir montre que, si rien n'est fait, environ la moitié des alluvions subrécentes devraient être abandonnées, en supposant que l'on continue d'utiliser les sols jusqu'à des niveaux de salinité aussi élevés qu'actuellement.

Le plan de développement hydroagricole doit donc concerner avant tout les alluvions subrécentes puisque ce sont elles qui ont été le plus affectées par la salinisation.

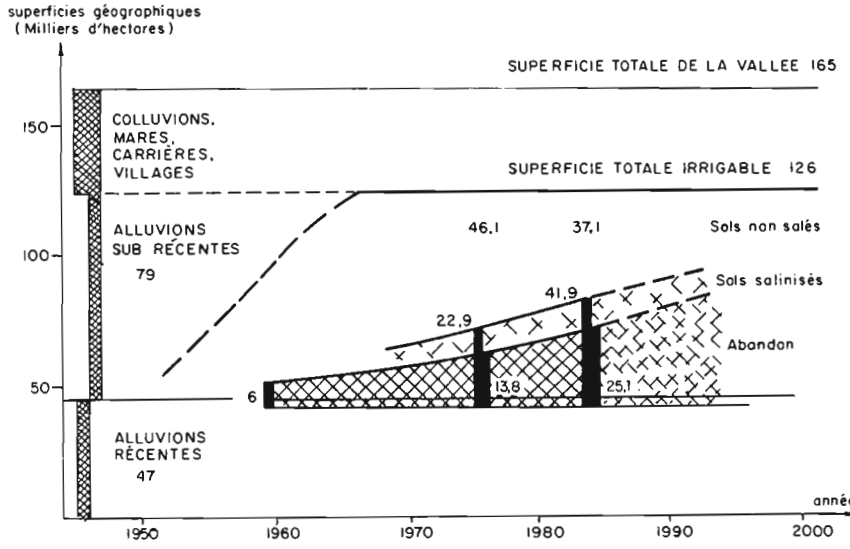


Figure 4 - *Évolution des superficies affectées par la salinisation.*

LA SITUATION DES SOLS ET DES EAUX SOUS L'EFFET DE LA SALINISATION

Les études de diagnostic et d'avant-projet, réalisées de 1975 à 1984, ont collecté des données très détaillées sur la distribution de la salinité et des caractéristiques physiques des sols jusqu'à 2 m de profondeur, ainsi que sur la salinité et les mouvements des eaux.

Les sols

Dans les sols d'alluvions subrécentes, qui devront faire l'objet d'interventions de mise en valeur, les principales distinctions concernent la salinité et les propriétés physiques et hydrodynamiques. En effet, les textures sont limono-argileuses (30 à 40 % d'argile) dans la plus grande partie des zones salinisées. Les structures sont restées très marquées par la sédimentation sur les anciens cours du fleuve et ses défluents ; elles sont prismatiques et grossières dans les bassins de dépôt en eau calme. Ces alluvions sont calcaires, pratiquement dépourvues de gypse. Montmorillonite et chlorite sont les minéraux argileux dominants. L'attapulgite, probablement néoformée, est rencontrée

partout. L'hydromorphie, omniprésente, se manifeste sous forme de petites taches peu contrastées et peu visibles.

Salinité des sols

La salinité a été mesurée sur 2 types d'extraits :

- pâte saturée (CE_e, méthode internationale de référence pour les interprétations agronomiques) ;
- suspension dans le rapport sol/eau égal à 1/2,5 ($CE_{2,5}$, méthode rapide).

Pour les sols les plus fréquents de la vallée, sans gypse et de texture moyenne à fine, on a la corrélation suivante entre ces 2 valeurs :

$$CE_e = 4\ CE_{2,5} + 0,5$$

où :
$r^2 = 0,97$
n = 5 430 échantillons.

Les cartes de salinité, dressées à partir de la salinité globale dans la couche supérieure (0-20 cm) du sol et au-dessous jusqu'à 1 m, ont complété très utilement les cartes d'occupation des terres pour repérer les secteurs en début de salinisation. Elles ont beaucoup servi pour zoner les travaux de mise en valeur. Des superficies importantes sont cultivées alors que leur salinité est supérieure à 16 $dS.m^{-1}$, valeur souvent considérée comme limite pour la mise en culture. Pour cette valeur, les rendements sont diminués de moitié pour les cultures résistantes, telles que le coton ou l'orge, qui cessent toute production vers 26 à 30 $dS.m^{-1}$. Ils sont diminués des trois quarts pour le blé qui ne produit plus au-delà de 20 à 24 $dS.m^{-1}$.

Les sols abandonnés ont un gradient de salinité ascendant très fort : la couche supérieure est 3 à 10 fois plus salée que les couches inférieures. La salinisation des zones abandonnées s'est poursuivie après l'arrêt des cultures puisque la conductivité des couches supérieures dépasse largement 30 $dS.m^{-1}$ pour atteindre 200 $dS.m^{-1}$ et davantage dans les croûtes superficielles. La nappe, alimentée par les irrigations sur les zones cultivées voisines, se maintient à faible profondeur jusqu'à plusieurs centaines de mètres à leur périphérie. Les sols peu ou pas salés ont un gradient descendant. Les sols non salés des zones bien drainées, à nappe profonde, ont un gradient nul.

Le chlore est l'anion le plus abondant dans la plupart des cas. L'ion sulfate, toujours présent, peut être plus abondant que le chlore, dans 20 à 40 % des cas, lorsque la conductivité est inférieure à 16 $dS.m^{-1}$. Les bicarbonates sont peu abondants. Il n'y a pas de carbonates et le pH, qui est généralement inférieur à 8,0, ne dépasse pas 8,5. Le sodium est le cation le plus abondant dans la section aval de la vallée. Le calcium peut être plus abondant que le sodium dans certaines parties des sections moyennes et amont de la basse vallée de l'Euphrate. On observe alors la présence de chlorures de calcium et de magnésium, hygroscopiques, qui forment de larges étendues brunes ou des taches isolées. Après les épisodes pluvieux, la surface de ces zones se couvre d'efflorescences blanches qui disparaissent en quelques jours lorsque les sels hygroscopiques reprennent leur aspect habituel. Le sodium échangeable peut occuper 30 à 50 % du complexe adsorbant. Le magnésium échangeable est presque toujours inférieur au calcium.

Propriétés physiques

L'utilisation agricole et/ou la remise en valeur des sols d'alluvions subrécentes nécessitent de bien connaître leurs propriétés physiques. Il n'a été mis en évidence

aucune relation significative entre la salinité, la texture ou ses composantes, le pH, le taux de sodium échangeable, et les résultats de plusieurs centaines de mesures de vitesse d'infiltration et de perméabilité effectuées sur le terrain. Bien que beaucoup de valeurs soient faibles (fig. 5), la plupart sont compatibles avec les pratiques culturales et l'irrigation. Les plus faibles valeurs de perméabilité (5 à 10 % des cas, dispersés dans la vallée) posent toutefois des problèmes pour la mise en valeur, avec des risques graves d'asphyxie et de création de nappes perchées temporaires.

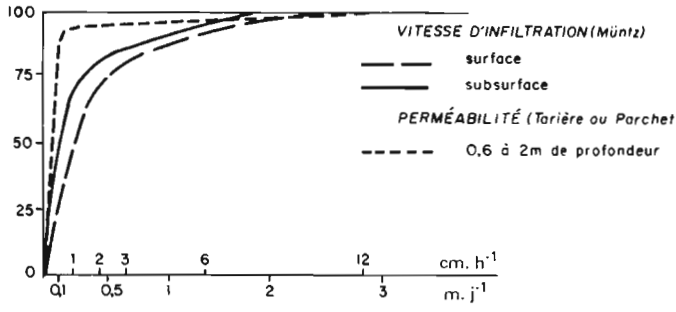


Figure 5 - *Résultats des mesures hydrodynamiques de terrain (fréquences cumulées).*

Les eaux

Qualité des eaux

À leur entrée dans la basse vallée, les eaux de l'Euphrate ont un faciès bien équilibré avec une tendance bicarbonatée calcique. À l'aval, elles sont un peu plus sodiques et même un peu chlorurées. Leur conductivité électrique passe en moyenne annuelle de 0,7 à 0,8 $dS.m^{-1}$, ce qui correspond à des charges de sels dissous de 0,47 à 0,53 $g.l^{-1}$. Leur SAR (*Sodium Adsortion Ratio* = $Na/\sqrt{[Ca + Mg]/2}$, avec Na, Ca, Mg en $mé.l^{-1}$) passe de 0,7 à 1,4 suivant la date et le point de prélèvement. Ces eaux sont donc d'excellente qualité pour l'irrigation.

La conductivité électrique des eaux de la nappe alluviale varie de 1 à 10 $dS.m^{-1}$, dans les alluvions récentes, et de 4 à plus de 130 $dS.m^{-1}$, dans les zones les plus salées des alluvions subrécentes. Leur SAR atteint des valeurs très élevées (70). La variation de concentration des ions bicarbonate, calcium et sulfate est différente de celle des ions magnésium, sodium et chlorure. Le faciès des eaux de la nappe évolue avec leur concentration (fig. 6), en passant de sulfaté calcique à sulfaté sodique pour devenir chloruré sodique aux fortes concentrations, où le magnésium prend une place importante.

Piézométrie de la nappe alluviale

Bien que l'aquifère de cette nappe soit un système bicouche, il a été vérifié sur plusieurs couples de piézomètres que les niveaux piézométriques dans les 2 couches sont pratiquement identiques en régime non perturbé. Un décalage de plusieurs décimètres au moment des apports et des pompages se résorbe en quelques jours. La nappe du cailloutis se comporte comme une nappe libre à débit retardé. La profondeur de la

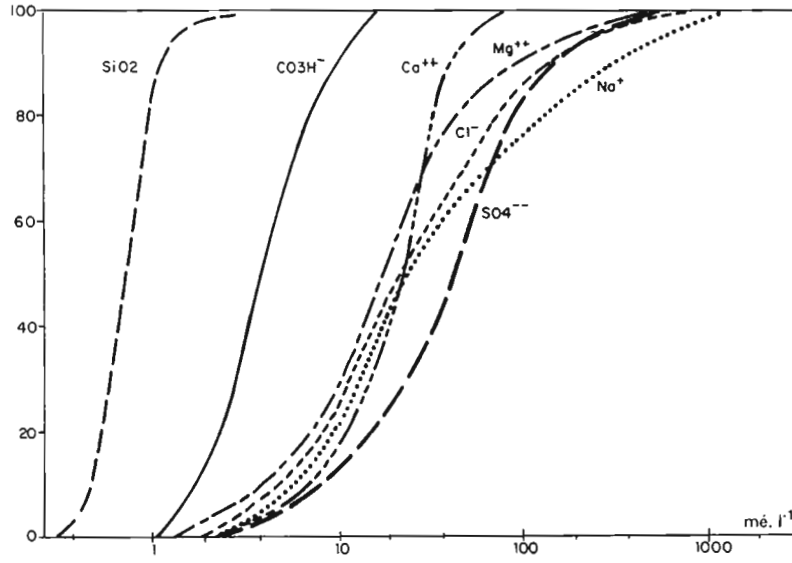


FIGURE 6 - *Concentration des ions dans les eaux de nappe (fréquences cumulées).*

nappe alluviale varie de moins de 1 m, dans les zones abandonnées, à 1,50 à 2,50 m, dans l'ensemble de la vallée. La nappe est à plus de 4 m de profondeur dans les très grandes zones abandonnées, loin des cultures irriguées (à quelques kilomètres en aval de Deir-ez-Zor, en particulier). La période des hautes eaux de la nappe dépend de l'irrigation du coton, de mai à septembre. L'amplitude annuelle est de l'ordre de 1 m à 1,50 m dans les grandes zones cultivées.

Un bilan de la nappe a été esquissé après plusieurs campagnes de mesures piézométriques et grâce à l'emploi d'un modèle hydrogéologique tridimensionnel. Dans les conditions ordinaires de fonctionnement hydraulique de l'ensemble de la vallée et avec la répartition des cultures en place, le bilan pour la fin des années soixante-dix (en millions de mètres cubes) est le suivant :

- volumes prélevés au fleuve pour l'irrigation, 670 ($50 m^3.s^{-1}$) ;
- volumes évapotranspirés par les cultures, 440 ;
- volumes percolés (canaux, parcelles cultivées), 230 ;
- volumes évaporés (mares, sols abandonnés), 60 ;
- volumes internes drainés vers le fleuve, 170.

Les volumes percolés, environ 200 mm par campagne d'irrigation, ont rejoint la nappe dont le niveau s'est élevé en quelques années. Avec un gradient longitudinal très faible et un gradient transversal quasiment nul, le drainage naturel n'a pu être suffisant dans les alluvions subrécentes. Seule une bande de 1 ou 2 km de large, en bordure du talus qui domine les alluvions récentes, se trouve assez bien drainée et ne connaît pas de problèmes de salinité, du moins en surface.

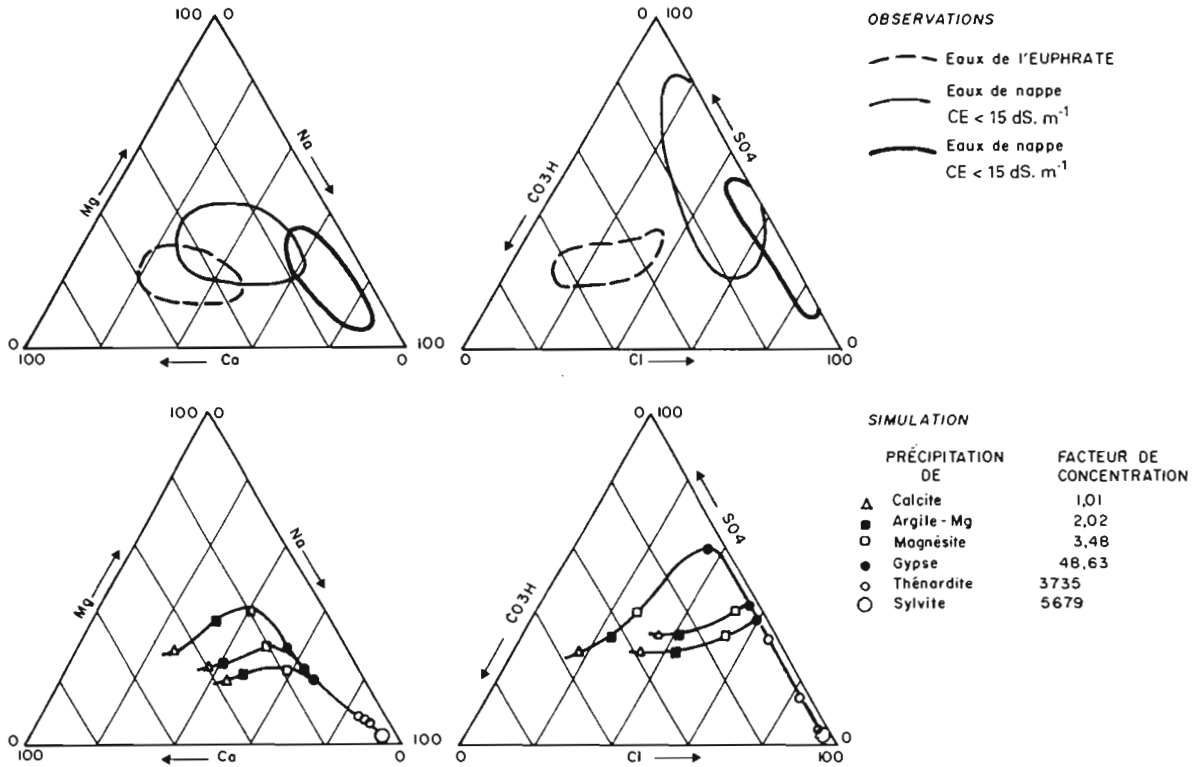


FIGURE 7 - *Diagrammes de Piper.*

Relations entre les eaux et les sols

Faciès des eaux de l'Euphrate et faciès des eaux de nappe

L'emploi d'un modèle, qui prévoit l'évolution de la composition chimique d'un système minéraux-solution en cours de concentration, a permis de vérifier que les faciès des eaux des nappes dérivaient bien de ceux des eaux de l'Euphrate. Les eaux de nappe de concentration croissante se placent sur les cheminements suivis par la simulation de l'évaporation (fig. 7).

Salinité des nappes et salinité des sols

Quelle que soit la profondeur de la nappe, il n'existe pas de relation entre la salinité des sols en surface et la salinité de la nappe. Une seule corrélation a été trouvée entre la salinité de la nappe et la salinité du sol imprégné par la nappe :

$$CE\ eau = 1{,}4\ CE_e + 2$$

où :
$r^2 = 0{,}75$.

Pour un bilan des sels dans les alluvions holocènes

La salinité initiale du sol constitue le point le plus mal connu dans cette tentative de bilan. En dehors de certaines zones peu étendues, qui reçoivent des apports latéraux, cette salinité peut être considérée comme égale à celle des zones actuellement non salées. Pendant que les superficies abandonnées s'accroissaient, leur salinité devenait plus élevée. La salinité de la nappe a augmenté en même temps que son niveau se rapprochait de la surface. Pour être complet, un bilan des sels nécessiterait une bonne connaissance de la salinité des couches profondes. À partir des données du début des années soixante, de 1975-76 et de 1983-84, l'élévation du stock de sels peut être estimée à 250 kilotonnes (kt) par an, pour l'ensemble de la basse vallée de l'Euphrate. Ce chiffre est à rapprocher des apports par les eaux d'irrigation, soit environ 350 kt (kilotonnes) par an. Le drainage naturel, de l'ordre de 100 kt par an, évacuerait moins du tiers des sels apportés par l'irrigation.

LES POSSIBILITÉS DE PORTER REMÈDE À LA SITUATION SUR LES ALLUVIONS SUBRÉCENTES

Les effets néfastes de la salinisation, très rapidement apparus après la mise en irrigation, continuent à évoluer et à s'aggraver depuis les premiers diagnostics.

Évaluation globale de la situation

Les points suivants doivent être pris en considération :

- la salinisation s'est développée parce que le drainage naturel n'a pas pu évacuer les sels apportés par l'eau d'irrigation, dont la qualité est pourtant bonne ;
- les excès d'eaux proviennent en grande partie des fuites importantes du réseau d'irrigation. La réfection de la totalité des canaux est donc nécessaire, en les moderni-

sant. Le système d'irrigation gravitaire peut être conservé, bien qu'il implique des pertes abondantes par percolation ;

- la salinisation est de type neutre, sans élévation du pH et sans alcalisation particulièrement nocive. Des parcelles abandonnées, aussi bien par suite d'insuffisance dans l'amenée d'eau que par suite de forte salinisation, ont pu être remises en culture sans grande difficulté ; en effet, 10 à 25 % des terres abandonnées en 1976 étaient retrouvées en culture en 1984 ;

- le drainage général des zones salinisées est possible par la technique du drainage en grand, qui utilise la présence des graviers en profondeur. Il est cependant difficile sur des terres dont les propriétés hydrodynamiques sont peu favorables dans l'ensemble, et qui ont été vraisemblablement altérées par la salinisation ;

- une ressource en eau abondante et de bonne qualité existe dans toute la vallée. Elle peut être mobilisée assez facilement malgré quelques contraintes techniques ou politiques ;

- les sols cultivables et irrigables sont rares dans les périmètres de l'Euphrate. Les sols du «plateau syrien» sont peu profonds, sableux, gypseux, souvent à encroûtement gypseux. La rareté des terres, la présence d'agriculteurs nombreux et expérimentés ainsi que le besoin impérieux de produire des denrées vivrières et industrielles imposent d'utiliser toutes les ressources en sols même si leurs potentialités ne sont pas les meilleures. La vallée de l'Euphrate reste un lieu propice pour l'agriculture.

Problème du drainage

Un bon drainage est un préalable indispensable pour une agriculture irriguée rationnellement. Le drainage est aussi indispensable pour la récupération des terres abandonnées par lessivage des sels préalablement à leur mise en culture. Il est recommandé que le drainage soit aussi profond que possible pour diminuer le risque de salinisation sous climat aride. En Iraq, une loi impose de drainer à 2 m pour cette raison.

2 systèmes de drainage peuvent être envisagés :

- drainage agricole classique par drains enterrés, fossés et collecteurs ;

- drainage en grand, qui tire parti de la disposition bicouche limons sur graviers de la vallée.

Drainage agricole

Les drains enterrés doivent être serrés et placés profondément. La faible pente de la vallée impose des collecteurs de grande dimension et des stations de relèvement nombreuses et importantes. L'ensemble est très onéreux et son fonctionnement sans doute aléatoire. La seule expérience locale est celle de la ferme de Beni-Taghleb à proximité de Deir-ez-Zor, où la nappe est drainée par des collecteurs creusés jusqu'au sommet du gravier qui se trouve être peu profond dans cette partie de la vallée. L'écartement des drains, tous situés au-dessus, ne joue aucun rôle. La solution du drainage agricole n'est à retenir que lorsqu'il n'y en a pas d'autre possible.

Drainage en grand

La disposition bicouche des sédiments est favorable au drainage en grand, ou drainage vertical : les limons sont drainés verticalement pendant que les alluvions caillouteuses ou sableuses servent à transférer l'eau vers des collecteurs profonds ou vers des pompes qui la rejettent dans un réseau d'évacuation de surface peu onéreux.

Ce système fonctionne convenablement en Californie, en Ouzbékistan, dans la Steppe de la Faim, où le matériel grossier est peu profond, et aussi au Pakistan, dans la plaine de l'Indus, où les sables drainants sont assez profonds.

La couche de graviers qui assure le drainage horizontal doit être continue, ce qui est le cas en basse vallée de l'Euphrate, mais elle doit aussi être assez épaisse pour que les pompes prévues fonctionnent normalement, ce qui n'est pas partout le cas ; le recours au drainage agricole est alors nécessaire.

Il faut que le limon permette le transit de l'eau de percolation dans les conditions de la mise en valeur. Les essais de pompage et les études sur modèle ont montré que le drainage vertical s'effectue bien, même pour les limons à très forte résistance hydraulique.

Du point de vue technologique, les forages doivent être très bien exécutés et surtout bien développés pour donner les débits attendus.

Ce système de drainage a été retenu pour les alluvions subrécentes car il peut être installé de manière évolutive, ce qui est pratiquement impossible avec le drainage agricole. Comme il est souhaitable d'intervenir rapidement, l'équipement a pu être prévu en 2 phases :

- dans les conditions actuelles, il faut abaisser la nappe au-dessous d'une profondeur critique - on a retenu 2,50 m - de façon à réduire la concentration des sels dans la couche superficielle des sols. Dans le bilan de la nappe (*cf. supra*), les volumes évaporés sont pompés et les volumes internes drainés vers le fleuve sont un peu réduits. Selon les conditions locales reconnues au moment de l'installation, et après passage au modèle hydrodynamique, un forage pour 200 à 300 ha est suffisant ;
- dans les conditions futures d'irrigation rationnelle, les volumes d'eaux mis en œuvre seront sensiblement augmentés. Les volumes prélevés au fleuve devront être plus que doublés et les volumes à rejeter par pompage devront être multipliés par 4. Un forage pour chaque centaine d'hectares sera nécessaire. Ces forages pourront être installés au fur et à mesure de la modernisation de l'irrigation.

Problème du lessivage des sels des terres abandonnées

Sous climat aride, l'élimination des sels par lessivage intensif préalable est nécessaire pour remettre les terres en culture. La salinité de la couche supérieure du sol doit être ramenée à moins de 6 à 8 $dS.m^{-1}$ dans l'extrait de pâte saturée pour permettre l'installation des cultures.

En dehors des remises en culture non contrôlées de parcelles abandonnées par les agriculteurs, un seul essai de lessivage contrôlé avait été réalisé sur la ferme de Beni-Taghleb. Une submersion avec apport en continu de 870 mm en trois semaines avait bien dessalé un sol dont la conductivité initiale était supérieure à 150 $dS.m^{-1}$ dans la couche superficielle. Mais cette parcelle, assez perméable, n'est pas représentative des alluvions subrécentes. Le besoin d'estimer les quantités d'eau nécessaires au lessivage des sels imposait des investigations supplémentaires. Des tests de lessivage, avec des doses croissantes, ont été pratiqués sur plusieurs sites caractéristiques. Ils ont vérifié plusieurs hypothèses :

- l'aptitude des sols au lessivage ne dépend pas vraiment de leur richesse en sels solubles mais bien davantage de leur comportement hydrodynamique ;
- l'efficacité de l'eau de lessivage est meilleure avec des apports fractionnés qu'avec des apports massifs continus, comme on les pratique en Iraq.

Bien que la vitesse d'infiltration diminue sous des apports de longue durée, il n'a pas été observé de colmatage susceptible de remettre en cause le lessivage intensif. Le

gypse est assez abondant à proximité pour être utilisé en cas de besoin, dans des conditions pratiques encore à déterminer. Le calendrier des opérations de lessivage a été préparé en tenant compte des possibilités du système de drainage et des futurs réseaux d'irrigation.

Problème de la salinisation de l'Euphrate

L'évacuation des eaux de drainage n'est possible que dans le fleuve. Il y a lieu de craindre que le rejet d'eaux en grande quantité, et plus ou moins chargées en sels, augmente sensiblement la salinité de l'Euphrate. Le drainage en grand va entraîner un renouvellement de la nappe dans les limons et dans le cailloutis plus complet et plus rapide qu'un drainage agricole. L'incidence des rejets sur la salinité du fleuve dépend de la vitesse des équipements de drainage et de la modernisation de l'irrigation. Différents calculs et des simulations relatives à plusieurs hypothèses d'équipement ont montré qu'une augmentation durable de salinité de l'Euphrate pouvait se produire. Elle serait inférieure à 0,1 $dS.m^{-1}$, donc sans effets particulièrement nocifs pour l'aval. Toutefois, des pointes temporaires qui atteindraient 0,25 $dS.m^{-1}$ et qui correspondraient à des phases de lessivage intensif, sont possibles. Elles peuvent et elles doivent être programmées en dehors des périodes d'irrigation intensive.

Problème du choix des cultures

Les cultures pratiquées jusqu'à maintenant seront maintenues en raison de leur résistance au sel et de leur bon comportement dans le pays. Les cultures fourragères seront développées de façon à accroître l'élevage. La culture du riz n'a pas été retenue, faute d'infrastructures en Syrie, bien que ce pays en consomme de grandes quantités.

Le maintien de l'agriculture sur les alluvions subrécentes et leur remise en production dépendent avant tout de la réussite du drainage, qui doit être installé dans toute la vallée et dans les plus brefs délais. La première phase d'équipement de drainage s'achève en rive droite. La rationalisation de l'irrigation, moins primordiale bien que très importante, peut être quelque peu différée. Elle n'est pratiquement pas encore commencée.

Les autorités du pays, qui ont tardé à prendre conscience de la gravité de la situation de l'agriculture dans la vallée de l'Euphrate, recherchent maintenant les moyens financiers, matériels et sociaux nécessaires pour mettre en œuvre les solutions techniques qu'elles ont approuvées. Les besoins sont énormes et ne peuvent être réunis que grâce à une importante aide internationale désireuse d'aider la Syrie, dont les ressources sont par ailleurs limitées.

La situation est très diversement ressentie par les habitants des villages ; certains quittent l'agriculture pour les banlieues de Deir-ez-Zor, Alep et Damas, alors que d'autres, très nombreux, améliorent leurs habitations et construisent en dur, pour rester.

CONCLUSION

La salinisation des terres en basse vallée de l'Euphrate est une véritable calamité par sa rapidité et son extension. Environ la moitié des terres mises en culture, depuis une trentaine d'années, est concernée et une très grande partie a été abandonnée.

Les études de diagnostic et de projets ont mis en évidence les difficultés à surmonter pour stopper l'extension de la salinisation et pour rendre à l'agriculture des sols qui ont été dégradés par ce phénomène extrêmement grave en zones arides.

Les connaissances et les références locales et/ou internationales laissent place à beaucoup d'incertitudes et d'imprécisions dans le choix des techniques de mise en valeur.

Le choix du système de drainage a été tout particulièrement délicat. Le drainage de type agricole classique par drains enterrés, très onéreux et aux résultats très certainement aléatoires, ne pouvait pas être retenu sur des superficies aussi importantes. Le drainage vertical, par pompage dans les cailloutis en profondeur, met en oeuvre des techniques d'étude et de réalisation dont la maîtrise est assez difficile ; il a paru le plus apte pour résoudre le problème.

Des recherches sont nécessaires à la fois pour la compréhension des mécanismes et pour une application immédiate dans le domaine de l'hydrodynamique des sols affectés par la salinisation. Les études classiques de sols, avec leurs descriptions et leurs classifications, sont insuffisantes pour orienter les choix technologiques de mise en valeur dans les milieux salins. En fait, le lessivage des sels dépend assez peu des quantités de sels à éliminer et beaucoup des propriétés physiques des sols, héritées de la sédimentation et de la salinisation. Leur appréciation passe par des mesures complexes et ponctuelles qui, malheureusement, ne permettent pas de très bien choisir ni de justifier tous les travaux de mise en valeur à effectuer. Les résultats des modèles actuels, hydrodynamiques, chimiques ou hydrides, doivent être utilisés avec la plus grande prudence, sans perdre de vue qu'ils dépendent de la valeur des données utilisées.

Un des principaux enseignements de la basse vallée de l'Euphrate est sans doute qu'il est très difficile et très onéreux de lutter contre la salinisation lorsque les dégats qu'elle produit sont constatés. Cette situation fait regretter de ne pas avoir cherché, dès la mise en culture, à se prémunir contre ce fléau des régions arides.

G. BOUTEYRE : *pédologue*,
ORSTOM, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1
En service détaché au Gersar jusqu'en 1987

BIBLIOGRAPHIE

ARAR (A.), 1981. - Irrigation and drainage in relation to salinity and waterlogging and optimum crop production. International course on water planning in arid and semi-arid zones. Acsad. Cefigre. Sophia Antipolis. 27 p.

AYERS (R. S.) et WESTCOT (D. W.), 1985. - Water quality for Agriculture. FAO. *Irrigation and Drainage Paper*, n° 29, Revised 1.

BOUMANS (J. H.), HULSBOS (W. C.), LINDENBERG (H. L. J.) et VAN DER SLUIS (P. M.), 1963. - Reclamation of salt affected soils in IRAQ. Soil hydrological and agricultural Studies. Dieleman editor. Wageningen, 173 p.

DEFFONTAINES (G.), 1985. - Recherche de corrélations entre les résultats des mesures hydrodynamiques de terrain et les caractères du sol. Application aux sols de la Basse Vallée de l'Euphrate (Syrie). USTL Montpellier, BRL Nîmes, 46 p + annexes.

DOSSO (M.), 1980. - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse Vallée de l'Euphrate, en Syrie. Gersar. Université Paul-Sabatier, Toulouse. 181 p.

EREMENKO (G.), GVOZDEV (V. P.), JUBBOORI (S. A.) et JOWAD (S. N.), 1978. - Leaching requirements for salt-affected lands in the Central Iraq. State Organization for Soils and Land Reclamation. Abu-Ghraib. Iraq. *Technical Bulletin* n° 58, 72 p.

FINET (A.), 1983. - Le code de Hammurapi, 2e édition, *Littératures anciennes de Proche-Orient*, le Cerf, 156 p.

GERSAR, 1985. - Development of the Lower Euphrates Valley. Evolution of the Salinity of the Euphrates. Reminder of previous studies. 10 p + appendix. (*Rapport inédit*).

GERSAR-SCET, 1976. - Development of the Lower Euphrates Valley. General Preliminary Project. Vol. A. Present Situation and Basic Improvement Data. Vol. B. Development Programme and Improvement Schemes. General Administration for the Development of the Euphrates Basin. Ministry of the Euphrates Dam. Syrian Arab Republic. 194 p. + 20p. + cartes au 1/50 000 + annexes.

GERSAR-SCET, 1977-1981. - Development of the Lower Euphrates Valley. Technical reports : Zone 1, Zone 2, Zone 3. General Administration for the Development of the Euphrates Basin. Ministry of the Euphrates Dam. Syrian Arab Republic. 250 p + 247 p + 259 p + Cartes au 1/25 000 et au l/50 000 + annexes.

GERSAR-SCET, 1987. - Development of the Lower Euphrates Valley. Irrigation and Drainage Project. Zone 1. Sectors 3, 5, 7. Detailed Design. Detailed Soil Survey. R2A Text, R2B Land Reclamation. General Organization for Land Development. Ministry of Irrigation. Syrian Arab Republic. 145 p. + 116 p. + 128 p. + 55 p. + cartes au 1/5 000 + annexes.

MÉTRAL (F.), 1987. - Périmètres irrigués d'État sur l'Euphrate Syrien : Modèles de gestion et politique agricole. L'homme et l'eau en Méditerranée et au Proche-Orient. T. IV. L'eau dans l'Agriculture. Maison de l'Orient : 111-145.

PARROT (A.), 1974. - Mari, Capitale fabuleuse. Payot, 217 p.

PLANCHON (O.), 1983. - Contribution à l'étude méthodologique des tests de lessivage des sols salés. Application aux sols de la Basse Vallée de l'Euphrate (Syrie). Ensa Montpellier, BRL (Compagnie nationale d'aménagement de la région du Bas-Rhone-Languedoc) Nîmes. 72 p + annexes.

TAHER (M.R.M.), 1987. - L'évolution de la salinité sur sol cultivé par irrigation. Périmètre de la Basse Vallée de l'Euphrate (Syrie). Thèse 3e cycle. Université de Paris.

TARDY (Y.) et DOSSO (M.), 1976. - Composition chimique des eaux de la Basse Vallée de l'Euphrate. Programme de simulation de l'évolution de la composition chimique d'un système minéraux-solution par dissolution ou par évaporation. Rapport Gersar *inédit*, 64 p.

Georges SERPANTIÉ,
Laurent TEZENAS DU MONTCEL,
Christian VALENTIN

La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien

Conséquences et propositions

INTRODUCTION

Ce document traite des résultats de recherche d'une équipe interdisciplinaire, attachée à la compréhension de la dynamique des systèmes agropastoraux soudano-sahéliens. Une étude de cas a été réalisée sur le territoire agropastoral de Bidi (400 km²), village du Nord-Yatenga, province du Burkina Faso.

Cet espace doit ses principaux caractères à 3 processus :

- une dynamique ancienne qui a produit les grands traits du paysage géomorphologique, les propriétés du réseau hydrographique et des sols ;
- une dynamique récente à partir de laquelle s'est mis en place un écosystème particulier sous un climat soudano-sahélien et des systèmes d'exploitation faiblement prédateurs. Jusqu'en 1950 environ, cet écosystème paraît équilibré ;
- une dynamique actuelle sous un climat plus aride et une pression anthropique très forte qui remet en cause cet écosystème et qui conduit à en modifier profondément les caractères : disparition de la grande faune, diminution des réserves aquifères, dégradation du couvert végétal et modification de la flore, transformation des sols en profondeur comme en surface et accroissement des ruissellements.

Selon la plupart des auteurs qui ont étudié les processus de désertification, (BOUDET, 1972 ; CHARNEY *et al.*, 1975 ; BARRY *et al.*, 1983), l'évolution des états de surface serait à la fois la conséquence et le facteur de l'évolution, principalement par le biais des fonctions d'échange entre l'atmosphère et le sol. La modification des échanges énergétiques (changement de l'albédo) joue un rôle minime à l'échelle du territoire que l'on étudie, alors que la modification des échanges d'eau conditionne la végétation, la faune et la chimie du sol, ainsi que la recharge des aquifères profonds, c'est-à-dire l'ensemble des ressources que l'homme ou l'animal domestique utilisent. En changeant de régime, l'eau participe aussi à la modification de l'état de surface du sol par les processus de réorganisation superficielle, d'érosion et de sédimentation. Les caractères de rugosité liés à la végétation, influent quant à eux sur le régime du vent et ses conséquences sur l'érosion éolienne et sur l'évaporation.

La connaissance des processus d'évolution des états de surface apparaît donc de première importance si l'on veut approcher la dynamique des ressources. Selon CASENAVE et VALENTIN (1988), le terme «état de surface» peut désigner une seule «surface élémentaire», la juxtaposition de plusieurs d'entre elles ou un système de surfaces élémentaires, à savoir un ensemble au sein duquel jouent des interactions. La surface

élémentaire se définit, à un instant donné, par un ensemble homogène constitué par le couvert végétal, la surface du sol, les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques et anthropiques. Ces organisations comprennent notamment les croûtes de surface. Pour les identifier, nous ferons appel à la typologie proposée par ces auteurs :

- croûtes de dessiccation ; elles se caractérisent par l'affleurement d'un microhorizon sableux, légèrement pris en masse, très fragile, qui peut atteindre plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur ;
- croûtes structurales ; développées sur des sols sableux, elles présentent 2 ou 3 microhorizons à porosité vésiculaire : à la base une pellicule constituée d'éléments fins («pellicule plasmique»), couverte de 1 ou 2 microhorizons sableux. Sur des sols limoneux, ou argileux, les croûtes structurales ne sont constituées que d'une pellicule rugueuse ;
- croûtes grossières ; analogues aux croûtes structurales sur sable elles en diffèrent par la présence en surface de 40 % d'éléments grossiers, pour la plupart inclus dans les 3 microhorizons ;
- croûtes d'érosion ; formées d'une seule pellicule fine, lisse et dure, elles peuvent se développer, selon l'intensité des processus d'érosion sur les horizons A, B ou B gravillonnaire ;
- croûtes de ruissellement ; elles se composent de microhorizons sableux, voire gravillonnaires, peu triés, qui alternent avec de minces pellicules plasmiques ;
- croûtes de décantation ; le tri granulométrique qui préside à la formation de ces croûtes est conforme à la sédimentation ; les éléments grossiers se trouvent à la base, les éléments fins au sommet. Ceux-ci constituent souvent des plaquettes plus ou moins rebroussées.

À partir de la description des états de surface passés et actuels, de l'analyse de leur répartition dans le paysage et des facteurs d'évolution, nous voulons rendre compte d'une dynamique, à savoir une évolution et les processus qui l'expliquent.

Dans un premier temps, nous essayerons de dégager les facteurs *a priori* susceptibles d'avoir provoqué cette évolution à l'échelle du territoire agropastoral.

Dans un deuxième temps, nous étudierons les diverses formations des zones du haut versant, rarement cultivées. Par «formation», nous entendrons l'ensemble constitué par un terrain (le sol et sa position topographique), par l'état de surface et par le type de végétation.

Ensuite, nous nous placerons dans les bas versants, facettes du paysage les plus touchées par les activités agricoles.

Enfin, nous discuterons du rôle que peuvent tenir ces résultats dans la recherche d'un nouvel équilibre entre l'homme et un milieu soudano-sahélien qui donne des signes d'aridification.

FACTEURS ET CONDITIONS DE LA DÉGRADATION

Le relief et les sols

La région d'étude est située au centre d'une étendue granitique, qui raccorde en pente douce le massif de collines et de tables cuirassées de Koumbri (roches vertes et schistes, au sud-est) à la plaine du Gondo, dépression subsidente remplie par des matériaux détritiques (sables et argiles du continental terminal, au nord-ouest). Cette plaine est traversée d'est en ouest par les formations dunaires arasées de l'Erg ancien.

L'ensemble a été marqué depuis l'ère tertiaire par plusieurs phases alternées d'altération et de cuirassement sous des climats chauds et humides, d'entailles et de mouvements tectoniques de fracturation (BOULET, 1968). Le paysage qui en résulte, pour la zone granitique, est légèrement ondulé. L'armature du relief provient des lambeaux de cuirasse, plus ou moins étendus, dont l'épaisseur et la dureté sont en grande partie liées à la composition minéralogique des roches mères. Des dépôts éoliens ont ennoyé les versants, à l'époque de l'Erg ancien, sur des épaisseurs qui peuvent excéder 2 m. Les glacis sont marqués par l'existence d'une carapace qui a été entaillée par endroits au niveau du réseau hydrographique principal.

Très schématiquement, 4 facettes du paysage peuvent être identifiées au sein d'une demi-ondulation considérée comme unité de modelé. Se succèdent, de l'amont en aval de la toposéquence, longue de 2 km environ pour 30 m de dénivelée soit 1 à 2 % de pente (fig. 1) :

- les sommets d'interfluves. Ils sont liés à une cuirasse qui, lorsqu'elle s'est maintenue peut donner lieu à une «pseudo-cuesta», avec talus et revers. Cette cuirasse peut aussi avoir été érodée et ne subsister que sous la forme de quelques nodules ferrugineux relictuels ;
- le haut versant, où les cuirasses, à très faible pente, sont recouvertes d'horizons peu épais très souvent hydromorphes (bowés). La cuirasse peut disparaître, en délimitant alors une zone où se développent directement sur l'altérite des sols peu évolués d'érosion. Vers l'aval, ces anciennes cuirasses se raccordent fréquemment aux carapaces de versant ;
- les sols du bas versant concave. Ils présentent systématiquement une induration (carapace), sauf dans les sites d'affleurement du granite sain. D'épaisseur variable, ces sols ferrugineux plus ou moins hydromorphes, voient la texture de l'horizon superficiel, d'abord sableux (*binsgou*, en moré), s'enrichir vers l'aval et dans les drains secondaires en argile et en limons (sol *daglé*) ;
- les bas-fonds, temporairement inondés, comprennent une pente de raccord convexe et forte (2 à 3 %), ou chanfrein, qui relie au bas versant une aire alluviale encaissée.

En raison de l'affaiblissement de la végétation qui stabilisait le profil d'érosion, 2 facettes apparaissent aujourd'hui particulièrement sensibles à l'érosion hydrique :

- la partie convexe des pentes située à l'aval des zones cuirassées productrices de forts ruissellements diffus ou concentrés. Mais ce sont les terrains sans induration ferrugineuse qui présentent la vulnérabilité la plus élevée, d'autant que leurs horizons superficiels, directement dérivés des altérites, se caractérisent par une forte instabilité structurale ;
- le chanfrein, du fait de ses pentes relativement fortes à profil convexe.

Par ailleurs, l'érosion éolienne doit se faire plus particulièrement sentir sur :

- les zones sableuses en situation de col, entre 2 croupes cuirassées, où l'on constate l'accélération du vent ;
- les chanfreins et bas versants sableux les plus exposés aux vents d'est (harmattan et rafales d'orages).

Le climat

L'histoire ancienne du Yatenga, telle qu'elle est transmise par la tradition orale mossi, nous enseigne que des sécheresses de plusieurs années ont provoqué des famines, mais ces périodes, semble-t-il, n'ont pas excédé la dizaine d'années pour l'ensemble du siècle dernier. Au XXe siècle, la longue série pluviométrique disponible

Zones	H.V.	Sommets		Haut versant		Bas versant		Bas-fond			B.V.
Sous-Zones	Bowés	Cuirasse sommitale	Talus	sans induration	induration	Mi-versant non hydromorphe	Bas versant hydromorphe	Ch.	Bas-fond	Chanfrein	
Sols	Lithosols et sols peu épais SL		gravillon	sol squelettique arène gravill.	sol peu épais sableux	sableux	sableux à sablo-argileux Colluvio-éolien	SA à A	LA	SA à argileux tronqué	
Végétation	Steppes herbeuses et fourrés *Pterocarpus*, combretacées		fourrés combretacées	Brousse tigrée et steppes combretacées	Steppes herbeuses à fourrés combretacées *Pterocarpus*	Jachères (savane arbustive) combretacées *Guiera*	Jachères (savane arbustive) Parc soudano-sahélien *Guiera et Piliostigma*		savane boisée Parc soudanien *Piliostigma*	Steppe *Balanites* Acacias	
Utilisation du sol	Parcours		Parcours	Parcours	Parcours et Mil	Mil	Mil et arachide, habitat	jardins	Sorgho, riz vergers	Routes, mil, habitats	

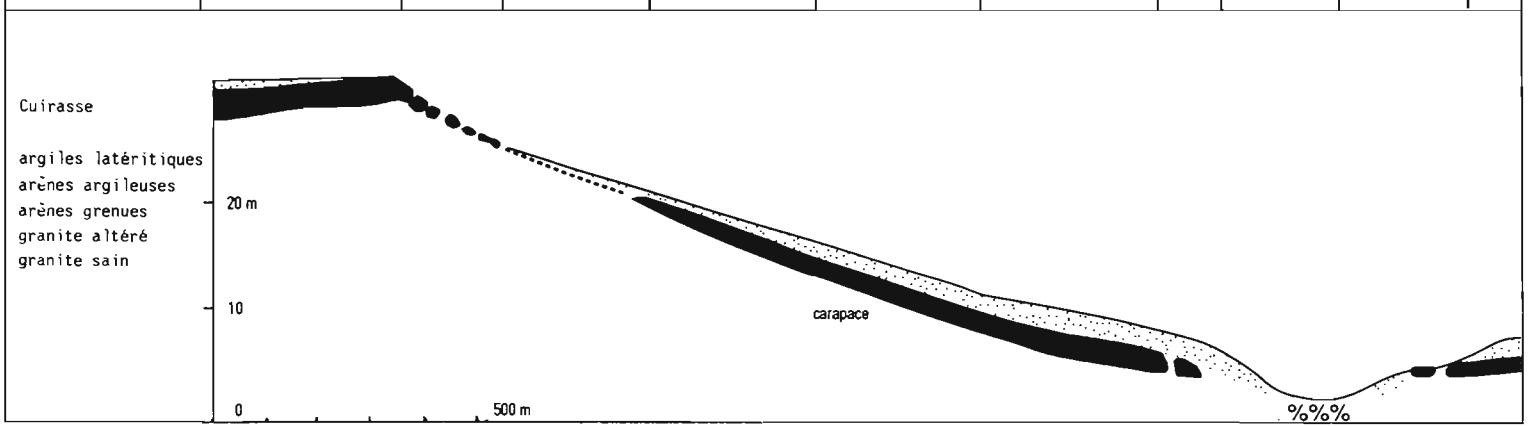


Figure 1 - *Shéma de la toposéquence Boulin-Basnere*

à Ouahigouya indique une période sèche entre 1910 et 1925. En revanche, la sécheresse africaine de 1947 s'est peu fait sentir au Yatenga. De 1930 à 1970, une moyenne mobile sur un pas de quinze ans donne un niveau pluviométrique régulier de 750 mm pour Ouahigouya, ce qui le rapproche nettement du domaine nord-soudanien. Cela correspond pour Bidi, situé à 40 km au nord, à 725 mm environ. Cette valeur est la donnée climatique à laquelle nous nous référons pour situer l'écosystème caractérisé, durant les années cinquante, par l'existence d'une savane arbustive et de sa faune habituelle.

Les années 1968-69 marquent une rupture climatique selon SNIJDERS (1985), HUBERT et CARBONNEL (1986) et ALBERGEL (1987). Dans l'aire soudano-sahélienne burkinabe, la série pluviométrique postérieure à 1968 indique non seulement une réduction de l'ordre de 200 mm (fig. 2) mais aussi une plus grande variabilité spatio-temporelle. Les dernières années présentent même une aggravation de cette aridification : la moyenne des années 1983-1987 n'est que de 375 mm à Bidi. La principale évolution est la diminution de la pluviosité d'août, ce qui confère au nouveau profil pluviométrique moyen une allure plus plate et symétrique, et réduit la fréquence de l'excédent habituel du bilan hydrique P - ETP d'août (fig. 2). Il ne s'agit pas d'une «sahélisation», car le climat sahélien (type Dori) est caractérisé par une durée plus courte de la saison des pluies et donc un profil plus «pointu» à pluviosité égale.

En conséquence, les réserves en eau du sol ont, en fréquence, une plus grande difficulté à se recharger en août. En outre, il y a eu diminution de la pluviométrie en juillet et en septembre. On peut prévoir, selon les travaux de GROUZIS (1987) une faible productivité de la strate herbacée et des retards phénologiques chez certains ligneux en début de cycle.

Une autre évolution porte sur la raréfaction des pluies de plus de 40 mm (HUBERT et CARBONNEL, 1986) ; or, elles contribuent à l'installation du peuplement herbacé dans la mesure où elles permettent l'humectation du sol sur une profondeur importante. La remontée nocturne de cette humidité profonde favorise la germination et la levée des plantules (PENNING DE VRIES et DJITEYE, 1982). En revanche, pour des hauteurs de pluie inférieures, l'eau ne pénètre que dans les tout premiers centimètres du sol et elle se trouve rapidement reprise par l'évaporation.

Il faut signaler que ni la hauteur maximale de pluie journalière de fréquence décennale ni l'érosivité des pluies n'ont subi de modification au cours de cette période (ALBERGEL, 1987). Quant aux autres paramètres, il convient de noter l'augmentation de la fréquence des «tornades sèches», vents de poussières de début de saison des pluies, qui contribuent pour une bonne part à l'érosion éolienne.

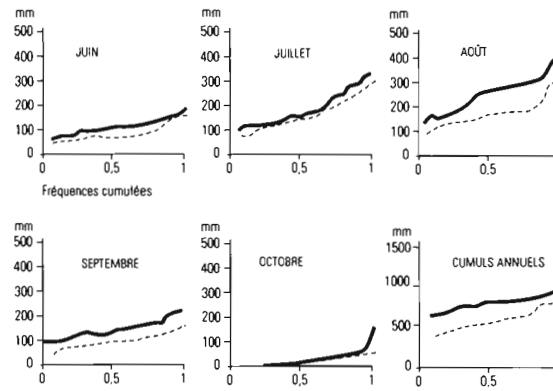


FIGURE 2 - *Probabilité de non-dépassement des pluviométries. Phase humide 1950-1967 (▬) et phase sèche* d'après *AGHRYMET, 1968-1985 (- - -) à Ouahigouya.*

La diminution de pluviosité se traduira donc directement par l'affaiblissement de la végétation herbacée et de la production ligneuse, en réduisant ainsi la protection du sol à l'égard des pluies et du vent.

Enfin, l'appauvrissement des nappes aquifères, constaté dans toute la région, posera le problème de la survie des arbres en saison sèche.

L'évolution des systèmes de production

AVANT LE XXe SIÈCLE

Selon la tradition orale et les documents disponibles (IZARD, 1985 ; MERSADIER, 1986), la région de Bidi aurait été peu peuplée du XVIIe au XIXe siècle. Il s'agit d'une zone frontalière entre le Fulgo, domaine peul au nord, et le Yatenga, royaume mossi ; c'est un espace de transhumance peul où subsistent des vestiges dogon et kurumba d'un très ancien peuplement du XVe siècle. Ce faible peuplement pourrait être imputé à la relative insécurité qui y régnait. Le peuplement sédentaire commence au début du siècle, avec l'installation d'un quartier rimaïbé de captifs affranchis , rejoints par des familles d'artisans et de paysans mossi, venus du Centre-Yatenga saturé, et de campements d'éleveurs peul transhumants (SERPANTIÉ *et al.*, 1987)

JUSQU'EN 1960

Bidi, qui remplit la fonction de grenier à mil de la chefferie mossi de Ouahigouya, est également un village producteur de coton grâce à son bas-fond. La grande extension des sols du bas versant, peu exploités au siècle dernier, sablo-argileux, filtrants et pourvus d'une assez bonne capacité de rétention, permet en effet de réaliser des rendements élevés de mil (de l'ordre de 1 $t.ha^{-1}$). Le mode d'exploitation est dualiste : près du village, culture permanente avec parcage des troupeaux peul en saison sèche. En «brousse», sur les sols les plus productifs, des groupes de champs temporaires, protégés par une clôture, sont cultivés durant cinq ans environ, puis abandonnés pendant de très longues périodes (plus de vingt ans). Les savanes arbustives qui se forment sur ces jachères sont alors couvertes de graminées pérennes. Leur exploitation pastorale en saison sèche utilise le feu pour stimuler la repousse. Pour une même population qu'aujourd'hui, 3 500 habitants environ, les photographies aériennes de 1952 ne font pas apparaître de champs sur les sols de haut versant. On a alors environ 0,3 ha cultivé par habitant (cultures et jachères récentes). En saison humide, les troupeaux quittent le territoire de Bidi vers les zones pastorales du Gondo, ou les pâturages de «cure salée» de Yuba, au sud.

Alors que certains quartiers ne cultivent le mil que pour leur consommation (forgerons, chefferie, Peul), d'autres, qui n'ont pas accès au bas-fond, terrain où vient le cotonnier, accroissent les superficies en mil (migrants mossi et silmimossi). Leur but est de dégager des surplus commercialisables. Cette stratégie ne se traduit pas par une modification des techniques ; il s'agit d'une extension des superficies par la mise en culture des terrains fragiles et d'un début de raccourcissement des jachères. Compte tenu de la recolonisation récente du terroir, le système foncier qui se met en place est flou, en particulier pour les terrains éloignés du village ou ceux du haut versant, qui sont le plus souvent exploités par des paysans à partir d'un prêt temporaire.

La fin des années soixante

Il faut attendre cette époque pour voir apparaître la charrue attelée et l'engrais chimique qui sont utilisés principalement par les paysans aisés pour pallier les problèmes que posent l'enherbement précoce des champs et la réduction de la durée de jachère. Le labour constitue un premier sarclage qui nécessite peu de main-d'œuvre, ce qui résorbe un goulot d'étranglement majeur du calendrier de travail. Le sarclage attelé ne s'est pas répandu, sans doute à cause d'une inadaptation des outils disponibles et de la difficulté d'adoption du semis en ligne, mais peut-être aussi pour des raisons plus culturelles : incompatibilité traditionnelle entre les bovins et les cultures avant la récolte (alors qu'à l'inverse, il existe des contrats de parcage des troupeaux dans les champs en saison sèche) et inadaptation du mode de vulgarisation choisi par les intervenants extérieurs (vulgarisation individuelle).

Les années soixante-dix

Après les premières sécheresses, on assiste à une modification des rapports entre agriculteurs et éleveurs et les contrats d'interdépendance (confiage, fumure, assistance) se raréfient. En corollaire, les agriculteurs enrichis ont constitué leur cheptel en profitant des premières sécheresses pour acheter du bétail bon marché. On atteint, en 1984, 0,3 UBT (unité bétail tropical) par habitant, et les résidus de céréales sont récoltés en vue de l'affouragement de saison chaude. Il s'agit essentiellement des résidus du sorgho de bas-fond qui a peu à peu remplacé le coton, gêné par l'apparition du troupeau sédentaire divagant et celle de la sécheresse, mais aussi, de plus en plus, des résidus du mil des champs de village. En fin des années soixante-dix, on constate une augmentation des départs de migrants vers le sud-ouest du Burkina Faso et en Côte-d'Ivoire.

Les années quatre-vingt

En 1984, on atteint 0,8 ha cultivé par personne en moyenne. Ceux qui dégageaient des surplus dans les années soixante cultivent plus de 1 ha par personne. Cette logique de surplus a disparu tandis que les superficies se sont maintenues. L'une des raisons de ce maintien est la diminution des rendements dus, dans un premier temps, à l'appauvrissement des sols et à la mise en culture de sols médiocres, puis, à partir de 1968, à la diminution des récoltes et des réserves du fait de la sécheresse. Pour les autres quartiers, l'accroissement de la surface cultivée n'a pas suffit. Les revenus des migrations et les activités secondaires permettent leurs achats de vivres.

En 1984, une sécheresse exceptionnelle provoque le départ de nombreux éleveurs, ce qui laisse vacantes bon nombre de terres et ne diminue la charge pastorale que temporairement à cause de la croissance rapide du troupeau caprin, multiplié par 3 entre 1984 et 1987.

Pendant cette période, on assiste au développement en saison sèche des travaux de préparation des champs. Il s'agit de remettre en culture des zones encroûtées et érodées par un piochage et une fumure localisés du sol (*zaï*) et d'aménager dans les champs des obstacles au ruissellement. Aux diguettes en terre, introduites par l'Organisme régional de développement en 1980, les paysans semblent préférer des aménagements isohypses perméables en pierres et en branchages, introduits par des conseillers agricoles, qu'ils réalisent de façon totalement autonome depuis 1986. Cette

préférence est à relier à la très mauvaise répartition des ruissellements provoquée par des obstacles imperméables. Ces pratiques sont peut-être des signes de l'abandon progressif de l'agriculture minière que l'on connaît depuis les années soixante.

D'autres indices de changement apparaissent, comme l'acceptation de travaux de valorisation de la matière organique (fosses fumières) et la volonté d'équipement du village en matières hydraulique, de santé et de sécurité alimentaire. Le village construit une école et développe son marché, les organisations de producteurs se multiplient.

Les conséquences *a priori* de l'évolution du système de production peuvent donc se résumer ainsi :

- jusqu'en 1950, le système d'exploitation du milieu reste peu prédateur, sinon de façon très locale : mise en culture de sols fragiles près des concessions (zone du chanfrein), couloirs de déplacement du bétail, chemins ;
- entre 1960 et 1980, l'accroissement du cheptel sédentaire divagant et la mise en culture des zones fragiles ont pu intensifier les phénomènes de «dévégétalisation», d'érosion hydrique et de déflation éolienne sur un rayon de 2 km environ autour des habitations, en créant ainsi une «auréole de dégradation» ;
- dans les années quatre-vingt, le triplement du cheptel caprin constitue une menace pour la régénération et la croissance des ligneux non épineux. L'enlèvement des résidus de récolte dans les champs peut réduire leur résistance à la déflation éolienne, augmenter leur sensibilité à l'encroûtement, raréfier la mésofaune. Ainsi, cette pratique contribue indirectement à modifier le fonctionnement hydrique des sols. En outre, le travail du sol en mauvaises conditions, l'allongement des durées de mise en culture, avec comme corollaire la réduction de la jachère, augmentent la tendance à l'érosion (ROOSE, 1981) et l'appauvrissement des sols et de la strate arbustive.

Conclusion sur les facteurs d'évolution

Ce recensement des facteurs possibles d'évolution nous conduit à prévoir une dégradation importante du milieu d'origine. De 1952 à 1984, la comparaison de l'occupation du sol sur le territoire cultivé de Bidi (espace qui englobe à la fois les champs et les jachères) le confirme : en 32 ans, le quart de la surface, qui a subi une disparition totale de ses ligneux, n'est plus cultivé (tabl. I).

Ces données ne font pas apparaître, toutefois, la disparité très marquée des états de surface selon leur situation dans le paysage.

Tableau I - Évolution de l'occupation du sol sur le terroir de Bidi en (en pourcentage de la superficie totale de 7 825 ha)

Année	Cultures et jachères récentes	Jachères anciennes	Zones sans végétation ligneuse	Végétation dense
1952	14	17	2	67
1984	34	18	26	22
Différence (en ha)	+ 1 560	+ 120	+ 1 870	- 3 550

Méthode d'analyse de l'évolution des états de surface dans le paysage

Après avoir choisi des unités pertinentes, en faisant varier le type de toposéquence ou la distance au village, nous nous appuyons sur 4 séries de données complémentaires :

- des observations de terrain : descriptions de transects (sols, états de surface, végétation), cartographies d'états de surface renouvelées sur parcelles, «tours de plaine» lors des événements à caractère érosif marqué (orages, coups de vent), suivis de stations. Celles-ci font l'objet de relevés floristiques, de comptages de ligneux, de suivis de la biomasse et de la phénologie ;
- des expérimentations d'aménagements avec répétitions, témoin et suivi pluriannuel ;
- des interprétations de photographies aériennes à 1/50 000 (1952), à 1/20 000 (1984) et d'images satellitaires Spot (1987) ;
- des interrogations de la mémoire collective au travers d'entretiens avec les anciens du village.

Il s'agit de réaliser une confrontation de ces sources d'information entre elles et avec les facteurs supposés de l'évolution. Ces données sont de qualité inégale. La principale difficulté de la photo-interprétation provient des conditions de prise de vue. Les agrandissements de la série de 1984 sont beaucoup plus contrastés et de meilleure résolution que ceux du document de 1952. L'année 1952 a été marquée par une bonne saison des pluies. À l'inverse, l'année 1984 a connu la pluviométrie centennale sèche, d'où la très faible extension du couvert herbacé. Enfin, il faut prendre en compte les différentes saisons de prise de vue, décembre 1952 et septembre 1984. On peut, malgré ces difficultés, utiliser ces documents pour l'interprétation du couvert ligneux et de l'occupation du sol. Enfin, la mémoire des anciens n'est pas infaillible et la réalité des problèmes vécus actuellement provoque une idéalisation du passé dans les discours, d'où de fréquentes contradictions entre les témoignages. Nous utilisons avec prudence ces informations, une fois recoupées, à titre complémentaire.

LA DYNAMIQUE DES ÉTATS DE SURFACE DES SOMMETS ET DES HAUTS VERSANTS

Les sommets cuirassés

Ces zones n'ont jamais été cultivées. En 1952, les états de surface correspondent à une savane arbustive homogène piquetée d'arbustes (*Pterocarpus lucens* ou *Combretum glutinosum*). En photo-interprétation, on lui donnera le nom de «brousse mouchetée». On distingue 2 types de taches : sombres, elles indiquent la présence de fourrés ; claires, il s'agit de termitières dont la surface, couverte d'une croûte argilo-limoneuse, très dure et quasi imperméable (croûte d'érosion), se repère aisément sur les photographies. Ces taches claires s'élargissent aux abords immédiats des voies de communication et des champs de village ou de brousse. En 1984, ces états de surface se répartissent en 2 groupes en fonction de la distance aux habitations.

Les états de surface à proximité du village

La végétation arbustive n'a trouvé refuge (sur 5 % de la surface) que dans des fourrés denses, à limites circulaires, qui doivent leur existence à une situation privilégiée

(accidents localisés de la cuirasse). Par ailleurs, la relative fermeture de ces couverts denses les protège d'une exploitation abusive, de même que la situation hydrique favorable améliore la résistance aux prédations.

Dans les petites dépressions, où subsistent des plages d'horizon A encroûté (croûte structurale), un tapis de petites graminées vivaces (*Sporobolus festivus*) peut se maintenir, parfois associé à un arbuste polycaule rabougri (*Combretum micranthum* ou *Guiera senegalensis*), ou à un tronc encore vivant (*Pterocarpus lucens*). Alors qu'en 1952, on pouvait compter une cinquantaine de couronnes de ces grands arbustes par hectare, on ne retrouve en 1984 qu'une vingtaine de troncs morts et une dizaine de survivants dont la couronne est réduite à quelques branches. La dégradation du bilan hydrique des sols, encroûtés et érodés, ainsi que la surexploitation par émondage sont les causes de cette mortalité. L'abondance de bois mort paraît avoir découragé les habitants d'en débiter les troncs. Il n'y a pas de jeunes pieds.

De nombreux autres indices attestent de la sévérité de la dégradation des états de surface à proximité du village : sur 95 % de la surface, les horizons superficiels, qui ont été décapés, laissent désormais affleurer les horizons B gravillonnaires. Cette surface présente un encroûtement quasi général : croûtes grossières et croûtes d'érosion d'horizon B. Dépourvue de végétation, cette surface subit une érosion laminaire intense comme en témoigne l'abondance de souches déchaussées, de figures «en piédestal», et de «marches d'escalier». S'y ajoutent des symptômes d'érosion linéaire, sous la forme de petites griffes. Celles-ci apparaissent à la faveur d'obstacles (termitières, chemins, placages sableux, bourrelets gravillonnaires) qui concentrent les eaux de ruissellement.

Cette facette sommitale, très dégradée, pose 2 problèmes majeurs : la production d'un ruissellement intense, dû aux croûtes grossières et d'érosion, et l'absence de production biologique dans un espace proche du village.

DANS LES ZONES PLUS ÉLOIGNÉES DES HABITATIONS ET DES CHAMPS

Les états de surface actuels, à couvert arbustif, diffèrent peu de ceux de 1952, si ce n'est par l'accentuation du contraste entre les taches noires (fourrés) et le fond très clair des zones arbustives. En 1952, le contraste par rapport aux taches de termitières montre qu'une strate herbacée continue recouvrait le faciès. De nos jours, le sol, le plus souvent nu, subit des processus d'érosion plus marqués que par le passé comme l'attestent les déchaussements et l'affleurement fréquent des horizons B gravillonnaires. La mortalité de *Pterocarpus lucens*, qui est très variable, atteint parfois 100 %. Il faut prendre en compte la faible capacité en eau des sols, à induration peu profonde ou gravillonnaires, l'assèchement des altérites sous-jacentes, l'existence de sécheresses successives, ou une pression d'émondage locale près des chemins à bétail.

EN CONCLUSION

Les formations des sommets cuirassés n'ont qu'une faible capacité de résistance à une exploitation sylvo-pastorale intense en situation de sécheresse. Là où elles sont dégradées, et suite à la disparition des horizons superficiels du sol, il paraît illusoire d'envisager leur réhabilitation avec les moyens d'action villageois, malgré l'utilité d'une telle entreprise.

Le haut versant : brousse mouchetée, brousse tigrée, savanes herbeuses sur bowés

La fonction de cette facette paysagique est essentiellement pastorale. Mais elle se caractérise par un sol suffisamment profond pour porter une végétation dense et pour que l'on soit tenté de le mettre en culture. Il peut s'y manifester une érosion éolienne des éclaircies de la couverture végétale si le sol est sableux et le piétinement important.

Les brousses mouchetées

Il convient de distinguer celles qui ont été cultivées de celles qui sont restées naturelles.

À l'état naturel, ces brousses mouchetées recouvrent des sols indurés peu profonds. Leur état actuel est très similaire à celui décrit pour les sommets cuirassés. La différence la plus notable réside dans l'existence de dépôts de sables éoliens dans l'espace qui sépare les fourrés, à la faveur d'obstacles divers : débris végétaux, lianes rampantes (*Leptadenia hastata*), buissons polycaules (*Guiera senegalensis*). Ces microbuttes sableuses contrastent fortement avec les zones érodées et gravillonnaires qui apparaissent sombres sur les photographies. Généralement enherbés, ces placages sans croûte ou à simple pellicule de dessication, présentent une forte infiltrabilité et des conditions favorables aux jeunes pousses arbustives. À l'inverse, sur les taches nues, les croûtes grossières ou d'érosion produisent un fort ruissellement.

Afin de connaître la possibilité d'une restauration partielle de ces formations, nous avons réalisé des essais d'aménagement du ruissellement. Dans l'auréole de divagation du bétail (à moins de 2 km du village), 2 sites ont été pourvus d'un essai en 1984. Chaque site était caractérisé par un état de surface très dégradé où affleurait par taches l'horizon gravillonnaire. Il comprenait une parcelle pourvue de 4 cordons pierreux isohypses espacés de 20 m sur 50 m de long, et une parcelle témoin non traitée, sans mise en défens. Dans la parcelle traitée de chaque essai, s'est reconstituée en quatre ans une bande enherbée de 3 m de large en moyenne, grâce à l'amélioration de l'infiltration, au piégeage de graines, de sables éoliens et de sédiments délaissés par les eaux de ruissellement en amont des cordons. La bande issue de sables éoliens (1 m de large) porte un couvert dense de *Schoenefeldia gracilis*, très riche en repousses arbustives (*Guiera senegalensis, Combretum micranthum*). La zone de décantation qui remonte dans les microdépressions (0 à 10 m de large) porte un couvert lâche de petites graminées (*Microchloa indica*). La scarification du sol effectuée sur une partie des essais en 1984 a permis d'accroître l'aire à *Schoenefeldia*, qui occupe alors toute la surface travaillée. Les zones gravillonnaires en relief restent nues, de même que la totalité des parcelles témoin : l'amélioration de la pluviosité enregistrée depuis 1984 n'a donc pas révélé de capacités de restauration autonomes. Sous le climat actuel et sous une pression de pâture très forte, la reconstitution partielle d'une végétation est donc possible en exploitant les transferts par l'eau et par le vent, et en recherchant une structure «en bandes alternées».

Là où ces zones ont été mises en culture, dans les années soixante, durant la phase d'expansion des surfaces cultivées, le sol apparaît aujourd'hui totalement nu, couvert de croûtes d'érosion d'horizon A, d'horizon B ou d'horizon gravillonnaire. Cette dégradation peut être imputée d'une part aux reprises éoliennes sous pâturage de saison

sèche, d'autre part à l'érosion laminaire engendrée par le ruissellement issu des sommets dégradés. Dans les dépressions topographiques, les nombreuses repousses arbustives ont favorisé le dépôt de sédiments, tout en profitant des ruissellements accrus, ce qui explique l'existence de quelques «jachères» en bon état apparent. Une croûte de décantation tend néanmoins à couvrir l'horizon de surface, ce qui nuit à l'infiltration et aux germinations et limite la productivité de la strate herbacée. Sur les lambeaux de champs encore cultivés, alternent des placages sableux à croûte structurale et des zones décapées à croûte d'érosion.

Depuis 1984, face à cette forme de dégradation, un paysan a réagi en édifiant une succession de cordons isohypses imperméables, mais très solides, obtenus par le colmatage de cordons pierreux. L'objectif est de constituer ainsi des terrasses qui permettent de conserver la fumure et d'augmenter localement l'épaisseur des horizons cultivables devenus très fins. En aval du cordon, le sol se couvre d'une croûte d'érosion et sert d'impluvium à la bande cultivée suivante ; les rendements sont alors très variables, nuls en cas de sécheresse prolongée, vu l'abondance de fumier et la faible capacité en eau de ces sols, moyens les «bonnes» années (2 à 4 $q.ha^{-1}$). Le risque est de provoquer une érosion linéaire accrue car ces diguettes collectent l'eau en excès vers de petits exutoires. Le cloisonnement du système devrait résoudre ce problème. De nombreux essais de labour de ces sols décapés devenus imperméables ont aussi eu lieu depuis 1975 comme en témoignent les fonds de labour mis à jour par l'érosion qui parsèment cette unité. Dans les zones très érodées mais conservées pour la culture, les paysans piègent les sables éoliens par des cavités creusées en saison sèche (*zaï*) ou par une couverture de résidus végétaux ou de fumier.

LES BROUSSES TIGRÉES

Le terme «brousse tigrée» désigne dans son acception la plus globale une structure de végétation bien reconnaissable sur photographies aériennes, caractérisée par l'alternance de bandes arbustives denses et de bandes nues. Une abondante littérature existe à leur sujet (CLOS-ARCEDUC, 1956 ; BOUDET, 1972 ; LEPRUN, 1978 ; AMBOUTA et ICOLE, 1986 ; CORNET *et al.*, 1988). En Afrique de l'Ouest, ces formations végétales s'étendent sur un éventail bioclimatologique nord-sahélien à nord-soudanien. Leur origine édaphique est diverse (existence d'une stratigraphie, de terrains particuliers, d'une pente, de vents dominants et de matériaux éoliens) et mal connue. On cite en général l'abondance des combretacées mais l'absence de marqueurs spécifiques dans la végétation, ainsi que la capacité évolutive de la formation par déplacement lent des bandes sur la pente ou dans le sens du vent.

À Bidi, les brousses tigrées apparaissent sur des pentes de 1 à 3 % ; les bandes suivent à peu près les courbes de niveau. On remarque qu'elles n'existent que sur roche mère granitique ou sur argiles sableuses sédimentaires, et sur un type de terrain particulier : celui des zones du haut versant dépourvues d'induration. Il s'agit d'un sol profond, peu évolué, constitué d'une arène blanchâtre argileuse à kaolinite (argile peu structurante et facilement dispersable dans l'eau) et de gravillons ferrugineux. Ces sols sont donc marqués par une extrême fragilité en surface, mais par de bonnes caractéristiques physiques dès lors que leur surface est protégée de la pluie. Ainsi sous végétation arbustive dense, ils portent une litière, ont une porosité tubulaire importante, un enracinement dense, une humidité profonde. À l'aval des bandes, le début des zones nues est marqué par une croûte d'érosion, des arbres morts (*Pterocarpus lucens*), des bourrelets gravillonaires dus probablement à d'anciennes souches, et quelques *Boscia senegalensis*, arbustes liés à des termitières. Le sol est sec sur une grande profondeur.

Le centre de la bande nue, porte des croûtes grossières ou d'érosion, à porosité vésiculaire. Les fortes pluies n'humectent ce segment que sur quelques décimètres de profondeur. La bande boisée est bordée dans sa partie amont par une zone de colonisation herbacée, précédée par une aire de sédimentation à croûte de décantation. L'humidité est forte sous cette formation herbeuse. Enfin, il n'y a pas de marques d'érosion éolienne.

De ces observations, on peut conclure que le fonctionnement hydrique des bandes ressemble à ceux suggérés par AMBOUTA et ICOLE (1986), au Niger, et par CORNET *et al.* (1988), au Mexique. En l'absence de transferts d'eau horizontaux souterrains du fait de l'absence de discontinuité structurale dans le profil, la bande nue joue le rôle d'impluvium et la bande arbustive celui de bande d'absorption. Ce modèle explique la mort des arbres, la survie des espèces xérophiles et l'érosion en aval de la bande boisée. La bande progresse vers l'amont par érosion en aval, sédimentation et colonisation en amont. Cet écosystème apparaît donc autorégulé, en cas de sécheresse persistante, par la simple modification du rapport entre surfaces nues et boisées.

À Bidi, ce milieu suit 3 modèles d'évolution selon l'intensité de son exploitation.

Forte exploitation agro-sylvo-pastorale

En 1952, aucune brousse tigrée n'avoisine le village sur les sites où l'on devrait la trouver. Ces sites sont nus et ravinés. La dégradation est donc ancienne.

Exploitation moyenne

À 2 km au nord, la brousse tigrée montre déjà des signes de dégradation en 1952 au niveau de voies de communication. Elle disparaît complètement en 1984. Des mises en culture pendant la phase d'expansion des années soixante et soixante-dix laissent aujourd'hui un terrain nu recouvert de croûtes d'érosion, de gravillons accumulés par enrichissement relatif et d'intenses marques d'érosion linéaire. Seuls, rejettent au niveau de termitières quelques arbustes rabougris, *Boscia senegalensis* et *Combretum micranthum*. À l'aval de ces étendues désertes, une végétation ligneuse à présent très dense profite de l'accroissement des eaux de ruissellement et protège en partie le bas versant. En dehors des mises en culture, les bandes ont été disloquées par des couloirs pratiqués par le passage du bétail. Une érosion linéaire s'est amorcée et les pertes en eau se sont accrues. Seuls, quelques bosquets privilégiés par la nouvelle distribution du ruissellement subsistent.

Exploitation faible

Au sud du village existe une zone peu peuplée hors des routes de pâturages. La brousse tigrée apparaît en bon état puisqu'on trouve encore des bandes continues. Un tiers de la surface est occupé par les bosquets contre la moitié en 1952. Sur un site représentatif, le comptage des ligneux de taille supérieure à 10 cm met en évidence leur faible mortalité (5 %), le bon état général (88 %), la densité du couvert des fourrés (2 800 ligneux.ha^{-1}) et le grand nombre de jeunes pousses (pieds de moins de 1 m de haut : 330.ha^{-1}). On y trouve des espèces végétales rares à présent dans le haut versant : *Andropogon gayanus, Feretia apodanthera*. Cette formation n'en a pas moins évolué depuis 1952. La figure 3 illustre :

- l'absence de déplacement perceptible des bandes mais la réduction de leur largeur ;
- la relative fermeture du paysage en 1952 et son ouverture en 1984, après anastomose des plages nues ;
- l'éclaircie des bandes boisées et leur dislocation en bosquets, en particulier sur des lieux de passage ;
- des mises en culture qui laissent le sol nu avec des repousses arbustives éparses.

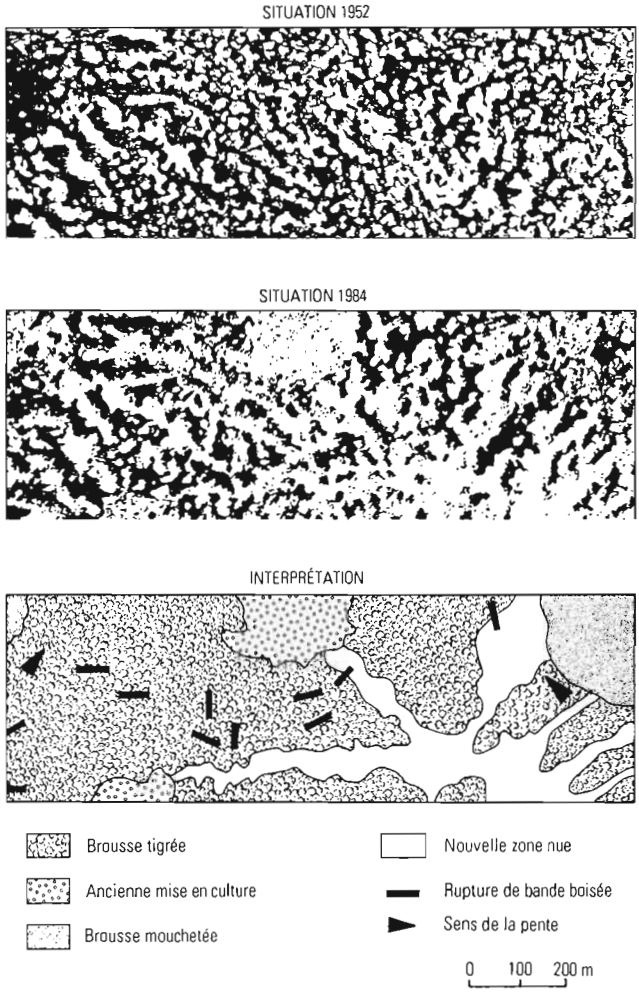


FIGURE 3 -*Évolution de la brousse tigrée de Tilli.*

Alors qu'auparavant la brousse tigrée disposait, dans les zones éloignées du village, de l'atout de sa relative fermeture et de son système structural de régulation en cas de sécheresse durable, son fonctionnement actuel se heurte désormais à 3 obstacles :

- la dislocation de la structure qui provoque des pertes de ruissellement, entraînant une dérégulation du système impluvium/récepteur et donc une aggravation de la mortalité. Il est probable que l'affaiblissement de la végétation dû à la sécheresse facilite la pénétration du cheptel et, à leur suite, des ramasseurs de bois mort ;
- le surpâturage bovin des franges herbeuses de colonisation, d'où l'impossibilité de progression en amont ;
- le surpâturage caprin des jeunes ligneux du sous-bois.

La sécheresse se trouve à l'origine indirecte de cette situation puisqu'elle a incité à l'exploitation par les caprins de la brousse tigrée, protégée auparavant par son accès difficile. Afin de restituer sa capacité de régulation, on peut imaginer de tenter une

refermeture des bandes (lits de branchages) et la mise en repos (limitation de charge), en particulier vis-à-vis des caprins.

Par sa seule structure, cette formation est un exemple d'écosystème adapté à une aridité passagère. Cette propriété la rend utile dans une optique de conservation d'espèces ou de production de bois d'œuvre, mais elle reste très vulnérable si sa structure est perturbée par une action agricole ou pastorale.

Les savanes herbeuses des bowés

Vers le nord du territoire agropastoral, les cuirasses, vastes, planes ou en cuvette, sont recouvertes par un sol sablo-limoneux peu profond (30 cm) à horizon hydromorphe. La végétation est une savane herbeuse, quelques arbustes signalent les axes de drainage. La fonction de ces espaces est le pâturage de saison sèche.

Depuis les années cinquante, la sécheresse et le surpâturage ont entraîné des modifications de la flore (la place de *Loudetia togoensis* a augmenté, les graminées pérennes ont disparu) mais le couvert est resté continu sur la quasi-totalité des surfaces. Ce n'est qu'en bordure de cuvette que le sol reste nu quelle que soit la pluviosité (érosion, encroûtement, absence de stock semencier).

Les années très sèches, comme 1984 (240 mm), le sol reste nu, seules quelques plages d'herbe se concentrent au niveau des cuvettes. Les zones nues sont marquées par des croûtes structurales et d'érosion. Cet encroûtement réduit d'autant plus le bilan hydrique que les pailles de l'année précédente disparaissent vite, broûtées par le bétail ou détruites par les termites moissonneurs. Mais comme dans la brousse tigrée, la nature du sol plus riche en matériaux fins empêche l'érosion éolienne.

La biomasse et les cortèges floristiques ont été suivis sur 3 sites qui présentent le même faciès. Ceci a permis d'observer la réinstallation progressive du tapis herbacé à la faveur d'un accroissement régulier de la pluviométrie.

En 1984, les sites les plus humides, enrichis par des ruissellements exogènes, n'ont porté que des graminées basses (*Tripogon minimus, Microchloa indica*) : les zones restées nues (97 %) étaient parsemées d'une alliacée, *Dipcadi viride* (stade 1).

En 1985, suite à une pluviométrie mieux groupée mais tout aussi faible (310 mm) et à une moindre fréquentation animale, il s'ajoute, au stade 1, *Loudetia togoensis* (80 cm) et quelques légumineuses (*Zornia glochidiata, Cassia mimosoïdes*) qui forment le stade 2. Le stade 1 colonise la périphérie de son ancienne implantation.

En 1986, sous une pluviosité de 460 mm, 2 évolutions sont possibles suivant le régime hydrique. Dans les zones les plus humides à sol hydromorphe, s'ajoutent, au stade 2, une andropogonée de 100 cm (*Andropogon fastigiatus*) et des cypéracées (*Cyperus* spp.) (stade 3a). Sur les sites mieux drainés, apparaissent des groupes d'herbacées diverses, elatinacées, saxifragacées, andropogonées, qui supplantent *Loudetia togoensis* (stade 3b). Les stades 1 et 2 colonisent la périphérie vers les bords de la cuvette cuirassée. La grande extension du tapis herbacé et la biomasse suffisante obtenues à cette étape garantissent une couverture du sol jusqu'aux premières pluies.

En 1987 (518 mm de pluie), le stade 3a s'étend et une andropogonée de 120 cm (*Andropogon pseudapricus*) s'y ajoute (stade 4). Le stade 1 s'étend sur les bords jusqu'à une quasi-disparition du sol nu (0 à 20 %).

Ce résumé de l'évolution structurale et floristique de la végétation des bowés traduit l'évolution des expressions d'un faciès pendant la réinstallation d'une strate herbacée après une année sèche. Lors de celle-ci, la surface du sol s'est encroûtée, détériorant les conditions d'installation. Une pluviosité médiocre sur un tel terrain ne permet pas de retrouver tout de suite le couvert qui précédait l'année sèche. Selon Grouzis (1987), cette réinstallation marque des milieux où le stock semencier n'est pas limitant, mais

où les conditions de germination et de levée ne sont satisfaites qu'en des endroits privilégiés (microdépressions). D'autres observations ponctuelles réalisées à Bidi montrent que dans le processus de réinstallation interviennent aussi des conditions telles que le piétinement et la quantité de biomasse élaborée l'année précédente. La baisse de la pression pastorale de saison humide, suite à l'émigration d'une partie du troupeau bovin en 1984 et à la mauvaise appétabilité des premiers stades de réinstallation, a bien sûr facilité la croissance du couvert et le processus de réenherbement, mais il faut pourtant rappeler le rôle important du piétinement dans la destruction des croûtes, la dissémination et le piégeage des graines, en particulier sur le pourtour des plages herbeuses (effets d'auréole). Enfin, la dégradation de la biomasse en saison sèche est d'autant plus rapide que les plages herbeuses sont réduites et peu fournies (1984-85), mais se ralentit lorsque la strate herbacée est dense et couvre l'ensemble du terrain (1987). Cette dernière situation favorise fortement l'action des termites moissonneurs en début de saison des pluies, ce qui concourt à un état de surface plus favorable à l'infiltration, mais aussi améliore le bilan hydrique de début de cycle en réduisant l'évaporation du sol par effet mulch (cas de 1988).

En conclusion, la faible pente, le sol, peu sensible à l'érosion hydroéolienne, et l'absence d'excès dans le pâturage procurent aux bowés une autorégulation fondée en année sèche sur la contraction de la strate herbacée dans les zones de concentration d'eau. En période humide, elle s'étend à nouveau progressivement et se diversifie. Les agents tels que vent, troupeaux, termites et ruissellement jouent un rôle important dans la réinstallation progressive de la prairie. Seule la bordure de ces cuvettes est dégradée mais elle pourrait donner lieu à une recolonisation lente si les conditions s'amélioraient durablement.

Conclusion sur le haut versant

Le haut versant n'a de capacité réelle à subir une sécheresse prolongée qu'au niveau de formations particulières, qui utilisent soit un mécanisme de concentration d'eau (brousse tigrée, fourrés denses), soit une propriété du terrain : accidents de la cuirasse (talus, anciennes excavations, fractures), pente faible et sol riche en éléments fins (bowés). Près du village, la sécheresse a multiplié les effets des activités agropastorales qui avaient commencé à être réellement destructrices dans les années soixante. Le résultat est un état de surface proche du reg saharien près du village. Les possibilités de restauration sont faibles mais les enjeux sont importants à cause du rôle du haut versant sur la production d'un ruissellement massif et sur le pâturage de saison sèche.

LE BAS VERSANT ET LE BAS-FOND

Caractères généraux

La fonction du bas versant et du bas-fond est essentiellement agricole. Au fur et à mesure que les horizons au-dessus de la carapace s'épaississent, la proportion de champs et de jachères s'accroît.

Les savanes arbustives non cultivées

En 1952, la savane arbustive de bas versant ressemble à celle du haut versant (brousse mouchetée).

En 1984, on ne trouve en bas de versant que de rares témoins de cette savane arbustive :

- ce sont, tout d'abord, à 10 km au sud du village, de véritables parcs de *Pterocarpus lucens* peu ou pas émondés à tapis herbacé continu, qui subsistent dans de petites cuvettes. Ces formations sont de plus en plus défrichées par des campements de culture du village voisin et le bois exporté vers la ville de Ouahigouya. Dans ces situations particulières, ni la sécheresse ni l'élevage n'ont entraîné de dégradation grâce à la situation de ces formations ;
- dans l'auréole de divagation, on trouve des formations ligneuses denses au niveau de petites cuvettes, apparues le long d'anciens axes de drainage barrés par un cordon de sable éolien. Ces cuvettes, ennoyées par une sédimentation limono-argileuse restent souvent inondées plus d'une journée du fait de la très faible infiltration. Dès lors, elles sont peu cultivées et les ligneux sont en bon état. Le tapis herbacé est continu, dense, dénudé par taches au niveau de termitières ou de croûtes de décantation. En 1952, ces taches nues étaient moins importantes et cette brousse différait peu des savanes arbustives non dégradées. Les apports d'eau et de sédiments fins par ruissellement ont augmenté depuis lors et gêné la colonisation herbacée en raison de l'intense dégradation des états de surface des bassins versants et de l'érosion qui y atteint souvent l'horizon B plus argileux. La polygénie des croûtes de décantation atteste de l'importance de la sédimentation. La concentration d'eau a favorisé le développement des ligneux.

Formations cultivées

En dehors de ces formations particulières, l'ensemble des bas versants est cultivé ou l'a été dans le passé proche. 2 cas doivent être distingués, selon que les terrains de bas versant sont peu ou très étendus sur la toposéquence :

- formations peu étendues de bas versant ; ici, il y a déséquilibre entre, d'une part, les formations de haut versant très dégradées, productrices d'un ruissellement intense et qui constituent de longs impluviums, et, d'autre part, la facette de bas de versant, limitée en extension et à sols peu épais. Un exemple typique peut être observé à proximité immédiate du village ; disséqués par les ravines, décapés par le ruissellement en nappe, les lambeaux de champs permanents fournissent l'illustration du déséquilibre apparu depuis 1952. Entre des parcelles restées intactes, une croûte d'érosion recouvre partout l'horizon B ou la carapace affleurante. La dénudation complète du haut versant dans les années soixante, provoquée par la coupe de bois et par l'installation d'un campement d'éleveurs, est bien sûr à l'origine de cette situation. Les paysans ont essayé d'y remédier de façon ponctuelle à l'aide de quelques cordons de pierres placés en travers des passages d'eau. Plus loin du village, une dégradation locale très marquée du haut versant, après mise en culture de la brousse tigrée, n'a pas eu les mêmes conséquences. Profitant de l'impluvium du haut versant, une formation ligneuse très dense s'est constituée et protège le bas versant.
- dans les zones où les sols épais du bas versant occupent la majeure partie de la toposéquence, 2 situations représentatives ont été choisies suivant la distance au village :

- «le terroir de village» de Gourga-Tilli (quartiers sud de Bidi) d'environ 1 000 ha,
- «le terroir de brousse» de Samniwéogo, d'environ 100 ha.

Le site de Gourga Tilli

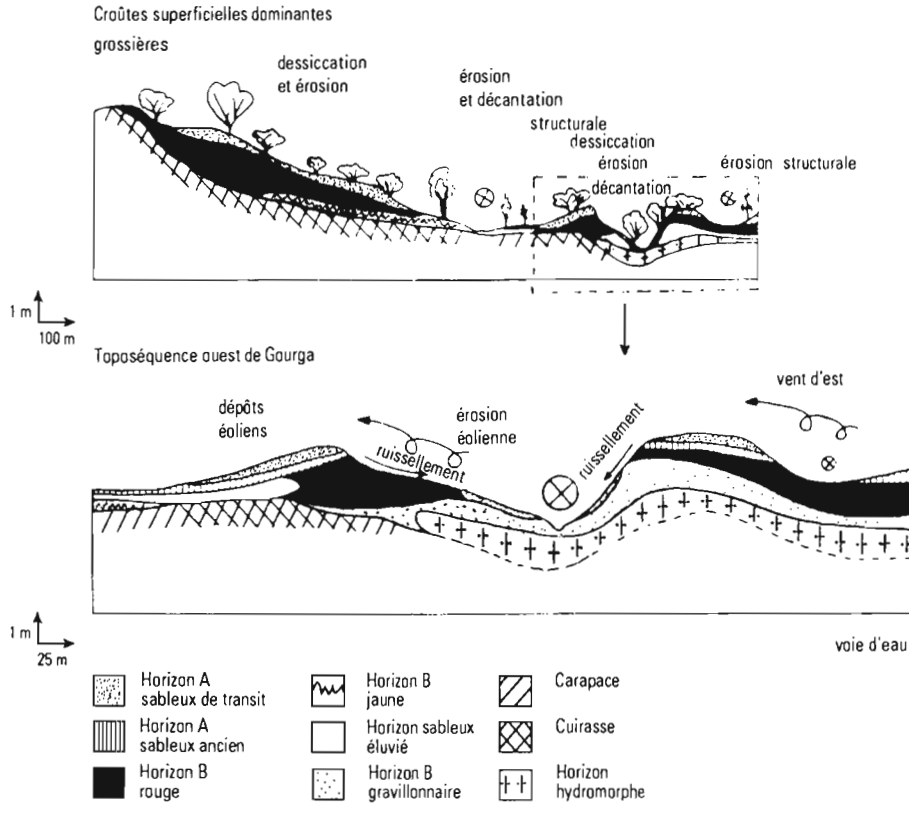
ÉTUDE DE TOPOSÉQUENCES

La toposéquence type du versant ouest de cette zone (fig. 4) présente en 1986, sur une pente moyenne de 1,5 %, la succession suivante sur 1 km :

- un plateau subhorizontal où s'est installé un campement peul. La croûte est de type grossier, parsemée de cailloux de cuirasse ;
- un sol sableux profond et bien drainé surmonte l'induration qui prolonge la cuirasse sommitale sur une pente de 2 à 3 %. C'est un sol ferrugineux, avec un horizon A sableux, remanié par le vent (placages sableux éoliens sous strate arbustive claire, qui surmontent un horizon A sableux plus ancien). L'horizon B rouge est puissant (4 m). Les taches nues dépressionnaires sont soumises aux érosions hydrique et éolienne (érosion aréolaire). De grandes plages nues couvertes de croûtes d'érosion en résultent. Les bourrelets sableux portent une végétation arbustive claire (*Guiera senegalensis*), un tapis graminéen peu dense et une croûte fine de dessication ;
- dans un troisième segment, le sol s'amincit (2 m), l'horizon qui surmonte l'induration est un B jaune, ce qui révèle une certaine éluviation en fer. De grandes plaques d'érosion marquent ce segment, exposé aux vents d'est ;
- dans une quatrième facette, la carapace forme un replat ; elle est surmontée d'un horizon B, très peu épais, probablement enrichi en particules fines par décantation. En effet, l'axe du replat présente des traces d'écoulement latéral très ralenti ; cette gouttière fonctionne comme un affluent du bas-fond, presque parallèle à celui-ci. Des croûtes de décantation et d'érosion recouvrent les parties non cultivées. Quelques cultures de sorgho et un peuplement de baobabs indiquent un régime hydrique à drainage imparfait ;
- à l'approche du bas-fond encaissé, et avant que ne disparaisse la carapace, s'est formé un sol sableux plus profond. La distribution des horizons pédologiques et des surfaces élémentaires (fig. 4) montre une dissymétrie qui révèle des transferts éoliens en surface (décapage hydroéolien du chanfrein exposé à l'est, sédimentation sur le versant ouest) et des transferts hydriques en profondeur (horizons éluviés sur le rebord ouest, horizons hydromorphes dans le bas-fond encaissé).

Ce qui caractérise cette toposéquence occidentale est donc l'extension des surfaces nues dont l'origine en partie éolienne apparaît nettement à l'approche du bas-fond. Le rôle de l'eau n'intervient que sur les axes d'écoulement et la forte pente du chanfrein. En 1952, seul le chanfrein et quelques voies de communication étaient dénudés. Ce versant était alors cultivé, mais comme il se trouvait sur un axe de passage de troupeaux, qui reliait le campement peul aux puisards du bas-fond, il a été abandonné par les paysans par la suite. On peut donc relier l'état de dégradation de cette séquence à l'effet des reprises éoliennes sur versant exposé en conditions de sécheresse, de surpâturage et de piétinement.

La toposéquence du versant oriental est plus longue (2 km) et sa pente moyenne plus douce : 1 %. D'aval en amont se succèdent : une ancienne plaine d'inondation, «des champs de brousse» sur un sol sableux peu profond, qui colonisent le bord de la brousse mouchetée et, en haut versant, une brousse tigrée. Sur ce versant, les surfaces encroûtées sont plus rares sauf le long des voies de communication, où elles sont accompagnées de vastes surfaces d'érosion et de griffes.



Coupe pédologique du bas-fond de Gourga-Tilli. Influence de l'action du vent sur la dissymétrie des versants.

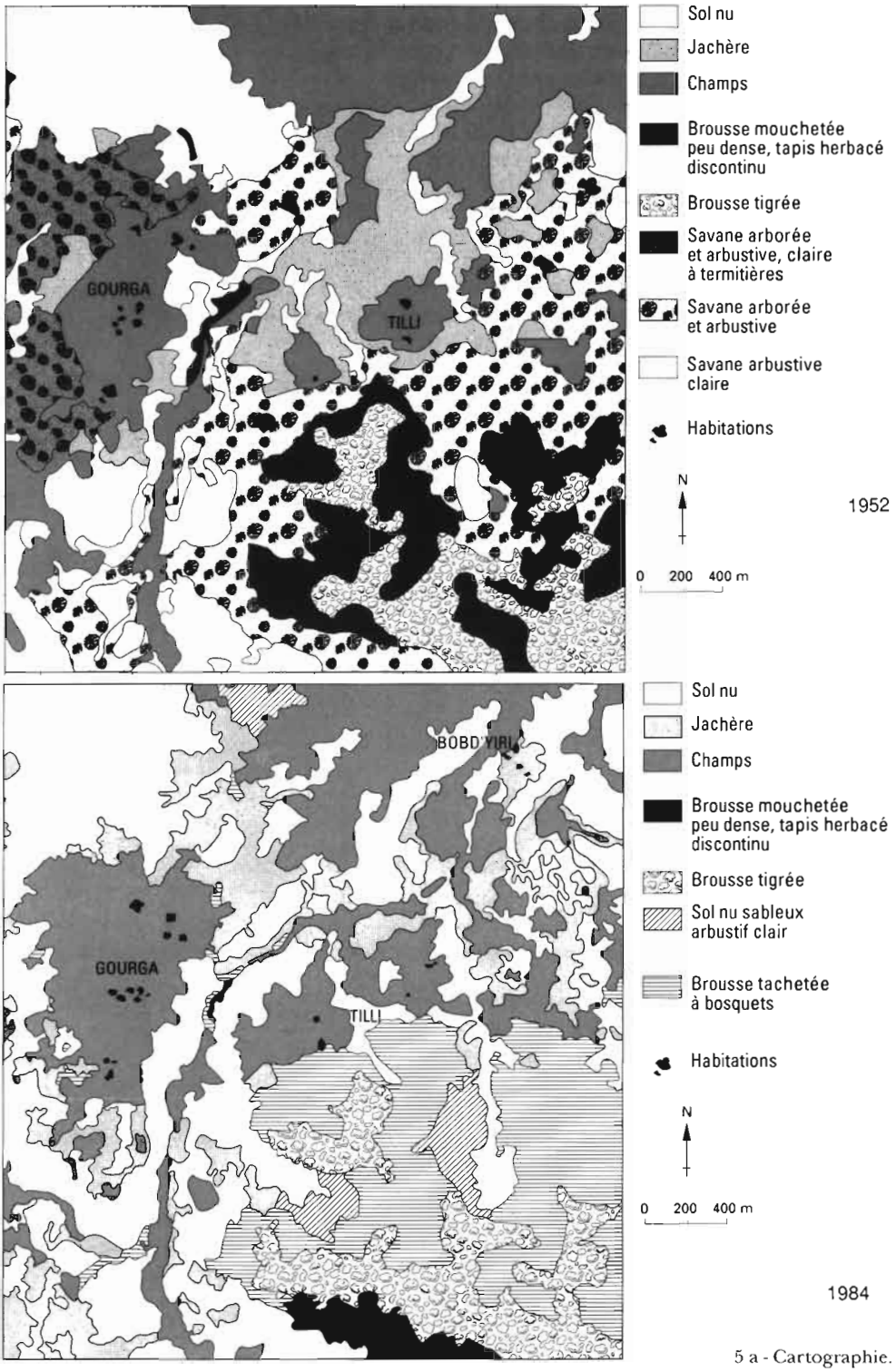
FIGURE 4 - *Répartition des états de surface sur le bas versant.*

PHOTO-INTERPRÉTATION

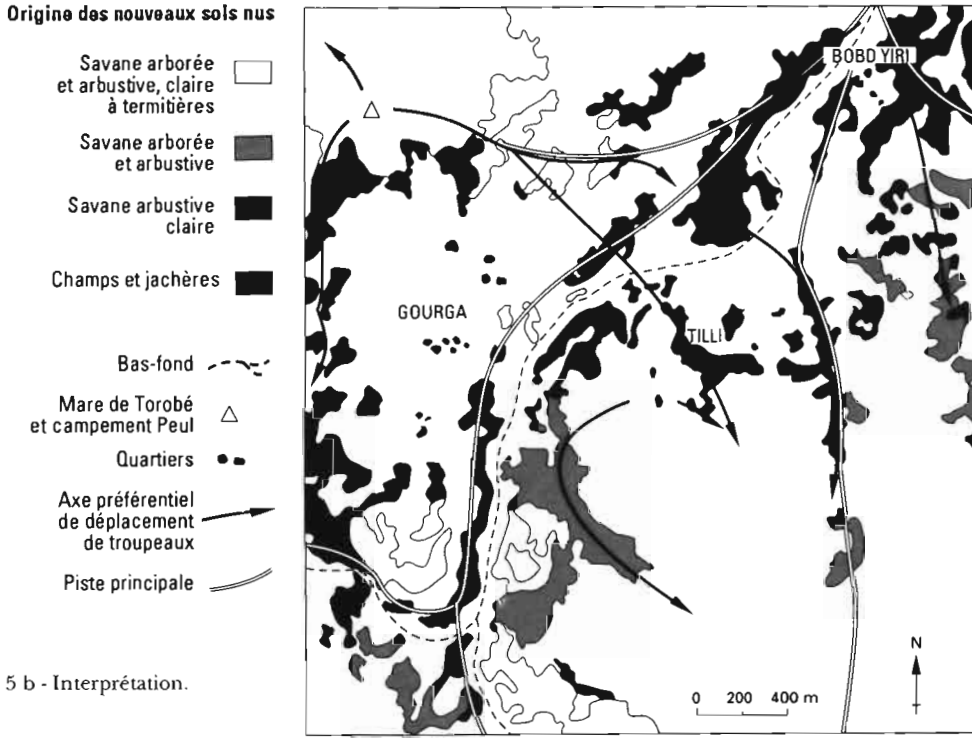
À partir des photographies de 1952 et de 1984, on établit une typologie des formations (fig. 5a). En superposant les 2 cartes, il est possible de suivre l'évolution des différentes unités (fig. 5b) et, par relation aux faits physiques ou anthropiques connus, d'en tirer des hypothèses de causalité.

En 1984, l'aspect de la plupart de ces formations est modifié. La brousse tigrée s'est ouverte ; la brousse mouchetée est devenue une steppe arbustive dense par fragmentation de la strate herbeuse. Les jachères n'ont plus l'aspect qu'elles avaient en 1952. Elles se signalent par des regroupements d'arbustes séparés par des taches claires. Compte tenu de cette transformation, il est difficile de comparer les surfaces des formations entre les 2 dates. Seules celles qui sont liées à une fonction (champs, jachères) ou à un fonctionnement particulier (sol nu, brousse tigrée) peuvent être comparées entre 1952 et 1984 (tabl. II).

En 1952, les zones dénudées ne se localisent que sur certains milieux particuliers : brousse tigrée, chanfrein, couloirs et aires fréquentées intensément par le bétail (à proximité des mares et des puisards). L'érosion hydroéolienne est vraisemblablement à l'origine de cette dégradation. La mise en culture du chanfrein et son utilisation comme voie de communication ont condamné une facette particulièrement fragile.



5 a - Cartographie.



5 b - Interprétation.

FIGURE 5 - *Évolution des formations de bas de pente. Aire de Tilli-Gourga.*

Tableau II - Évolution de certaines formations (en pourcentage de l'aire étudiée)

Année	Sol nu*	Champs	Jachères	Br.Tigrée
1952	5,6	23,7	8,9	7,6
1984	30,4	23,3	13,9	7,6

* ou faible recouvrement herbacé

En 1984, on constate l'importante progression du sol nu souvent en périphérie de zones dégradées en 1952. Comme la surface utilisée par l'agriculture est stable et que 25 % des nouveaux sols nus se sont développés aux dépens des champs exploités en 1952, il y a donc bien eu mise en culture de sols qui ne l'étaient pas en 1952. Ainsi, 19 % des sols nus de 1984 proviennent de savanes arborées assez denses, qui ont été mises en culture depuis à titre de champs non permanents. Au cours de cette période, 23 % des zones cultivées en 1952 (champs et jachères) ont aussi évolué en «zones nues». Il s'agit essentiellement de «champs de village», non permanents, plus éloignés des habitations que les champs permanents. La localisation des dégradations est particulière : on retrouve le phénomène d'érosion hydroéolien du type chanfrein dès que s'ajoute à une ondulation de la couverture sableuse exposée au vent une longue mise en culture sans restitution organique suivie d'une jachère qui subit une grande fréquen-

tation. Si le terrain a donc localement une fragilité, c'est le système de culture qui favorise, à terme, l'apparition de ces sols nus puisque les champs de concession n'ont que peu de symptômes d'érosion en tache. Paradoxalement, la mise en jachère, en période de sécheresse, se révèle dangereuse, car le recrû ligneux est affaibli, le couvert herbacé et la rugosité du sol disparaissent et l'encroûtement se développe. Le sol sans végétation n'a plus la protection des résidus de récolte et des systèmes racinaires ce qui accroît l'érosion éolienne, après piétinement du bétail divagant, et les phénomènes d'encroûtement. Lorsque la jachère est reprise provisoirement pour de petits champs individuels d'arachide, l'éolisation est spectaculaire en saison sèche. En revanche, la culture permanente de mil maintient un état de surface propice à l'infiltration et résistant à l'érosion éolienne (relief, couverture de résidus, teneur en matières organiques).

Sur le terrain, le paysage de 1984 révèle alors les plus fines ondulations topographiques non perceptibles en 1952 par une alternance typique : d'est en ouest se succèdent, une cuvette sablo-argileuse cultivée en sorgho, où les ligneux sont en bon état, puis une pente dénudée et érodée, où se développent des épineux, une crête sableuse au tapis herbacé peu dense (*Eragrostis tremula, Schoenefeldia gracilis*), enfin un champ de mil sableux, subhorizontal qui rejoint la cuvette sablo-argileuse suivante.

Les savanes arbustives claires ont été peu mises en culture (terrain inondable, carapace à faible profondeur). Elles sont à l'origine de 38 % des sols nus de 1984 : la dégradation est ici essentiellement due au bétail (voies d'accès aux pâturages et aux mares, aires de parcage).

L'intensité de cette dégradation des bas versants proches du village, qui a provoqué la formation d'immenses zones nues, révèle leur fragilité générale dès lors qu'il sont soumis à une forte pression pastorale et à une activité agricole «extensive» en conditions sèches. Les seuls espaces encore peu touchés sont les champs permanents, les bas-fonds, les cuvettes, les champs sableux à pentes faibles s'ils ne sont pas en situation de recevoir d'intenses ruissellements ou sensibles à l'érosion éolienne.

Aire de Samniwéogo

Il s'agit d'une aire moins dégradée, éloignée des voies principales, cultivée selon un système de culture de brousse, à savoir dix années de culture de mil suivies de dix années de jachère. La toposéquence représentative de l'aire étudiée est présentée (fig. 6).

Le domaine cuirassé

Le sommet uniformément nu et caillouteux est suivi du haut versant où la cuirasse reste à faible profondeur. La végétation est une steppe arbustive où alternent des plages herbeuses, sableuses, à buissons rabougris (Combretacées) et des surfaces nues encroûtées, affectées par une érosion laminaire (croûte d'érosion, micromarches) qui dégage parfois l'horizon gravillonnaire ou caillouteux sous-jacent. Ce segment subit et produit à la fois un fort ruissellement.

Le domaine sableux non hydromorphe

En une quarantaine de mètres, la profondeur de la cuirasse passe de 25 à 220 cm. Elle est en effet recouverte d'une épaisse couche de sables éoliens, enrichis en argile en profondeur, sur une pente de 1 à 3 %.

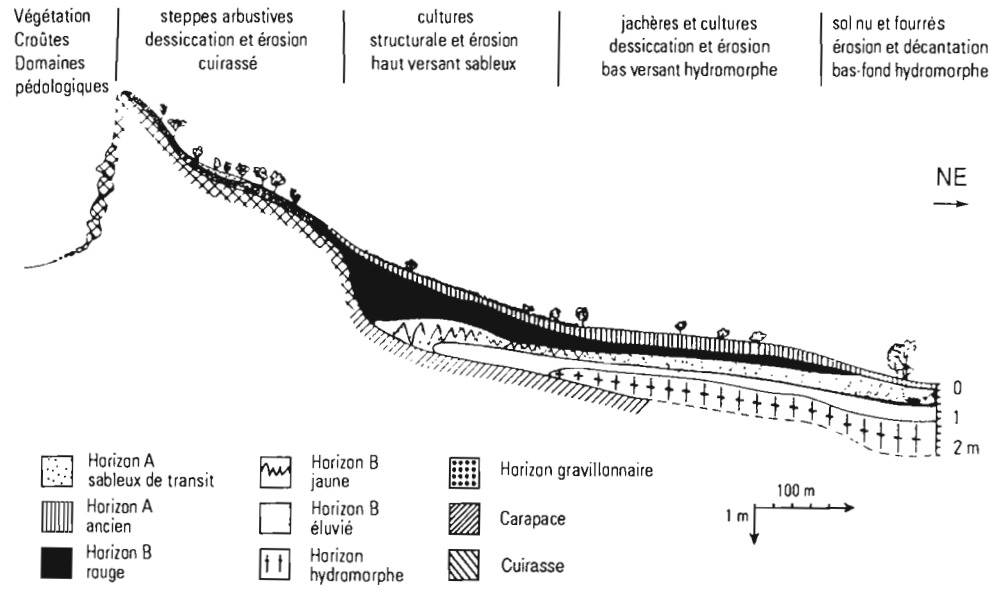


FIGURE 6 - *Toposéquence de Samniwéogo.*

Ces sols filtrants, profonds, sont exploités par une culture de mil sans fumure. Malgré les faibles teneurs en éléments fins, leur surface travaillée ou piétinée se réorganise progressivement en pellicules sous l'effet des pluies et du ruissellement. Ces croûtes structurales évoluent entre 2 travaux du sol en même temps que s'aplanit le microrelief. L'imperméabilité s'accroît, d'où la grande variété des coefficients de ruissellement (de 0 à 80 %) selon le délai de la pluie après le sarclage et son intensité (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1988).

Les discontinuités qu'engendrent les travaux du sol de type labour ont tendance à être soulignées par une illuviation sur le fond de travail et un tassement qui apparaît lors de mesures de densités apparentes. Ceci accroît la difficulté d'infiltration liée aux croûtes de surface, à la porosité vésiculaire importante sous la surface et à la faible porosité tubulaire habituelle de l'horizon A des sols ferrugineux sableux (ROOSE, 1981)

Sur les photographies aériennes 1952, ce domaine est homogène. En 1984, apparaissent au sol des zones d'extension variable où l'eau s'infiltre mal, où le sol est plus dur à sarcler, d'où leur abandon fréquent par les agriculteurs. Ces taches nues sont nommées *zipelle* (terre blanche) ou *vuigo* (clairière) par les paysans. La cartographie de l'aire de Samniwéogo montre que ces taches, de forme oblongue, apparaissent le long des axes de drainage ou au niveau d'un col, et qu'elles sont fréquemment marquées par les rayures lissées caractéristiques des fonds de labour. La mesure des densités apparentes ne met pas en évidence de différences significatives par rapport au sol normal. L'origine de ces zones est donc clairement le fait d'une érosion hydroéolienne. La mise en culture, et en particulier le travail du sol avant semis, fragilisent considérablement les terrains soumis aux ruissellements plus ou moins concentrés qui proviennent du premier segment. En saison sèche, le piétinement du bétail divagant libère des sables qui sont facilement balayés sur ces aires lisses et dénudées. Suivant le niveau d'érosion, on peut atteindre ainsi l'horizon B, ce qui donne à la surface un nanorelief mamelonné caractéristique. La dureté de ces aires est due en partie à leur état de

dessiccation, à l'absence de faune et de racines (croûte d'érosion imperméable) mais aussi à la nature de l'horizon B de structure massive, plus riche en argile et pauvre en matière organique.

Ces zones dénudées sont fréquemment choisies comme aires de repos et de circulation, ce qui favorise à l'état humide un tassement superficiel et, à l'état sec, l'érosion éolienne. La fréquence de ces zones nues autour de certains arbres et arbustes très appétés par les caprins (tels que *Balanites aegyptiaca*) et, au niveau du col, en l'absence d'écoulement important mais sous accélération du vent, soulignent le rôle du bétail et du vent.

En certains endroits, ces taches nues peuvent être imputées à la présence d'une termitière ou d'une ancienne construction, par suite d'un fort enrichissement superficiel en argile.

Il existe 3 pratiques paysannes de restauration de ces aires dégradées :

- la couverture du sol par des résidus organiques : tiges d'oseille de Guinée, branchages de *Piliostigma reticulatum*, fumier. Cet obstacle aérodynamique piège les sables éoliens sur quelques centimètres, ce qui crée une surface propice à l'infiltration. L'eau et la matière organique favorisent le développement d'une mésofaune apte à détruire la croûte d'érosion et à accroître la porosité tubulaire aux dépens de la microporosité. Le but est de morceler progressivement la tache nue. Cette pratique est fréquemment observée mais son coût en matières végétales en limite l'extension ;
- le travail du sol ; les paysans sarclent ou labourent ces zones localement dégradées où se concentre à présent le ruissellement, mais l'effet le plus courant est une aggravation de l'érosion. Les fonds de travail de la houe ou de la charrue sont exhumés et une nouvelle croûte d'érosion se forme ;
- les obstacles perméables isohypses ; actuellement se développe l'aménagement des champs par des successions d'obstacles perméables qui jouent un rôle de régulateur de ruissellement. Une expérimentation sur 10 ha montre, en trois ans, la réduction progressive des zones nues en amont des cordons (50 %) à la faveur d'atterrissements. On observe néanmoins qu'une petite terrasse colmate rapidement le premier cordon, qui doit être plus haut et plus résistant (muret) ; par ailleurs, le colmatage éolien ou accidentel (sarclage trop près des cordons) favorise une collecte latérale et donc une concentration des eaux qui conduit à de nouvelles zones érodées, tout en gaspillant les eaux de ruissellement. Le cloisonnement semble limiter cet inconvénient.

Les observations précédentes concernent le domaine cultivé. Le domaine non cultivé (vieilles jachères) présente une forte différenciation latérale entre taches nues pelliculaires et microbuttes sableuses. Le processus est connu (VALENTIN, 1985) : la sécheresse entraîne la disparition du couvert herbacé là où le bilan hydrique est le plus déficitaire. Le sol nu est soumis à des processus de réorganisation superficielle qui conduisent à disjoindre le sable des éléments fins. Ceux-ci s'indurent sous forme pelliculaire alors que les sables, balayés par le vent, s'accumulent au voisinage de la végétation survivante.

LE BAS VERSANT HYDROMORPHE

La moitié aval de la toposéquence, pente concave de 0,5 à 1 %, présente les caractéristiques d'un drainage ralenti : marques d'hydromorphie dans les horizons inférieurs, apparition de *Balanites aegyptiaca* et de *Piliostigma reticulatum*. C'est aussi dans cette zone que se développent les taches nues les plus étendues dans les champs et les jachères. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- l'instabilité structurale accrue sous l'effet de la plus forte teneur des horizons superficiels en limons et d'une longue exploitation sans restitution organique. L'indice

ls de Hénin y atteint 3,6. L'encroûtement après sarclage est très rapide (croûtes structurales), le sol se referme immédiatement après semis et gêne la levée ; il apparaît tassé en surface après des labours successifs et la porosité profonde est très faible, ce qui gêne les enracinements ;

- le ruissellement diffus qui provient des premiers segments se décharge d'une partie de ses sédiments lors de la variation de pente, en créant des croûtes de ruissellement sur les jachères qui gênent l'installation du tapis herbacé. Une petite mise en défens installée sur un tel site a montré que le piétinement est une condition qui favorise la réinstallation quand la pluviosité s'accroît ;
- là où le ruissellement est le plus concentré, se développent de larges taches de décapage avec une croûte d'érosion. Le stock semencier disparaît. Le piégeage de graines (obstacles naturels ou artificiels, fissures, traces de sabots) est une condition nécessaire de recolonisation. Sur un tel site, un essai de restauration a eu lieu en 1986. Le traitement consistait en une scarification au-dessus de bourrelets de terre et en semis de *Pennisetum pedicellatum*. Les résultats confirment notre modèle :
- réalité des processus d'érosion hydrique (disparition des bourrelets en une saison),
- effet de piégeage des sables éoliens et des graines grâce au tapis de *Pennisetum pedicellatum* obtenu,
- précarité de cet aménagement ; en 1987, après pâture, c'est essentiellement *Zornia glochidiata* qui se réinstalle et les bandes se contractent ; en 1988, le couvert de *Zornia glochidiata* ne se développe pas ;
- le vent ; en saison sèche, le sol est nu un mois après la fin des pluies. Le piétinement des troupeaux qui circulent de champs d'arachide en champs de mil favorise l'érosion éolienne et la différenciation latérale. Après une culture d'arachide, l'éolisation est totale. Dans un champ de mil, il reste toujours un minimum de résidus et de souches qui protègent la surface ;
- le déficit pluviométrique ; ses conséquences sur la couverture végétale et l'évolution des terrains mis en jachère sont caractéristiques. La première année (1985 : 343 mm), un relief résiduel existe et l'eau s'infiltre correctement. Le terrain se couvre de plantes rudérales (*Corchorus tridens, Zornia glochidiata, Eragrostis tremula*, mil hybride). L'année suivante (1986 : 450 mm), le relief disparaît, le bilan hydrique se détériore en même temps que se développe la croûte structurale. Les graminées disparaissent au profit de *Zornia glochidiata*, petite légumineuse qui couvre mal le sol. Le front d'humectation ne dépasse pas 25 cm. Un an plus tard (1987 : 400 mm), des taches nues très encroûtées apparaissent à partir du sommet d'anciennes buttes de sarclage. Certaines jachères de cinq ans sont ainsi totalement nues, ce qui incite à les remettre en culture pour réduire l'érosion hydrique qui se révèle localement par des croûtes d'érosion et, parfois, par des marques d'érosion linéaire près des voies de communication qui font office de collecteur. La meilleure pluviométrie de 1988 (550 mm) a inversé ce processus. Ce sont donc bien les conditions de l'installation du tapis qui faisaient défaut. Il existe donc un équilibre entre la prédisposition du terrain à l'encroûtement et à l'érosion éolienne, la pression de pâture et la capacité de la végétation à subir un régime hydrique déficitaire.

Le chanfrein

Ici encore, le chanfrein subit une érosion hydroéolienne importante facilitée par des labours abusifs. La couverture du sol sur les marges de l'aire érodée pourra mieux limiter le processus érosif qu'une tentative de blocage du ruissellement sur cette pente forte.

Conclusion sur le bas versant

Les formations de bas versant ont des caractères de fragilité très différents de ceux du haut versant. Les sols sableux à sablo-limono-argileux peuvent subir une érosion hydrique sur les passages d'eau, une érosion éolienne «aréolaire» et une dégradation des états de surface qui affaiblissent le potentiel d'enherbement déja réduit par la pluviosité insuffisante. L'expression de ces dégradations dépend du mode de gestion et de paramètres locaux. L'auréole des champs de village, qui est aussi la zone de divagation du bétail, est la plus touchée. Le processus n'est jamais irréversible, vu l'épaisseur des sols mais le coût d'une tentative de restauration active est le plus souvent prohibitif au regard d'enjeux économiques, même pensés à moyen terme. Il est souhaitable de préférer la réparation et l'aménagement des zones actuellement les plus productives plutôt que de tout investir dans une réhabilitation précaire des grands espaces décapés. Ceux-ci doivent être néanmoins limités dans leur extension. Sur champs sableux, la meilleure méthode de fixation semble bien être la couverture du sol par des résidus organiques, ce qui, en saison sèche, condamne d'une part leur enlèvement aprés récolte, même pour faire un compost, d'autre part la culture pure de légumineuses, même fourragères. En revanche, cela incite à exploiter la biomasse abondante produite dans les zones de concentration d'eau.

Comme BOIFFIN *et al.* (1986), nous constatons que la fragilité des terrains vis-à-vis de l'érosion ne peut être évaluée au vu des seuls paramètres morpho-pédo-climatiques : il faut aussi se référer à un mode d'exploitation.

RECHERCHE D'UN ÉQUILIBRE

Avec la dénonciation de la responsabilité des activités agropastorales dans le processus de désertification (BOUDET, 1972 ; BARRY *et al.*, 1983 ; MARCHAL, 1983), les gestionnaires ont tenté de rechercher les clefs d'un nouvel équilibre entre les hommes et un milieu dont les caractères d'aridité s'accusent. Des politiques diverses ont vu le jour, mais elles sont loin d'atteindre cet objectif :

- mots d'ordres d'urgence plus ou moins autoritaires, souvent perçus par les populations comme une expropriation, voire une exclusion (lutte contre la divagation du bétail) ;
- interventions participatives de restauration, fondées sur des stéréotypes techniques, rigides et mal évalués - défense et restauration de sols, de la DRS à la CES, reboisements - qui se révèlent très souvent inadaptés à l'ampleur du problème, à sa complexité et à sa diversité, à l'évolution du climat et des sols. Parfois l'échelle est trop petite (aménagement régional) ou les enjeux trop minces («bois de village») ;
- réforme de la législation (codes agropastoraux) qui relève parfois de l'incantation sans véritable mise en pratique ;
- politiques de gestion des terroirs qui, si elles n'étaient fondées que sur un stéréotype administratif, risqueraient d'être contrariées par la réalité fonctionnelle complexe et hétérogène des systèmes agropastoraux ;
- poursuite de la vulgarisation et de l'assistance technique classique qui suscitent la multiplication de certains facteurs de dégradation (caprins, labours en mauvaises conditions, remise en culture des terres du haut versant) ;
- équipement hydraulique et aménagements de bas-fonds qui détournent les paysans du travail d'équipement des zones utiles en voie de dégradation ;
- encadrement de l'élevage, mais limité aux aspects vétérinaires et hydrauliques.

Les réalités écologiques et sociales sont en fait d'une grande exigence :

- une étude du milieu montre que chaque unité de paysage constitue un système dont la dynamique dépend des modes d'utilisation passé et actuel, de l'évolution du climat et des facettes voisines (en particulier supérieures). Chaque système possède des capacités de résistance et d'autorégulation particulières et des seuils d'irréversibilité du processus de dégradation sous un climat et une exploitation donnés ;
- une bonne connaissance du système agropastoral révèle l'existence de diverses stratégies de groupe plus ou moins prédatrices du milieu ; mais, en général, cette diversité présente comme corollaire une synergie à travers des rapports d'échanges et des complémentarités technico-économiques utiles sinon essentielles (rôle des troupeaux pastoraux sur le bilan de fertilité des champs vivriers) ;
- le facteur d'équilibre socio-économique le plus important reste la mobilité de la population ; cela pose les problèmes de la relation des hommes à leur espace et de la force de travail disponible.

Doit-on pour cela en déduire que chaque territoire doit faire l'objet d'une étude lourde ? Comme on a voulu le montrer, tant les paramètres de la dégradation que les solutions sont peu nombreux :
- le diagnostic des érosions hydrique et éolienne et du colmatage est possible par l'observation des croûtes de surface, des indices d'éolisation et d'érosion, de la capacité de repousse en année humide. La mémoire collective et l'utilisation de photographies aériennes permettent de déterminer les unités écologiques qui ont subi le plus fortement la sécheresse et/ou les conséquences de l'activité humaine ; on doit savoir reconnaître des zones fragiles non régulées (le chanfrein), des zones autorégulées que la dégradation agropastorale met réellement en danger (les brousses tigrées) et des formations qui profitent d'un pâturage sans excès (les prairies sur bowés, des jachères de bas de pente encroûtées) ;
- dans les situations utiles les moins dégradées, on peut tirer parti des vecteurs naturels (eau, vent, faune) et des matériaux locaux (pierres, bois, plantes pérennes) pour un aménagement durable : couverture du sol, réseaux d'obstacles isohypses, filtrants, cloisonnés. Ces procédés remplissent autant une fonction de maintien des ressources que d'amélioration des systèmes de culture (Lamachère et Serpantié, 1988). Ils ont en outre l'avantage de pouvoir se prêter à une appropriation sociale facile et donc de devenir un stéréotype technique si, dans le même temps, sont revues les pratiques foncières défavorables à l'aménagement et à l'intensification (prêts à court terme) et si est accrue la force de travail de saison sèche (aides alimentaires et mécaniques). Mais on connaît encore mal les meilleures conditions de mise en œuvre ;
- la connaissance des pâturages par les éleveurs est déjà très élaborée, mais elle ne s'applique qu'à l'optimisation de l'alimentation du troupeau. Un complément d'information sur l'adaptation de la charge saisonnière à la fragilité d'une formation donnée est nécessaire. Son contrôle pourrait incomber à une autorité pastorale villageoise. Malgré leur mobilité, les sociétés subsahéliennes ont montré leur capacité d'organisation pour atteindre des objectifs collectifs. Seraient-elles incapables d'organiser le sauvetage de leurs ressources naturelles ? Il est temps d'ouvrir le débat sur le terrain. Il ne s'agit pas d'imposer aux populations une réflexion sur la dégradation du milieu, ce dont elles sont déjà conscientes, mais de leur proposer d'éclaircir les enjeux réels : les possibilités migratoires ne sauraient être illimitées, de même que sont condamnés les systèmes agropastoraux fondés sur une hypothèse d'infinité des ressources. Dans certains villages, les signes d'une recherche autonome de solutions aux migrations se multiplient : activités de saison sèche (maraîchage, orpaillage, embouche, aménagement du territoire), travail de la matière organique, développement des moyens de transport ; n'y-a-t-il pas là des conditions favorables ?

La difficulté évidente de travailler avec des groupes mal structurés et hétérogènes recommande de procéder par étapes :

- dans un premier temps, le plus facile est la démonstration collective des techniques les mieux adaptées au contrôle des facteurs d'encroûtement et d'érosion, qui servent aussi des objectifs individuels. Le but est ici l'apprentissage puis l'appropriation collective du procédé. L'accroissement de la force de travail peut être un atout de même qu'une bonne organisation ;

- dans un second temps, une discussion sur le fonctionnement du paysage se révèle nécessaire. L'acquisition initiale d'une technique adaptée permettra à la population de mieux saisir les problèmes de dégradation et d'érosion. Il faut également assurer une animation très rapprochée : elle doit être axée sur l'appropriation d'une réflexion par la population plutôt que sur la réalisation immédiate d'aménagements lourds. Le problème n'est pas seulement d'enseigner une écologie, d'informer sur des solutions ou sur des techniques mais aussi d'amener le groupe à utiliser ses propres références. Tout dépend en fait des qualités du personnel d'encadrement. Ces animateurs doivent recevoir une formation dans ce sens, comme devraient également en recevoir des topographes villageois, des gardes forestiers villageois, des chefs de pâturages, etc.

Ces étapes peuvent être longues, coûteuses et peu gratifiantes à court terme pour les intervenants extérieurs mais elles sont susceptibles d'entraîner une réelle amélioration du milieu par des collectivités réduites (l'unité de production) ou plus étendues (le quartier, le village pluriethnique).

G. SERPANTIÉ : *agronome*, ORSTOM, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1
L. TEZENAS DU MONTCEL : *pastoraliste*, même adresse
C. VALENTIN : *pédologue*, BP 11416, Niamey, Niger

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987. - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Thèse de doctorat de l'université Paris-VI, 341 p.

AMBOUTA (K.) et ICOLE (M.), 1986. - L'écosystème «brousse tigrée» de l'Ouest du Niger. Son évolution lors des variations climatiques de durée pluriannuelle. Actes du colloque «Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé. Présent. Futur». Dakar, 21-28 avril 1986.

BARRY (J.-P.), BOUDET (G.), BOURGEOT (A.), CELLES (J.-C.), COULIBALY (A.-M.), LEPRUN (J.-C.), MANIERE (R.), 1983. - Études des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. *Rapport* ACC-Griza-LAT., 114 p.

BOIFFIN (J.), PAPY (F.) et PEYRE (Y.), 1986. - Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux. *Rapport multigr.* INAPG/Inra/Diame.

BOUDET (G.), 1972. - Désertification de l'Afrique tropicale sèche. *Adansonia* série., 2 12, (4) : 205-224.

BOULET (R.), 1968. - Étude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre Nord. ORSTOM Dakar, *multigr.* 351 p., 43 tabl., 34 fig., 1 carte h.-t. à 1/500 000 + annexes.

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1988. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Rapport* CEE-ORSTOM, 202 p.

CHARNEY (J. C.), STONE (P. H.) et QUIRT (W.J.), 1975. - Drought in the Sahara. A biogeophysical mecanism. *Science*, 187 : 434-435.

CLOS-ARCEDUC (M.), 1956. - Étude sur photographie aérienne d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée. *Bull. Ifan*, Dakar, 18 (3) : 677-684.

CORNET (A. F.), DELHOUME (J. P.) et MONTANA (C.), 1988. - Dynamics of striped vegetation patterns and water balance in the Chihuahuan desert. Diversity and pattern in plant communities : 221-231. Edition SPB Academic Publishing, The Hague.

GROUZIS (M.), 1987. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens. Mare d'Oursi. Burkina Faso. Thèse univ. Paris-Sud. 293 p. + annexes.

HUBERT (P.) et CARBONNEL (J.-P.), 1986. - Approche statistique de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. Actes du colloque «Changements globaux en Afrique durant le quaternaire. Passé. Présent. Futur». Dakar, 21-28 avril 1986.

IZARD (M.), 1985. - Le Yatenga précolonial. Un ancien royaume du Burkina. Ed. Karthala, 163 p.

LAMACHÈRE (J.-M.) et SERPANTIÉ (G.), 1988. - Aridification du climat subsahélien : étude de trois méthodes d'amélioration des bilans hydriques au champ pour une culture pluviale. *Rapport* ORSTOM *multigr.*, 39 p.

LEPRUN (J.-C.), 1978. - Compte rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de «brousse tigrée» dans le Gourma. ORSTOM-DGRST, Paris, 45 p. *multigr.*, 8 tabl., 13 fig., 6 phot.

MARCHAL (J.-Y.), 1983. - Le Yatenga. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 167, 869 p.

MERSADIER (G.), 1986. - Histoire et organisation territoriale d'un village du Yatenga. ORSTOM *multigr.*, 29 p.

PENNING DE VRIES (F. W. T.) et DJITEYE (M. A.), 1982. - La productivité des pâturages sahéliens. Ed. Pudoc Wageningen, 525 p.

ROOSE (E. J.), 1981. - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Trav. et Doc. ORSTOM* , n° 130, 569 p.

SERPANTIÉ (G.), MERSADIER (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.), et MERSADIER (Y.), 1987. - Transformations d'un système agropastoral soudano-sahélien (Bidi, Nord-Yatenga, Burkina Faso). Colloque «Dynamique des systèmes agraires». MRES, Paris 16-18 novembre 1987.

SNIJDERS (T. A. B.), 1985. - Le régime des pluies au Burkina Faso. Variabilité annuelle et cohérence spatiale. *Bull. liaison CIEH* , vol. 59 : 2-16.

VALENTIN (C.), 1985. - Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water-holes in the Sahelian zone. Soil Erosion and Conservation Soil Cons. Soc. Amer., Andkeny, USA : 51-65.

Christian FLORET, Édouard LE FLOC'H,
Roger PONTANIER

Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

L'accroissement de la pression démographique, dans les zones arides d'Afrique du Nord, s'est accompagné de la mise en œuvre de moyens mécaniques de travail du sol et de transport. Ces évolutions ont entraîné durant les dernières décennies des modifications profondes des pratiques sociales de gestion de l'espace rural et des ressources naturelles par les populations. La sédentarisation a satisfait le souhait d'une appropriation des terres. Il s'est ensuivi une accélération très forte de la mise en culture ainsi qu'un surpâturage généralisé (régression de la pratique de la transhumance) sur des espaces pastoraux de plus en plus restreints. L'insuccès de la céréaliculture sur certains milieux, suite en particulier à la dégradation progressive des sols, a eu pour conséquence l'abandon de cette culture sur des surfaces aujourd'hui désertisées (LE HOUÉROU, 1969 ; FLORET *et al.*, 1973).

De tels changements, dans l'utilisation des ressources, peuvent être évalués par l'analyse des photographies aériennes, complétée par des contrôles de terrain (DEBUSSCHE *et al.*, 1987). Les unités élémentaires d'observation retenues sont les systèmes écologiques définis par un certain nombre de paramètres relatifs à la flore, à la végétation et au sol (en particulier les caractéristiques hydrodynamiques). Ces systèmes écologiques constituent les unités fonctionnelles des paysages de la région ; ils sont en relation entre eux par le jeu des transferts d'eau de ruissellement ou de produits d'érosion.

Une modification de la couverture végétale ou des horizons supérieurs des sols, entraîne des changements dans l'utilisation potentielle d'un système et dans sa productivité. On passe alors à un autre système écologique, souvent de façon irréversible si certains seuils sont dépassés.

Dans ce travail, nous nous proposons :

- d'analyser les transformations survenues entre 1948 et 1985 en ce qui concerne l'utilisation du sol et les systèmes écologiques, dans une petite région du Sud tunisien représentative des zones arides de ce pays ;
- d'étudier les conséquences de ces perturbations sur la production végétale (céréaliculture, pâturage) et sur le bilan hydrologique régional.

ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est constituée par une petite région naturelle, d'une superficie de 81 260 ha, située à 50 km au nord-ouest de Gabès, représentative de la Tunisie présaharienne (fig. 1).

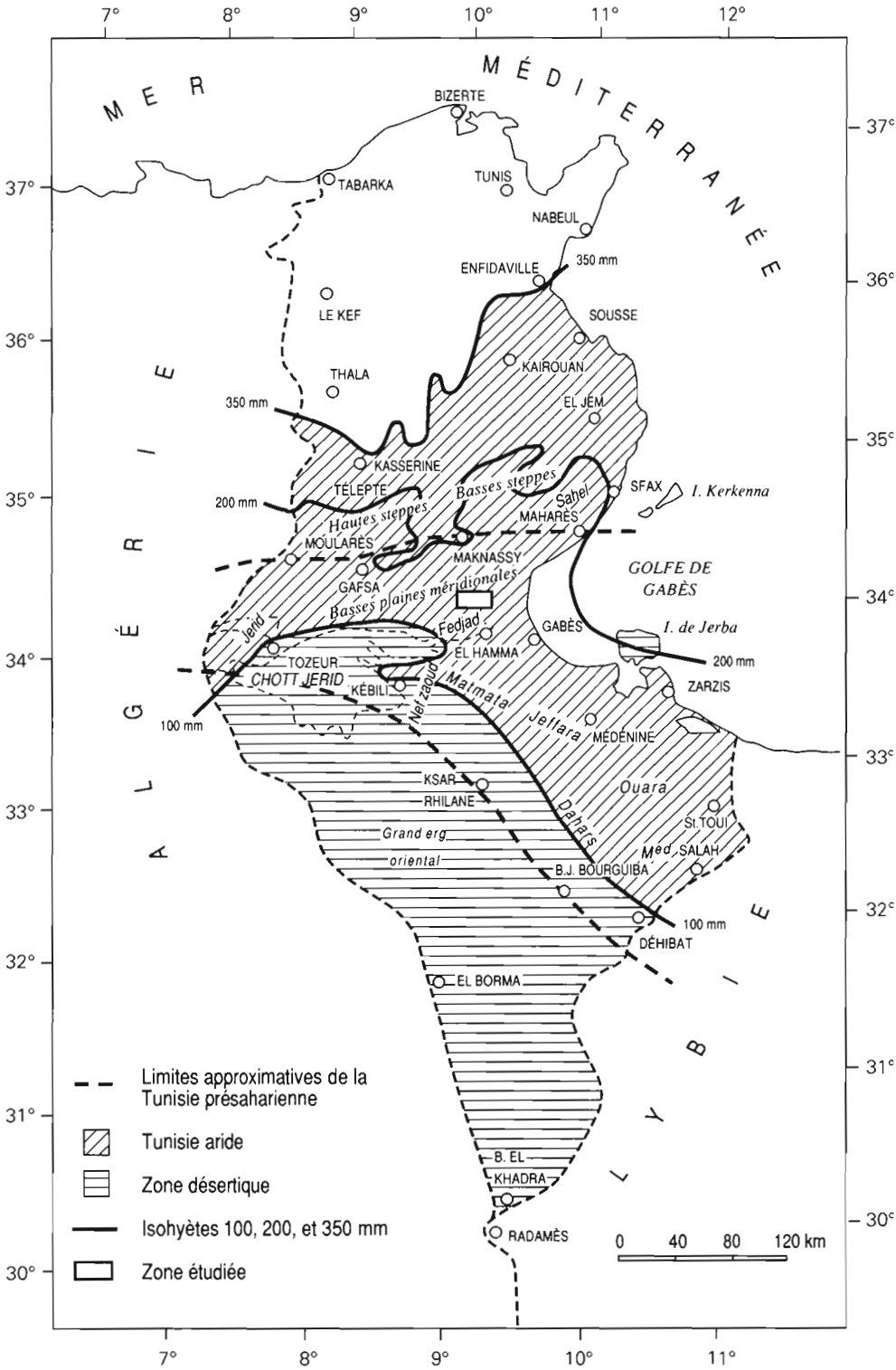


Figure 1 - *La Tunisie présaharienne et la zone étudiée.*

La pluviosité moyenne annuelle de la région, sous bioclimat méditerranéen aride inférieur à hivers tempérés à doux, est de l'ordre de 160 mm. Elle est marquée par une extrême irrégularité, avec cependant une saison sèche régulière de quatre mois (mai à août inclus). Le mois d'octobre est le plus arrosé. Des études statistiques conduites sur les données de la station de Gabès, considérée comme station de référence (FLORET *et al.*, 1978), montrent que la probabilité d'avoir une hauteur de pluie annuelle inférieure à 100 mm est de 1 année sur 5, la probabilité est la même d'obtenir des pluies supérieures à 250 mm. Ces pluies ont fréquemment un caractère orageux et tombent essentiellement durant la période froide, peu favorable à la croissance des végétaux. Le déficit hydrique, estimé entre 1 200 et 1 300 mm par an, est accentué par de forts vents desséchants durant la saison de végétation.

La zone d'étude se présente comme un ensemble de plaines et de plateaux du Quaternaire, reposant sur la puissante série sablo-argilo-gypseuse du Miopliocène ceinturée de petits anticlinaux en guirlande qui culminent à 400-500 m et se caractérisent par des faciès calcaire et marno-calcaire du Crétacé. Le réseau hydrographique, bien marqué près des montagnes, devient généralement endoréique au centre de la zone où l'on rencontre des dépressions fermées (*garaet*).

Les sols, pauvres en matière organique, sont peu différenciés et subissent de forts remaniements dus aux vents et aux eaux. Sur les reliefs et sur les hauts glacis, les sols fortement érodés sont caractérisés par des surfaces à croûte calcaire ou gypseuse plus ou moins démantelées. Sur les piémonts, glacis et zones d'épandage, se rencontrent des sols limono-sableux calcaires, avec présence de gypse en profondeur. Le centre de la plaine est le domaine des sierozems épais et sableux, qui reposent le plus souvent sur des limons à nodules calcaires, et des encroûtements calcaro-gypseux. Enfin, dans les garaet et à l'aval de la toposéquence générale, des caractères d'hydromorphie et de salure marquent généralement le faciès des sols alluviaux.

La végétation steppique de la région est assez contrastée en raison de la diversité des substrats et des situations géomorphologiques, et de l'impact des activités humaines. Il s'agit d'une végétation claire et basse, qui ne dépasse qu'assez rarement 50 cm de hauteur, constituée d'espèces pérennes (ligneuses le plus souvent). Les espèces annuelles peuvent atteindre un fort développement et un recouvrement élevé durant le printemps en année pluvieuse. Les talwegs sont généralement marqués par des formations particulières à nanophanérophytes.

En 1975, la densité de la population rurale était évaluée à 20 habitants.km^{-2} (FLORET *et al.*, 1978). Très irrégulièrement répartie dans l'espace, cette population est plus dense dans la partie sud de la zone, sur les piémonts des montagnes (possibilité d'utiliser les eaux de ruissellement) et, depuis peu, le long des axes routiers et dans les pôles de sédentarisation (Zougrata, Menzel Habib, Fejaj) où existent les infrastructures telles que écoles, dispensaires, etc.).

La céréaliculture puis l'arboriculture, d'abord limitées aux zones dépressionnaires, ou localisées derrière les petits ouvrages d'hydraulique de surface, se sont progressivement étendues aux glacis et elles concernent aujourd'hui, avec des succès très inégaux, une partie de la plaine sableuse.

MÉTHODE D'ÉTUDE

Caractérisation des systèmes écologiques

Les principes généraux de la démarche suivie s'inspirent très largement de la méthode du diagnostic écologique appliqué à l'aménagement du territoire (LONG, 1974-75, 1979).

Tableau 1 - Caractéristiques essentielles des systèmes écologiques de la région de Zougrata

Sigle	Physionomie végétale espèce dominante	Couvert	Type de sol	Réserve utile en eau du sol (en mm) RU	Production en année pluvieuse Parcours kg MS.ha^{-1}.an^{-1}	Céréales (orge) q.ha^{-1}.an^{-1}	Coef. d'efficacité de la pluie Ke% année moyenne	année pluvieuse
SD2	Steppe herbacée et ligneuse basse	30 %	lithosols	60	370		90	75
SD1	avec *Stipa tenacissima*	15 %		45	210		75	60
GD2	Steppe ligneuse basse à	20 %	régosols sur croûte	98	800		90	75
GD1	*Gymnocarpos decander*	10 %	calcaire démantelée	75	400		80	65
AZ2	Steppe ligneuse basse et herbacée	20 %	sols à croûte ou	75	640		90	75
AZ1	à *Anarrhinum brevifolium*	10 %	encroûtement gypseux	52	320		80	65
AA2	Steppe ligneuse basse	20 %	sols isohumiques tronqués	144	420		90	80
AA1	à *Artemisia herba-alba*	3 %	ou limon à nodules calc.	108	180		80	65
aa	Faciès cultivé ou récemment abandonné de AA	5 %	*idem*	126	450	8	90	70
LK3	Steppe ligneuse basse à *Lygeum spartum*	30 %		75	910		100	100
RK3 }	Steppe	40 %	Sierozem sableux	137	1 130		95	80
RK2*}	ligneuse basse	20 %	pouvant être tronqué	126	650		90	70
RK1*}	à *Rhanterium suaveolens*	10 %	dans le cas du RK1	92	420		100	90
rk2	Faciès cultivé de RK3 et RK2	10 %	id. RK3-RK2	125	340	6	95	75
rk1	Faciès cultivé de RK1	5 %	id. RK1	85	280	4		
AR2	Steppe herbacée très claire à	10 %	sols bruts d'apport	160	630		100	100
AR1	*Aristida pungens*	5 %	éoliens ± fixés	80	170		> 100	> 100
ZR	Scrub à *Ziziphus lotus*	50 %	sols peu évolués	218	2 300		> 100	> 100
zr	faciès cultivé de ZR	15 %	alluviaux	218	840	10	> 100	> 100
NS	Steppe ligneuse basse à *Suaeda mollis*	50 %	sols halomorphes salins	160	1 460		> 100	> 100
PV	Steppe herbacée à *Pulicaria laciniata*	50 %	sols peu évolués alluviaux	310	540		> 100	> 100
pv	Faciès cultivé de PV	5 %	légèrement salés	310	410	10	> 100	> 100

* Des faciès particuliers (RX2, RX1) de ces systèmes écologiques sont apparus très récemment. Ils sont marqués par la dominance de *Astragalus armatus* spp. *tragacanthoïdes*, espèce épineuse délaissée par les ovins et peu appréciée par les caprins. Pour les valeurs des divers paramètres, nous considérons les équivalences suivantes : RX2 = RK2 et RX1 = RK1.

Il s'agit tout d'abord de définir, à un niveau de perception compatible avec les objectifs de l'étude, les unités de base opérationnelles. La démarche a consisté sur ce point à «zoner» l'espace étudié à 2 niveaux. Un premier niveau aboutit à la délimitation de secteurs écologiques (MANIL, 1963 ; LONG, 1974-75), définis par le type géomorphologique et la nature des formations superficielles (glacis limoneux, plaine sableuse, etc.), par l'exposition (ou le microclimat) et par le type physionomique de la végétation (steppe à *Rhanterium suaveolens*, scrub à *Ziziphus lotus*, etc.). L'unité élémentaire, de second niveau, doit être cartographiable (reconnaissance aisée sur le terrain et éventuellement sur photographie aérienne) et fonctionnelle (intégration de facteurs interactifs importants pour le fonctionnement). Nous avons retenu le système écologique au sens de TANSLEY (1946). Les critères retenus pour l'établissement de la clé de cartographie des systèmes écologiques dans la zone de Zougrata, ont été le mode d'utilisation du sol (parcours, culture, etc.) et l'état de dégradation de la couverture végétale et des horizons de surface du sol. Ainsi, 22 systèmes écologiques ont été caractérisés par leur flore, par leur végétation (recouvrement des espèces dominantes ou de catégories d'espèces) et par leur sol (nature, texture, profondeur, etc.). Pour les systèmes écologiques les plus importants, il a été procédé à des mesures : phytomasse aérienne, rendements des cultures dans les milieux cultivés et quelques caractéristiques physico-hydriques des sols (réserve utile, coefficient de ruissellement, etc.). Sur quelques unités des systèmes écologiques les plus étendus, des stations de mesure permanentes ont été installées qui permettent ainsi un suivi de l'évolution et la mise en relation de la production des parcours avec les conditions hydriques des sols (FLORET et PONTANIER, 1982). C'est l'ensemble de ces données qui constitue la légende de la carte des systèmes écologiques (FLORET *et al.*, 1978). Le tableau I est un extrait de cette légende et il contient les paramètres utiles à la présente analyse.

À cette représentation synchrone des systèmes écologiques, il importe d'ajouter la dimension dynamique qui permet la prise en compte des évolutions possibles. La végétation naturelle joue un rôle capital dans le piégeage du sable et de la matière organique (FLORET *et al.*, 1977 ; LE HOUÉROU, 1959, 1969 ; BENDALI, 1987 ; LE HOUÉROU, 1987) et sur le ruissellement et l'infiltration de l'eau (BOURGES *et al.*, 1984 ; FLORET et PONTANIER, 1984). Les relations dynamiques entre systèmes écologiques ont été étudiées au niveau de la dégradation de la couverture végétale (surpâturage, éradication) ou au niveau de la dégradation des horizons superficiels des sols (déflation suite au surpâturage ou à la mise en culture). Une fois dépassé un certain seuil de dégradation, ces systèmes ne peuvent revenir à leur état initial. Il s'ensuit une possible accentuation des processus érosifs qui entraîne la mobilisation d'éléments solides (sables, limons) et qui modifie à terme les sols et leur bilan hydrique. On a ainsi établi le diagramme des relations dynamiques entre les divers systèmes écologiques de la région (fig. 2). Les causes, la nature et l'intensité des phénomènes de transformation ont aussi été prises en compte. Les superficies occupées par les divers systèmes écologiques sont donc soumises à des fluctuations dans le temps, en relation en particulier avec le niveau de perturbation que représente la pression humaine sur les ressources naturelles et l'espace.

Étude de l'évolution des surfaces occupées par ces systèmes

Nous avons procédé, en 1975, à un levé cartographique exhaustif, à l'échelle 1/25 000, exprimé dans une carte au 1/50 000 (FLORET *et al.*, 1978). Les levés ont été effectués en utilisant les clichés de 1963, les limites des unités étant vérifiées sur le terrain afin d'obtenir un document actualisé (1975). Cette carte sert de base à la partie de cette étude qui concerne l'ensemble des superficies occupées par les systèmes écologiques à Zougrata entre 1975 et 1985.

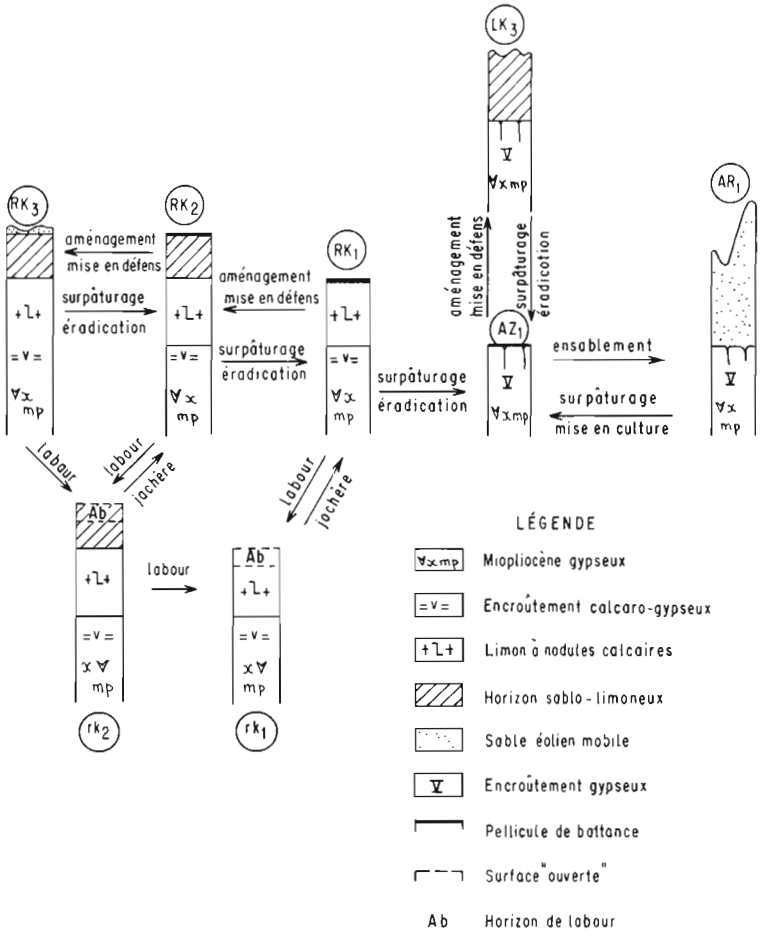


Figure 2 - *Exemples de relations dynamiques entre les systèmes écologiques (voir tableau I) des steppes sableuses de la région de Zougrata, en fonction des perturbations anthropiques.*

Par ailleurs, nous avons pu effectuer des prises de vue aériennes, au printemps 1975 (échelle approximative des photos : 1/8 000). Nous avons procédé au tirage au sort de 6 zones élémentaires, de tailles et d'orientations variables, qui représentent une superficie totale de 5 000 ha, soit 6,15 % de la superficie totale, ce qui est relativement élevé par rapport aux pratiques courantes dans ce domaine (LANLY, 1969). Sur les clichés, nous avons porté au hasard une grille orthogonale de points. La maille de la grille était adaptée de façon à permettre la lecture de 1 000 points pour l'ensemble des zones élémentaires retenues. Chaque point était donc considéré comme représentant une surface homogène de 5 ha.

Les points repérés sur les photographies de 1975 ont été ensuite soigneusement repérés sur les clichés de 1948 et de 1975 et analysés. Le même repérage n'a pu être complet sur la couverture de 1985 ; les clichés de cette année étaient de mauvaise qualité, ce qui a réduit la précision de l'analyse. Aussi, pour les données de 1985, avons-nous procédé principalement à des contrôles de terrain, sur les zones élémentaires, afin d'apprécier les changements survenus.

RÉSULTATS

Une première analyse concerne l'évolution de la mise en culture (tabl. II).

Entre 1948 et 1985 les surfaces défrichées ont triplé ; en fait, la pression ne s'est pas manifestée de la même façon sur l'ensemble des systèmes écologiques. Ce phénomène a donc été analysé en fonction du type de substrats. Les résultats qui concernent l'évolution des superficies des systèmes écologiques de la région figurent sur le tableau III. Les milieux alluviaux non salés, les mieux alimentés en eau à partir du ruissellement et qui présentent les meilleurs sols, étaient déjà cultivés en majorité en 1948. Avec la sédentarisation progressive, la mise en culture a gagné les zones où il était possible aisément de s'approvisionner en eau (puits de surface et citernes des glacis limoneux de piémont). Puis la culture s'est ensuite étendue jusque dans les plaines sableuses.

En un point donné, le passage d'un système écologique à un autre s'accompagne de changements profonds dans la composition floristique, la biomasse et la production pastorale, mais aussi dans les caractéristiques physico-hydriques des sols, qui se déstructurent, s'érodent et s'ensablent (BENDALI *et al.*, 1986), etc. D'une manière générale, l'ensemble de leurs propriétés tend à se dégrader : les eaux s'infiltrent de moins en moins bien dans des sols dont l'épaisseur se réduit de plus en plus ; en un mot, l'aptitude à absorber et à stocker l'eau régresse.

Tableau II - Évolution du pourcentage des terres défrichées et mises en culture à Zougrata entre 1948 et 1985.

	1948	1963	1975	1985
% de la surface totale mise en culture	13,9	31,2	38,2	41,6

On propose d'utiliser les données du tableau III pour tenter de chiffrer la baisse de potentiel physique et biologique.

.En ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques des sols, on utilise les notions de RU (mm) et de Ke %, soit :

- RU = réserve en eau utile pour la végétation ; cette variable intègre bien les variations d'épaisseur (troncature ou apport) des horizons et les degrés d'organisation (structuration et déstructuration) des sols ; on la note sous la forme suivante :

$$RU = \int_0^z dz(\Theta_{CC} - \Theta_{PF}) \text{ (mm)}$$

où :

Θ_{CC} et Θ_{PF} = les humidités volumiques qui correspondent respectivement à la capacité au champ et au point de flétrissement (avec Θ_{CC} = - 0,5 et Θ_{PF} = - 1,6 MPa)

Ke % = coefficient d'efficacité annuel de la pluie pour la recharge des réserves en eau du sol ;

on le note :

$$Ke = \frac{Pe}{Pt} \times 100$$

où :
Pe = pluie efficace infiltrée dans le sol (mm)
et Pt = pluie totale (mm).
Ces paramètres prennent toute leur signification lors des années pluvieuses.

Tableau III - Superficies estimées des divers systèmes écologiques de la zone test de Zougrata en 1948, 1963, 1975 et 1985 (surface totale : 81 260 ha)

SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES	ANNÉES			
	1948	1963	1975	1985
SD2	2 885	1 803	1 610	536
SD1		1 082	1 275	2 349
GD2	2 330	383	315	0
GD1		1 947	2 015	2 330
AZ2	9 905	2 588	2 070	0
AZ1		7 317	7 835	9 905
AA2	14 725	360	315	0
AA1		9 143	8 280	7 378
aa	1 820	7 042	7 950	9 167
LK3		1 617	1 475	0
RK3	36 348	5 793	5 010	513
RK2		7 151	5 495	4 718
RK1		15 384	14 433	10 428
rK2	6 213	11 120	13 230	7 407
rK1		1 470	3 850	11 223
AR2	162	243	200	0
AR1		0	85	875
ZR	2 334	440	255	245
zr	2 541	4 435	4 620	4 630
NS	575	575	575	575
PV	616	54	12	12
pv	753	1 313	1 355	1 355
RX2	non	non	non	3 119
RX1	observé	observé	observé	4 495

La détermination de RU et de Ke % pour chaque système écologique identifié (FLORET et PONTANIER, 1982), soit pour une année à pluviosité moyenne (150 mm), soit pour une année à forte pluviosité (250 mm), nous a permis de calculer des valeurs moyennes régionales pour ces 2 paramètres aux 4 dates de référence (tabl. IV). Les valeurs de Ke ont été déterminées entre 1969 et 1979.

Entre 1948 et 1985, on constate que l'accroissement de la mise en culture des terres et de la pression pastorale, ont fait baisser, sur l'ensemble des terres toujours exondées, la RU de 5,9 mm, ce qui correspond à une perte de capacité de stockage de près de 5 106 m³ sur l'ensemble de la zone test de Zougrata.

Tableau IV - Évolution du régime hydrique régional

		1948	1963	1975	1985
Valeur régionale moyenne de la réserve utile en eau des sols pour la végétation (RU en mm)		113,4	113,2	112,8	107,5
Perte de la capacité régionale de stockage en eau par rapport à 1948 (en 106 m³)		-	0,163	0,488	4,794
Coefficient régional moyen d'efficacité des pluies pour la recharge des réserves en eau du sol (%)*	*En année moyenne* (150 mm)	91,38	91,02	91,17	89,34
	En année pluvieuse (250 mm)	76,9	76,1	76,2	72,7
Quantité moyenne annuelle d'eau perdue par ruissellement et d'eau accumulée dans les garaet et bas-fonds (106 m³)*	*Année moyenne* (150 mm)	9,625	10,027	9,860	11,903
	Année pluvieuse (250 mm)	41,874	44,461	44,293	50,714

* À l'exception des systèmes écologiques présentant Ke > 100 %.

Dans le même temps, le coefficient régional d'efficacité des pluies Ke baissait de 6 %, ce qui correspond à une perte supplémentaire en eau par ruissellement de près de 10 106 m³ en cas d'année pluvieuse (250 mm).

Par ailleurs, il est intéressant de noter que les nuisances liées à la surexploitation du milieu ne se font pas sentir tout de suite. En effet, les grands bouleversements dans la gestion de l'espace ont eu lieu entre 1963 et 1975. Ce n'est qu'aujourd'hui que les conséquences sont les plus nettes. Durant la décennie 1969-1978, malgré de fortes perturbations, les systèmes écologiques ont montré une relative stabilité, certainement favorisée par des années climatiquement favorables. Depuis 1982, sans que la pression se soit particulièrement accrue, on constate une nette détérioration des propriétés hydrodynamiques de la région : fort ruissellement, forte évaporation, réduction de RU, etc.

.En ce qui concerne la réduction de la production végétale, celle-ci est également liée aux pertes en eau par ruissellement, plus importantes sur des sols tronqués avec pellicule de battance en surface que dans les situations avec une couverture végétale satisfaisante. La production végétale en année pluvieuse (tabl. V) constitue, en plus de la RU et du coefficient de ruissellement, un excellent critère pour juger du niveau de dégradation d'une région. Nous avons retenu comme paramètres de référence (tabl. I), les valeurs mesurées entre 1970 et 1975 (FLORET *et al.*, 1978) :

- pour les parcours, la partie consommable de la production de la végétation spontanée en année pluvieuse exprimée en kg $MS.ha^{-1}.an^{-1}$;

Tableau V - Évolution dans le temps de la production végétale consommable (PVC) et de la production d'orge (grains) de la zone test de Zougrata en année pluvieuse

		1948	1963	1975	1985
PVC	Production tonnes M.S.	51 230	40 504	38 756	36 766
	% par rapport à prod. 1975	132	104	100	94
ORGE	Production en quintaux	78 565	186 416	218 130	222 520
	% par rapport à prod. 1975	36	85	100	102

- pour les cultures, la production de céréales-grains en année pluvieuse exprimée en q.orge ha.an^{-1}.

Lors de la dernière période analysée (1975-1985), la décroissance (en pourcentage) de la production végétale consommable est nettement plus rapide que la progression de la production de grains (orge). Le phénomène est encore plus grave car en 1985, par exemple, année favorable sur le plan des précipitations, il s'est bien produit une extension des nouveaux défrichements pour mise en culture, mais les emblavures en céréales n'ont pas concerné toutes les superficies précédemment défrichées. Ainsi dans le tableau II, il apparaît qu'en 1985, 41,6 % des terres de la région étaient défrichés alors que les emblavures ne concernaient approximativement que 24 % de la même superficie. Ce phénomène était déjà très nettement visible, sur de nombreuses photographies aériennes, dès 1963 et en 1975, mais il s'est accentué. Il semble lié à la troncature des sols, qui rend la culture de moins en moins intéressante par réduction des rendements, mais également au fait que la population locale ne peut assurer les emblavures et surtout la récolte sur des superficies aussi importantes.

CONCLUSIONS

La comparaison des données des divers tableaux, et en particulier des tableaux II, III, IV et V, montre que la pression sur l'espace et sur les ressources s'est maintenue à un niveau raisonnable entre 1948 et 1963 et qu'elle est devenue excessive par la suite. Jusqu'aux années soixante, on peut considérer que l'impact de l'homme ne conduisait pas à une destruction des équilibres écologiques, malgré les irrégularités interannuelles de cet impact, liées à une certaine augmentation des surfaces cultivées au cours des années pluvieuses.

Depuis une vingtaine d'années, la mécanisation de la céréaliculture avec défrichement des steppes sableuses peut être considérée comme une véritable perturbation anthropique, puisque les équilibres sol-végétation ont été rompus et que la production végétale a diminué ; ceci a entraîné une dégradation du bilan hydrologique et une aridification du milieu.

Actuellement, la mise en culture est tellement intégrée au mode d'utilisation des ressources, que l'on peut se demander s'il s'agit encore d'une perturbation. Les effets sur les systèmes écologiques des zones sableuses ont été tels, avec formation de zones dunaires, que les surfaces mises en culture pourraient même tendre à diminuer. On semble être entré dans une période où de nouveaux équilibres s'installent, avec des niveaux de production évidemment inférieurs à ce qu'ils étaient par le passé.

Il serait nécessaire maintenant d'envisager une démarche, certainement coûteuse, d'aménagement de l'espace, afin de mieux gérer les ressources hydriques. Les eaux de pluie qui ruissellent sont très difficiles à maîtriser, en raison de leur caractère aléatoire en volume et en distribution dans le temps. Cependant, elles peuvent être récupérées par de petits ouvrages de surface, dont les techniques de construction sont bien connues (EL AMAMI, 1984). Ces ouvrages permettent une «supplémentation » en eau qui représente entre 0,25 et 3 fois la pluviosité annuelle. Par ailleurs, cette eau est de bonne qualité pour l'agriculture (résidu sec < 1 $g.l^{-1}$). Une grande partie de ces eaux sera cependant gaspillée, surtout durant les années à pluies abondantes où le volume des eaux de ruissellement ne peut pas être utilisé en totalité. La figure 3 présente, localisés pour Zougrata, un certain nombre de ces aménagements possibles.

Pour limiter l'érosion, la maîtrise du ruissellement doit être envisagée ; mais il est également nécessaire de réduire la déflation éolienne. On peut, en particulier, utiliser des outils et des techniques de travail du sol moins agressifs (HUYN VAN NHAN, 1982 ; KHATTALI, 1981). On peut encore, si les conditions économiques le permettent (périmètres irrigués), augmenter artificiellement la rugosité du paysage par l'installation de brise-vent (BALDY, 1986).

Pour certains milieux, où les sols ont encore une bonne épaisseur, la végétation a été trop dégradée pour qu'elle puisse se régénérer d'elle-même en l'absence de semenciers. Il convient alors de reconstituer des formations par semis et par plantations, à partir des espèces locales intéressantes raréfiées. Cette remise en végétation, qui ne peut réussir que lors d'années à pluviosité exceptionnelle, fait actuellement l'objet de recherches. Cette technique de réhabilitation coûteuse devra s'accompagner d'un mode d'utilisation rationnelle des parcours améliorés reconstitués.

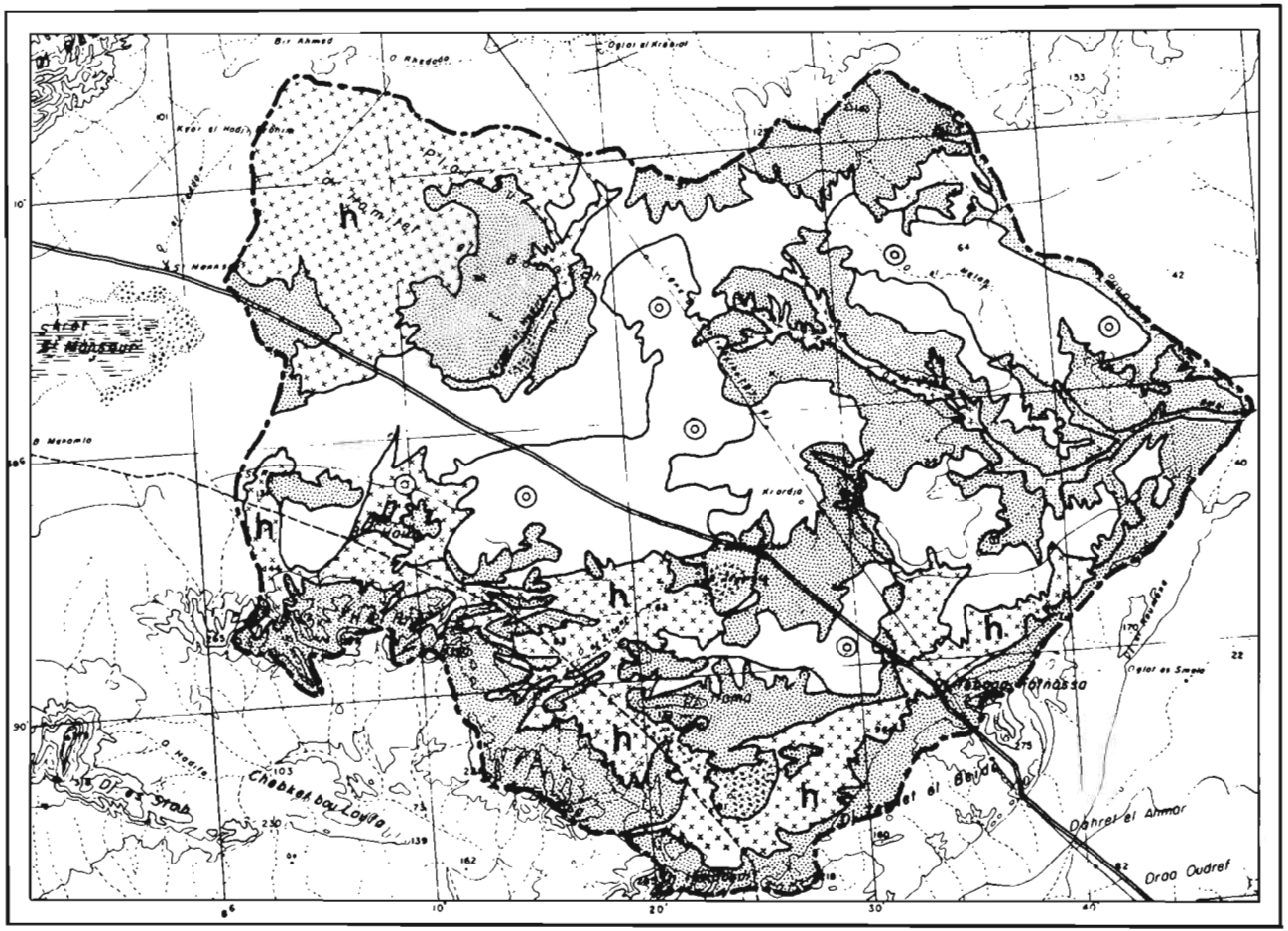
L'aridification du milieu, liée aux perturbations naturelles (sécheresse prolongée par exemple) et anthropiques (sédentarisation, surpâturage, mise en culture, déboisement, etc.) est un phénomène qui tend à se généraliser dans les zones arides (Nord du Sahara, Sahel, Nordeste brésilien, etc.).

NOY MEIR (1974) signalait déjà que les systèmes écologiques de la zone aride méditerranéenne devenaient moins résilients et très sensibles aux périodes de sécheresse en raison de la sédentarisation.

En effet, dans des conditions de pressions anthropiques faibles et même moyennes, les systèmes écologiques des zones arides présentent une certaine stabilité et/ou résilience vis-à-vis des contraintes saisonnières naturelles (inondations, pluviosité déficitaire, feu, etc.), et même vis-à-vis de certaines perturbations prolongées. Cette situation est celle qui a prévalu jusque vers les années cinquante dans la zone concernée par la présente étude de cas.

Actuellement, en zone aride nord-africaine, comme dans de nombreuses autres zones très dégradées sous bioclimat aride, il devient pratiquement impossible, les écosystèmes en bon état faisant défaut, de conduire des études relatives aux propriétés fonctionnelles et structurelles et aux seuils de tolérance aux perturbations anthropiques, seuils en deçà desquels les systèmes écologiques peuvent encore récupérer leurs potentialités antérieures (FROST *et al.*, 1986).

Sur le plan hydrique, la situation s'aggrave de décennie en décennie, et l'espérance d'années favorables sur le plan de la pluviosité ne signifie plus forcément l'espoir de


Bir Ahmed
Oglat el Krabiat
Kyor el Hadjar
Oued Hamiat
Chott
El Mehsoub
Oued Nemomia
Kiordia
Oglat es Smeda
Oued Nedjia
Dj. ez Zrab
Chebket bou Lowia
Dhrat el Ahmar
Drao Oudref
10°
20°
30°
40°

Zones traditionnellement cultivées en céréales de façon épisodique (glacis limoneux). Possibilités de travaux de conservation des eaux et des sols.

Zones de vocation pastorale - Milieux sableux de plaine, sensibles à l'érosion, très percolants.
- Milieux de collines et de glacis à encroûtements calcaires où la culture est impossible (lithosols).

Zones optimales pour les cultures annuelles maraichères et fourragères (cultures de décrue) et pour les plantations d'arbustes fourragers. Zones d'épandages d'oueds et dépressions semi-endoreïques.

h Zones où les aménagements de petite hydraulique de surface (jessours, tabias, épandage de crues, citernes, etc., sont localement possibles.

◎ Zones susceptibles d'être irriguées localement.

FIGURE 3 - *Carte schématique de localisation des aménagements possibles des ressources hydriques dans la zone de Zougrata.*

productions agricole ou pastorale favorables, l'efficacité de l'eau ayant même tendance à diminuer dans ce cas-là. C'est donc dans la recherche de nouveaux équilibres du partage de la ressource hydrique par les végétaux spontanés ou cultivés que se trouve l'une des solutions de lutte contre l'aridité dans ces terres récemment dégradées.

C. FLORET et É. LE FLOC'H : *écologues*, CEFE-CNRS, BP 5051, 34033 Montpellier cedex, France
R. PONTANIER : *pédologue*, ORSTOM, 7 rue Teimour, Tunis-El Menzah 1 1004, Tunisie

BIBLIOGRAPHIE

BALDY (C.), 1986. - Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides. Inra, Paris, 114 p.

BENDALI (F.), 1987. - Dynamique de la végétation et mobilité du sable en Jeffara tunisienne. Thèse université Sc. techn. Languedoc, Montpellier, 243 p.

BENDALI (F.), EL HAMROUNI (A.), FLORET (C.), LE FLOC'H (É.) et PONTANIER (R.), 1986. - Végétation et fixation des sables en zone aride. Actes du séminaire organisé dans le cadre du projet pilote de lutte contre la désertification dans le Sud tunisien. MAB - PNUE, Ira, Djerba, 24-29 nov. 1986. Unesco FP/6201-85-03 : 49-114.

BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (J.) et PONTANIER (R.), 1984. - Dynamique de l'eau sur un glacis du Sud tunisien (Type Segui). Document Cepe/CNRS, Montpellier ; ORSTOM, Tunis, 86 p.

DEBUSSCHE (M.), RAMBAL (S.) et LEPART (J.), 1987. - Les changements de l'occupation des terres en région méditerranéenne humide : évaluation des conséquences hydrologiques. *Acta Oecol. Acta Applic.* 8(4) : 317-332.

EL AMANI (S.), 1984. - Les aménagements hydrauliques traditionnels de Tunisie. CRGR, Tunis, 69 p.

FLORET (C.) et LE FLOC'H (É.), avec la collaboration de MM. ROMANE (F.), LEPART (J.) et DAVID (P.), 1973. - Production,sensibilité et évolution de la végétation et du milieu en Tunisie présaharienne. Conséquences pour la planification de l'aménagement régional de la zonet est d'Oglat Merteba, Inst. nat. rech. agron. de Tunisie et Centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier. N° 71, 45 p. 6 cartes noir, 34 cartes couleur.

FLORET (C.), LE FLOC'H (É.), PONTANIER (R.) et ROMANE (F.), 1977. - Contribution à l'étude de cas sur la désertification région d'Oglat-Merteba, Tunisie. Conférence des Nations unies sur la désertification, Nairobi (1977). Extrait et adapté du document A/CONF. 74/12 : 3-93 et 130-143 (français et anglais).

FLORET (C.), LE FLOC'H (É.), PONTANIER (R.) et ROMANE (F.), 1978. - Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement de Zougrata. Inst. rég. arides, Médenine, Dir. ress. eau et sol, Tunis, *Doc. techn.* n° 274 : 1 carte h.-t.

FLORET (C.), LE FLOC'H (É.), PONTANIER (R.) et ROMANE (F.), 1978. - Simulation of the impact of differents levels of human pressure on the grazing lands of southern Tunisia. Proceeding of the International Rangelands Congress, August 14-18, 1978, Denver, Colorado : 52-54.

FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), PONTANIER (R.) et ROMANE (F.), 1981. - Dynamique de systèmes écologiques de la zone aride. Application à l'aménagement sur des bases écologiques d'une zone de la Tunisie présaharienne. *Acta Oecologica/Oecol. Applic.*, 2(3) : 195-214.

FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 150, Paris, 544 p.

FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1984. - Aridité climatique, aridité édaphique. Bull. Soc. bot., Fr., 131, *Actual. bot.* (2/3/4) : 265-275.

FROST (P.), MÉDINA (E.), MENAUT (J. C.), SOLBRIG (O.), SWIFT (M.) et WALKER (B.), 1986. - Responses of savannas to stress and disturbance. IUBS. Unesco/Mab, Biology International. *Special ISSVE* - 10. 82 p.

HUYN VAN NHAN, 1982. - Utilisation des eaux de ruissellement dans le Sud tunisien. *Bulletin technique de l'Ira*, n° 2, Médenine, 106 p.

KHATTALI (H.), 1981. - Recherches stationnelles sur la désertification dans la Jeffara tunisienne. Dynamique de l'érosion éolienne. Thèse 3e cycle univ., Paris-I, 218 p.

LANLY (J.-P.), 1969. - Régression de la forêt dense en Côte-d'Ivoire. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques*, n° 127 : 45-59

LE HOUÉROU (H.-N.), 1959. - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. Végétation, 281 p., tabl.; 2e vol.- La Flore : 229 p. ; 1 pochette cartes et tableaux.

LE HOUÉROU (H -N.), 1969. - La végétation de la Tunisie steppique. *Ann. Inst. nat. rech. agron.* Tunisie. 42(5), 624 p. et 1 carte couleur 1/500 000.

LE HOUÉROU (H.-N.), 1987. - Agroforestry and sylvopastoralism to combat land degradation in the mediterranean basin : old approaches to new problems. Workshop on desertification Madrid may 1987, 14 p.

LONG (G.), 1974-75. - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. Tome I (1974) : Principes généraux et méthodes. Paris, 256 p. et Tome II (1975) : Application du diagnostic phyto-écologique. 222 p. Masson & Cie. Paris.

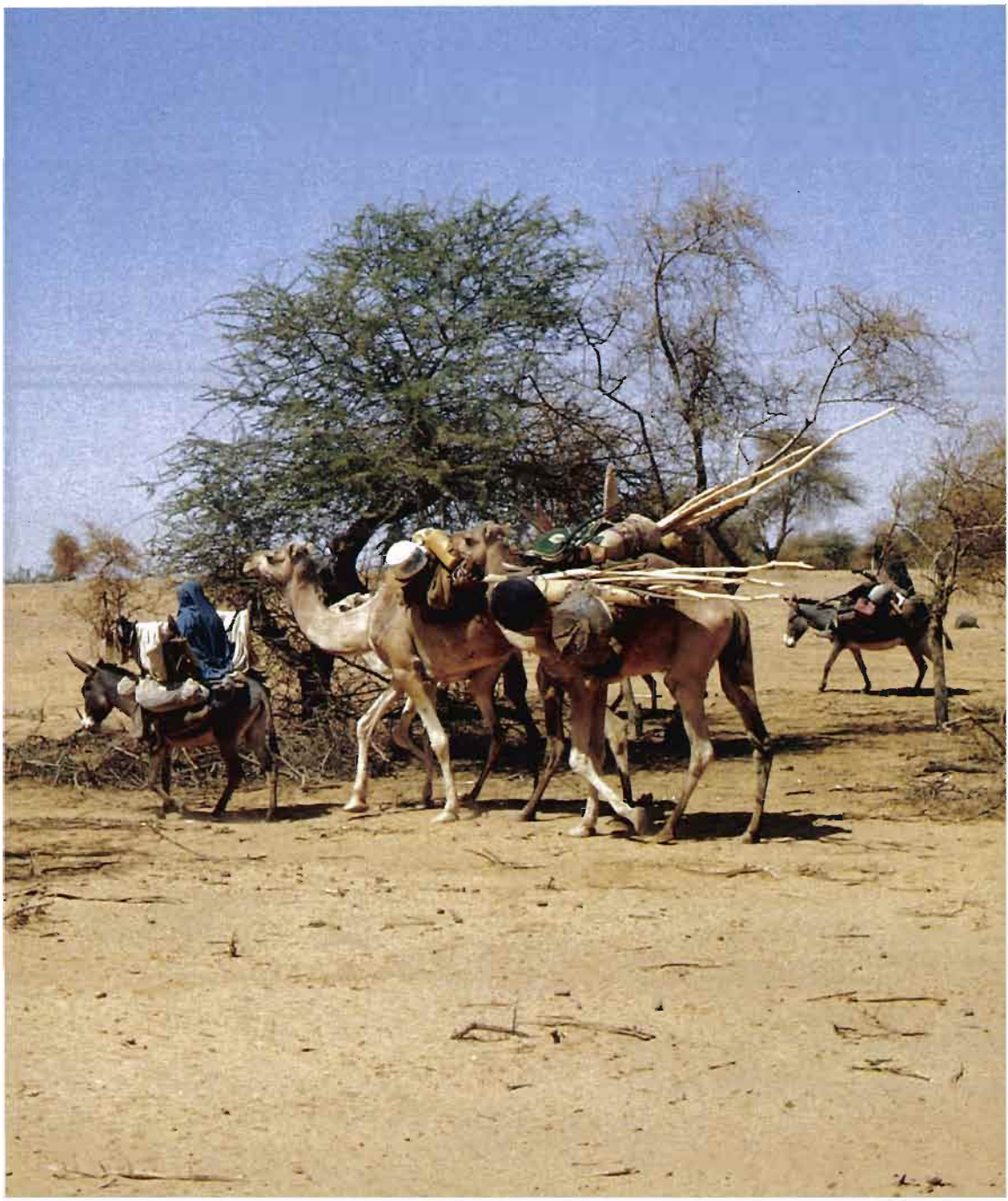
LONG (G.), 1979. - Les bases écologiques du développement de l'espace rural méditerranéen. Zones rurales marginalisées. *Le Courrier du CNRS.*, 31 : 17-25.

MANIL (G.), 1963. - Niveaux d'écosystème et hiérarchie de facteurs écologiques. Un exemple d'analyse dans les hêtraies ardennaises de Belgique. *Bull. Sci. Acad. roy.* Belgique, 49, 6,(32) : 603-623.

NOY MEIR (I.), 1974. - Stability in arid ecosystems and the effects of man on it. In Cove A.J. (eds). Structure, Functionning and Management of Ecosystems. Proc. of the first international congress of Ecology : 220-225. Wangeningen Pudoc.

TANSLEY (A. G.), 1946. - Introduction to plant ecology. 2nd. cd. 1949. Unwin Bros Ltd. London, 260 p.

Troisième partie



☜ *Photo* : É. Le Floc'h
Nomadisme dans le Gourma, Mali

Stratégies des sociétés et des États

La faiblesse et l'irrégularité des précipitations et, d'une façon générale, des ressources hydrauliques constituent la contrainte majeure à l'exploitation agricole des zones arides. Face à cette contrainte, les sociétés humaines ont développé des stratégies dont l'histoire et la géographie font apparaître un certain nombre d'invariants ou de comportements types, modulés cependant par la diversité du milieu physique et surtout par le stade de développements économique et technologique de ces sociétés.

L'irrigation, c'est-à-dire la mobilisation de ressources hydrauliques en vue de satisfaire les besoins en eau des cultures, constitue certainement une des stratégies les plus générales qu'ont adopté les sociétés rurales pour s'adapter à l'aridité du climat. Comme le montre Job, *c'est également une des plus anciennes puisqu'en Mésopotamie, berceau des grandes civilisations hydrauliques, c'est aux alentours de 6000 ans avant J.-C. que l'on a commencé à irriguer les cultures. Dans son article, très documenté,* Job *décrit à la fois l'évolution des formes de mobilisation de l'eau dans cette région, mais aussi le contexte qui a permis le développement de l'irrigation ainsi que les problèmes qu'elle a entraînés, parmi lesquels la salinisation des sols n'est pas un des moindres.*

Cette analyse des aménagements hydroagricoles en Mésopotamie, sur une grande profondeur historique, met en lumière un certain nombre de caractéristiques et de conditions de l'irrigation qui permettent de mieux comprendre la réussite ou l'échec des aménagements hydroagricoles entrepris plus récemment dans d'autres régions arides du monde. Ainsi, dès le début, apparaît l'intérêt d'une complémentarité entre cultures pluviales et cultures irriguées qui a été insuffisamment prise en compte dans les projets d'irrigation d'Afrique de l'Ouest et qui explique en partie leur faible réussite. Dans ces régions, comme dans la plupart des plaines alluviales, on retrouve les mêmes étapes dans les modes d'utilisation de l'eau qui vont de la culture de décrue à des aménagements assurant une maîtrise de plus en plus grande de la distribution de l'eau avec, in fine, *la nécessité d'aménager les terres à la fois*

pour le drainage et pour l'irrigation comme cela se fait désormais dans les grands périmètres marocains.

Sont également rappelées les conditions du développement des grands systèmes d'irrigation, à savoir une densité de population importante, des capacités technologiques et un pouvoir politique suffisamment fort pour mobiliser travail et capital nécessaires à la construction et à l'entretien des aménagements hydrauliques. Comme l'a clairement montré BOSERUP *dans son étude sur l'évolution historique des systèmes agraires, l'irrigation en tant que moyen d'intensification de l'agriculture est mal adaptée aux zones de faible peuplement au pouvoir éclaté, ce qu'apparemment* BELINE *ignorait quand il a conçu son projet pharaonique d'aménagement hydraulique du delta mort du Niger.*

Enfin, l'histoire de l'irrigation en Mésopotamie nous rappelle que l'irrigation en zones arides s'accompagne généralement d'une salinisation des sols qui, si elle n'est pas contrôlée par le drainage, conduit à terme à la stérilisation des sols. Que des sociétés hydrauliques aussi expérimentées que celles du Tibre et de l'Euphrate n'aient pas réussi à résoudre correctement ce problème montre clairement l'importance de la contrainte qu'il représente.

La lutte contre l'aridité par l'irrigation prend des formes différentes en zone de montagne comme le montre BONVALLOT *dans son plaidoyer pour les* Jessour *en Tunisie du Sud et* LESOURD *dans son analyse fort détaillée de la mobilisation et de la valorisation des ressources hydrauliques au Cap-Vert.*

Le cas du Sud tunisien est intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord il nous montre comment une société rurale dans un contexte de forte aridité climatique a su élaborer un système de mobilisation des eaux particulièrement bien adapté aux caractéristiques de ce milieu. Grâce à des aménagements de talweg contrôlant le ruissellement, les agriculteurs de la région ont su à la fois créer des sols et les irriguer, ce qui a permis le développement d'une agriculture d'oasis de montagne échelonnées le long des vallées.

Mais ces aménagements sont fragiles ; ils demandent soins et entretiens permanents et donc une main-d'œuvre importante. Cette condition a de plus en plus de mal a être assurée du fait de l'attraction des zones avoisinantes, économiquement plus développées, qui offrent une rémunération du travail plus élevée. Par ailleurs, les systèmes anciens sont progressivement abandonnés au profit d'aménagement plus frustres, des glacis et des piémonts, réalisés au tracteur qui permettent de contrôler par des digues fusibles les eaux de ruissellement sur de vastes parcelles.

Cette situation est particulièrement démonstrative de l'érosion progressive des systèmes agraires traditionnels à forte utilisation de main-d'œuvre dès lors qu'ils sont confrontés à des zones offrant une plus grande productivité du travail. Il est à craindre que la complémentarité qui pourrait exister entre systèmes anciens et nouveaux, et qui est à la base du plaidoyer de BONVALLOT, *ne suffise pas pour garantir la survie des aménagements traditionnels.*

Cette obsolescence économique qui frappe nombre de zones de montagne ne se constate pas dans l'archipel du Cap-Vert. La rareté des terres et de l'eau ainsi que l'absence de solution économique font que les paysans continuent à investir de grandes quantités de travail dans les aménagements hydroagricoles parmi lesquels on retrouve des dispositifs comparables aux jessour tunisiens.

Sur ces îlots montagneux et volcaniques à 500 Kilomètres des côtes africaines, la mise en valeur des terres par l'irrigation pose des problèmes qui dépassent largement la singularité du lieu. Comme ailleurs, s'affrontent logique d'État et logique privée dans les choix de production ; les grands propriétaires préfèrent la canne à sucre, plus rentable, mais dont le principal débouché est l'alcool, tandis que l'administration s'efforce de développer des cultures maraîchères et arboricoles pour le marché intérieur dont la capacité d'absorption est toutefois limitée.

Plus qu'ailleurs, du fait en particulier du relief, le coût des aménagements hydroagricoles paraît disproportionné par rapport aux revenus que l'on peut en attendre. Mais, comme dans la plupart des pays africains, cette absence de rentabilité économique des aménagements, suivant les normes des bailleurs de fonds, n'a pas jusqu'ici conduit à les interrompre. Ceci est probablement dû au caractère de don que prennent formellement ou pas, les financements externes de ces aménagements, et au fait que l'irrigation est la réponse la plus concrète que les gouvernants peuvent apporter aux besoins alimentaires d'une population particulièrement nombreuse.

Lorsque l'aridité du climat s'accentue, on assiste à une régression, voire à une disparition, des cultures au profit de l'élevage nomade et transhumant que MILLEVILLE *définit très justement comme «une activité de cueillette par animal interposé». La mobilité des hommes et des troupeaux devient alors la stratégie de base pour s'adapter à la forte inégalité spatio-temporelle des ressources pastorales et hydrauliques.*

C'est cette stratégie de mobilité que MILLEVILLE *analyse très finement, à partir d'enquêtes faites dans l'Oudalan au nord-est du Burkina Faso. La typologie des déplacements journaliers des troupeaux qu'il propose, constitue une clef de lecture particulièrement utile pour comprendre l'évolution des modes de conduite des troupeaux au fil des saisons et leurs longues marches entre les deux pôles de leur survie : l'herbe et l'eau. En même temps, sont mises en évidence les conditions de cet élevage pastoral : un espace non borné, non approprié, une subordination des cultures à l'élevage et de grands troupeaux.*

L'évolution récente du Sahel, accentuée par les sécheresses récurrentes de ces vingt dernières années, a fortement altéré ces conditions au point que l'on peut s'interroger avec l'auteur sur la pérennité de cet élevage transhumant. On note en effet une tendance à l'homogénéisation des comportements qui conduit les éleveurs à devenir agriculteurs tandis que les agriculteurs deviennent à leur tour éleveurs. Si cette tendance se confirmait, c'est toute la physionomie du Sahel qui en serait profondément modifiée.

Sur le même thème, la contribution de BERNUS *apporte un éclairage particulier à travers l'analyse de l'impact des politiques d'hydraulique pastorale sur la gestion des parcours. Ces politiques ont donné lieu à de*

nombreuses interprétations et elles ont suscité de vives polémiques. L'analyse faite par BERNUS *des interventions effectuées dans plusieurs pays du Sahel permet de se faire une idée plus précise et surtout plus circonstanciée de l'impact de ces politiques.*

D'une façon générale, elles débouchent sur un remodelage des formes d'utilisation de l'espace pastoral. Mais leurs conséquences sont très différentes suivant qu'elles conduisent à une amélioration ponctuelle de l'abreuvement des troupeaux comme au Nord burkinabé, ou au contraire à une amélioration régionale de celui-ci par la création de puits ou de forages régulièrement répartis dans l'espace, comme dans le Ferlo sénégalais.

Dans le premier cas, les interventions peuvent effectivement se révéler néfastes en engendrant des conflits entre les usagers traditionnels et ceux qui sont attirés par les nouveaux puits ou forages. Elles s'accompagnent d'un surpâturage et d'une dégradation de la périphérie du point d'eau conduisant, paradoxalement, à un éloignement des éleveurs et de leurs troupeaux d'autant plus grand que l'eau est abondante !

Dans la seconde situation, ces effets pervers n'apparaissent pas, du fait de la dispersion géographique des points d'eau.

C'est en définitive la nature de la répartition spatiale de la ressource hydraulique qui détermine les conséquences de son aménagement sur la gestion des parcours. Mais dans tous les cas, il est souligné la nécessité d'associer les populations locales à ces aménagements hydrauliques afin de permettre à ces populations de conserver le contrôle social de leurs ressources même si la mobilité des populations pastorales ne facilite pas la réalisation d'un tel objectif.

Les deux dernières contributions de ROOSE *et de* MONCHALIN *se proposent d'analyser et d'évaluer les politiques et les modalités d'intervention qui visent une meilleure utilisation des ressources hydrauliques en zones arides et plus particulièrement en Afrique de l'Ouest.*

Le premier met surtout l'accent sur la lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols. Il montre, à travers l'étude comparée de situations particulières, la grande variabilité de l'intensité de ces phénomènes et la diversité des techniques traditionnelles et modernes adoptées pour les contrôler et pallier leurs effets néfastes.

C'est l'occasion pour l'auteur de porter un jugement sévère sur les différentes méthodes adoptées jusqu'ici dans la lutte contre le ruissellement et l'érosion, et de proposer une nouvelle méthode de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. Cette méthode s'inspire largement de la démarche recherche-développement expérimentée ces dernières années en matière de développement rural, dans la mesure où elle prévoit une identification préalable des problèmes, une expérimentation in situ *des solutions qui peuvent leur être apportées et une participation active des populations à l'ensemble de la démarche.*

De telles options correspondent bien aux nouvelles formes d'intervention que l'on s'efforce d'adopter dans les projets de gestion des ressources naturelles qui se mettent en place dans de nombreux pays du Sahel. Mais si un consensus est en voie de s'établir sur cette nouvelle approche, en revanche les modalités de sa mise en œuvre dans le cadre de la lutte contre l'érosion posent un certain nombre de problèmes concrets que peu d'expériences de terrain ont su correctement résoudre.

La valorisation des ressources hydrauliques en zones arides ne se limite pas au contrôle du ruissellement, elle passe aussi par toute une gamme d'interventions dont MONCHALIN *dresse un bilan très exhaustif pour l'Afrique soudano-sahélienne.*

Il rappelle, fort opportunément, l'importance de l'adaptation des cultures pluviales à l'aridité. En effet, compte tenu des superficies qu'elles représentent, toute amélioration de ces cultures, même limitée, peut avoir un grand impact sur la sécurisation alimentaire des pays de la région.

Cela étant, en ce qui concerne les moyens pour y parvenir, l'introduction de variétés améliorées à cycle court s'est souvent revélée décevante car l'extériorisation de leur potentiel nécessite une amélioration préalable des techniques culturales.

L'analyse qui est faite des politiques de conservation des eaux et des sols entreprises jusqu'ici, tout en étant moins pessimiste que celle menée par ROOSE, *souligne cependant, comme lui, la nécessaire participation des agriculteurs aux opérations d'aménagement de leurs terroirs.*

Parmi celles-ci, la mise en valeur des bas-fonds représente un domaine d'intervention particulièrement stratégique dans la lutte contre l'aridité au Sahel, au point que le gouvernement du Niger en a fait un thème central de sa politique d'intervention pour atténuer les effets de la grande sécheresse de 1983-84. Mais MONCHALIN *insiste très justement sur la nécessité d'investir dans la connaissance du fonctionnement hydrologique de ces bas-fonds pour éviter de graves déboires lors de leur mise en valeur.*

L'intérêt de ces bas-fonds est multiple : ils permettent une diversification des productions, fournissent travail et revenus à une période complémentaire de celle des cultures pluviales. Ils peuvent même, comme au Mali, contribuer à l'approvisionnement en riz des villes et à un coût bien plus faible que celui des grands périmètres d'irrigation dont c'est pourtant l'objectif principal.

En dépit de ressources hydrauliques non négligeables, MONCHALIN *souligne que les rythmes d'équipement actuels des grands périmètres ne permettront pas d'atteindre l'objectif ambitieux de 600 000 hectares irrigués en l'an 2000 au Sahel. Il en analyse fort bien les raisons et l'on retrouve en particulier cette loi générale qui veut que l'irrigation ne devienne une solution acceptable pour les agriculteurs que lorsque leurs systèmes de production traditionnels ne permettent plus de satisfaire leurs besoins. D'où la nécessité, non seulement de faire participer les sociologues aux projets d'aménagement hydroagricole comme le recommande l'auteur, mais surtout d'analyser et de comprendre la dynamique des systèmes agraires des zones concernées par ces projets.*

Enfin, sont clairement abordés les problèmes économiques posés par le développement de l'irrigation. Celui-ci est conditionné par la garantie de prix stables et rémunérateurs, ce qui, pour les céréales, ne va pas sans une certaine protection de la production nationale, contrairement aux recommandations de certains bailleurs de fonds.

Sur le plan macro-économique, pas plus qu'au Cap-Vert, les aménagements hydroagricoles du Sahel continental ne sont rentables à court et à moyen termes. Le seront-ils à long terme ? Ce serait présomptueux de l'affirmer, cependant, les nouvelles stratégies d'intervention, basées sur un transfert de responsabilité de l'État vers les communautés rurales,

permettent d'espérer une amélioration des conditions de mise en valeur de ces aménagements. Néanmoins, beaucoup de chemin reste à faire pour qu'en Afrique de l'Ouest l'irrigation constitue une réponse adaptée à la lutte contre l'aridité et permette de répondre aux besoins alimentaires d'une population en forte croissance ; mais peut-être est-ce précisément cette croissance qui rendra un jour possible cette solution.

Philippe JOUVE : *agronome*, Cnearc, BP 5098, 34033 Montpellier cedex

Jean-Olivier JOB

Les premiers aménagements hydroagricoles en Mésopotamie et les problèmes de sels

INTRODUCTION

À partir du Xe millénaire, l'environnement climatique et physiographique du Proche-Orient est propice à l'émergence de l'agriculture. Les civilisations qui se succéderont le long des cours d'eau vont maîtriser les 2 grandes contraintes du milieu, l'aridité et le caprice des fleuves.

La région comprise entre les sources du Tigre et de l'Euphrate et leur embouchure est un endroit privilégié pour suivre l'évolution des techniques agricoles depuis leurs tout premiers débuts, en particulier celle de l'irrigation. Cet espace possède en effet une continuité culturelle exceptionnelle. Chacune de ses unités jouera un rôle particulier dans l'histoire de l'agriculture. Sur les contreforts des montagnes, seront récoltées les premières espèces de graminées comestibles. Dans la plaine, s'épanouiront les premières grandes civilisations hydrauliques - Sumer, Babylone, Assour -, suivies par beaucoup d'autres jusqu'à nos jours.

Notre objet est de montrer d'abord que l'agriculture irriguée s'est insérée dans un ensemble de techniques agricoles déjà élaborées. Ensuite que l'acquisition de ce nouveau mode de culture ne s'est pas opérée sans problèmes et que toutes les difficultés n'ont pas été maîtrisées avec un égal bonheur. Notamment, celle de la salinisation des sols, qui s'est manifestée très tôt et qui est restée, depuis, un problème majeur.

LE CADRE GÉOGRAPHIQUE

La plaine mésopotamienne (fig. 1) est bordée au nord par l'Anti-Taurus, à l'est par les monts Zagros, au nord-est par les montagnes de l'Arménie. De là, le Tigre et l'Euphrate descendent les piémonts de l'Anti-Taurus, traversent le désert syrien et, dans la région marécageuse du Hor al-Hammar, confluent pour former le Chatt al-`Arab qui aboutit au golfe Persique, près de Fao.

Entre montagne et plaine s'étire un vaste piémont irrégulier, dit «savane à pistachiers», qui se prolonge à l'ouest au-delà de la Mésopotamie en longeant les chaînes méditerranéennes. 3 unités géographiques et culturelles s'y distinguent :

- la haute Mésopotamie, où les 2 fleuves connaissent des fortunes diverses ; le Tigre dévale les piémonts du Zagros, avec une pente plus forte et un débit plus élevé que l'Euphrate qui rejoint la plaine plus doucement. C'est le domaine de la protoagriculture. La pluviométrie y dépasse 400 mm, le climat est de type méditerranéen ;
- la moyenne Mésopotamie, berceau des grandes civilisations hydrauliques, déjà évoquées. La pluviométrie y varie de 100 mm, en bordure du désert syrien, à 300 mm,

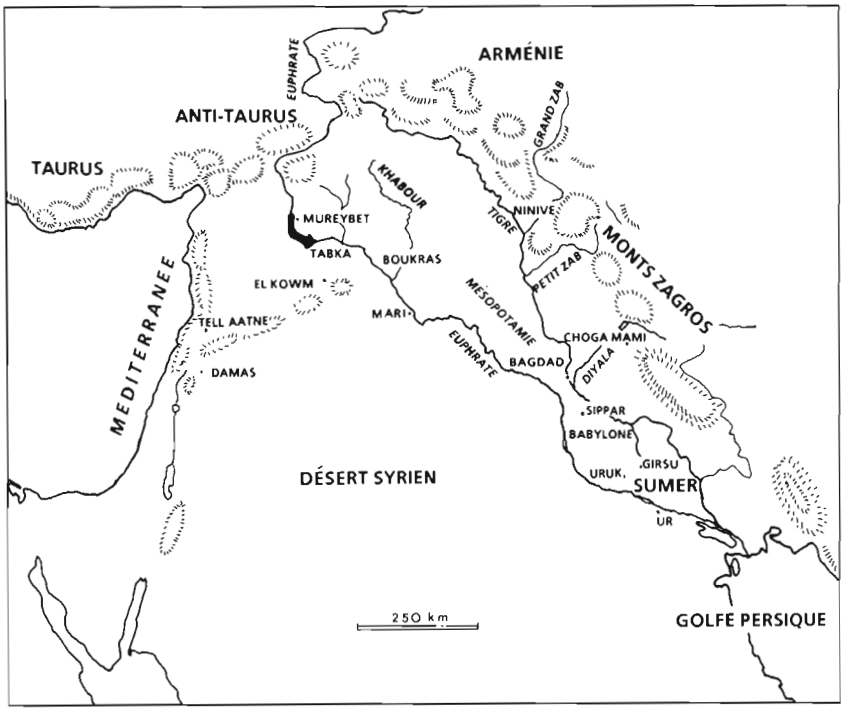


FIGURE 1 - *Carte de localisation.*

sur les premiers piémonts du Zagros, avec une moyenne de 200 mm, entre les 2 fleuves ;

- les vastes marécages du Hor al-Hammar et le domaine fluvio-marin qui s'ouvre sur le golfe Persique.

LE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION

Les conditions de son apparition

Vers 5 500 av. J.-C., après l'agriculture, en complément de la chasse et de la cueillette, le besoin d'irriguer les cultures se fait sentir, alors qu'apparaît la céramique. L'agriculture sort de la zone nucléaire initiale (Cauvin, 1987) pour gagner la plaine. De Boukras à El Kowm, près de l'actuelle Palmyre en Syrie, par exemple, il y a moins de 100 km, mais le climat plus aride aurait rendu l'irrigation nécessaire à la culture des fèves, attestée à cet endroit. Les populations qui occupaient les sites où l'on soupçonne à cette époque une agriculture irriguée ont pu migrer facilement vers les piémonts qui en étaient proches, tout en conservant leur unité culturelle et leurs acquis techniques (Cauvin, 1978, 1981, 1987).

C'est à Choga Mami, dans le bassin de la Diyala, sur les piémonts du Zagros et sous une pluviométrie actuelle de 200 mm, que les plus anciens signes d'agriculture irriguée sont identifiés, sous forme de canaux d'épandage de crues.

Très vite, l'irrigation reposera sur un travail hiérarchisé dont on pense qu'il a existé au Néolithique céramique des civilisations de Halaf et d'Obeid. Des signes d'agriculture irriguée se manifestent un peu partout le long des fleuves : à Tepe Sabs (Khuzistan), Tell es Sawwan (Mésopotamie moyenne) et peut-être à Bouqras (haut Euphrate). L'étude des photos aériennes confirme que l'irrigation commence à partir d'un coude du fleuve où le bourrelet de berge est entaillé, puis l'eau canalisée à travers la dépression pour être ensuite répandue sur les parties basses. la région de Babylone en offre de bons exemples (BURINGH, 1958).

Là encore, les nouvelles techniques agricoles apparaissent dans des zones marginales, souvent des vallées secondaires, qui réunissent les conditions requises. D'abord un milieu culturel réceptif, qui possède déjà une bonne connaissance de la culture non irriguée ; ensuite un environnement incitatif, du fait de l'inaptitude à la culture non irriguée de ces milieux.

Les conditions de son développement

Dans le bas de la vallée, la platitude du paysage et l'absence d'affleurements rocheux sont les premières caractéristiques importantes. les sols sont des alluvions à texture fine, limoneux le plus souvent (AL ZUBAIBI et PAGEL, 1974). Il s'ensuit une architecture en terre. Chaque ville, dont les abords immédiats sont occupés par les champs, se reconstruit sur elle-même au gré des destructions qui marquent inévitablement chaque guerre. Il se forme ainsi dans le paysage des monticules de terre appelés tells qui deviennent une composante principale du paysage. Il y en a plusieurs centaines le long de l'Euphrate et de ses affluents et peut-être un millier dans l'ensemble de la Mésopotamie. Les implantations humaines se font en bordure de fleuve sur les levées, comme dans la région de Sippar, ou sur les terrasses non inondables, comme à Mari (GEYER, 1985).

L'abondance des levées de limon, vestiges des anciens canaux, est l'autre trait morphologique notable du paysage mésopotamien. Ceux-ci sont quelquefois hauts de 5 à 7 m, comme celui d'Al Gharraf, sur le Tigre, construit par un primat de Lagash au IIIe millénaire (BURINGH, 1958). Ils perdurent dans le paysage. XÉNOPHON mentionne d'ailleurs, près de Sippar, les restes d'une digue qui sera retrouvée en 1867, puis étudiée en détail au niveau de Sippar-Amanum (Tell ed Deir) à mi-chemin entre le Tigre et l'Euphrate. Les fouilles montrent que les digues ont été débordées et rehaussées 3 fois en deux cents ans, nécessitant 600 000 m^3 de terrassement (DE MEYER *et al.*, 1984).

Les chroniques royales confirment l'existence de canaux d'irrigation, dont la construction et l'entretien est un des événements marquants des règnes ; les exemples en sont nombreux. HAMMOURAPI fait recreuser le lit de l'Euphrate, vers Sippar, NABUCHODONOSOR procède de même à Babylone. À l'époque assyrienne, ASSURNASIPAL II (883-859) ordonne la construction du système d'irrigation Canal du grand Zab à 10 km au sud de Nimrud. Enfin, SENNACHERIB fait protéger les périmètres de Ninive à Arbela (FORBES, 1965). De plus, on peut penser qu'un certain nombre de canaux, enfouis, échappent à l'inventaire car le niveau de la plaine actuelle s'élève de 3 m, à Ur, et de 12 m, à Diyala, au-dessus du niveau de base cultivé à la période d'OBEID (4000 av. J.-C.).

L'irrigation nécessite donc des travaux considérables qui modifient le paysage. Elle ne se généralise dans la plaine que lorsqu'il existe une classe de techniciens capables d'assurer la gestion des périmètres et l'entretien des canaux. C'est donc une technique associée au développement des villes, d'une part, et une activité organisée, d'autre part, qui ne peut s'épanouir que dans un contexte où les connaissances techniques et même scientifiques le permettent.

LE CONTEXTE CULTUREL

Les terres appartiennent d'abord au temple qui assure l'entretien des canaux et des digues en levant les corvées (DESHAYES, 1969). Peu à peu, l'urbanisation renforce le rôle centralisateur du prince-prêtre qui organise la gestion des périmètres et la collecte des impôts.

Les documents écrits confirment l'importance de l'agriculture irriguée dans la société sumérienne. Dans l'écriture d'abord, à la période proto-urbaine d'Uruk III (3000 av. J.-C.), le signe du champ est représenté par une parcelle irriguée (ANDRÉ-LEICKMAN, 1983). Dans le vocabulaire, le fermier est appelé l'homme des fossés, de la digue et des champs (KRAMER, 1983). La vision du monde agricole est placée sous le signe de l'irrigation qui est devenue une composante culturelle principale. Les civilisations mésopotamiennes sont des civilisations de l'eau. Elles sont aussi des civilisations de la terre. C'est l'argile qui fournira le matériau de base à l'invention du calcul et, jusqu'à la fin de la période assyrienne, l'argile sera le support unique des textes écrits.

La brique de terre crue est aussi bien le matériau de l'architecture royale que celui des petites constructions domestiques. Ses propriétés sont certainement connues de tous et, tous les ans, chacun renouvelle l'enduit de sa maison (AURENCHE, 1981).

Les connaissances ne sont pas seulement le fait de l'individu, mais celui d'une société. Le système, très élaboré, de taxation des terres conduit les Babyloniens anciens à proposer les premières listes des types de sols rencontrés dans l'aire de juridiction des collecteurs d'impôt foncier.

En effet, pour les besoins de la taxation des terres, l'akkadien distingue une terre cultivable (*qaqurru*), une terre non cultivable (*hurbu*) et une jachère (*niditum*). Le même champ porte des noms différents selon qu'il est simplement cultivable, plus précisément préparé pour la culture ou effectivement mis en culture. Pour les taxes d'irrigation, une distinction est opérée entre les terres proches du fleuve (soumises à Bamatu) et celles qui en sont plus éloignées (*shebshe, d'après* SCHWAB, 1983) ; ces dernières, composées d'éléments plus fins, étaient moins faciles à drainer et, par conséquent, moins taxées.

Il existe donc un cadre d'évaluation des sols qui tient compte de l'aptitude à la culture et d'une sommaire différenciation sur les qualités physiques et même chimiques des sols. Les Sumériens, puis les Babyloniens, utilisent deux dénominations pour distinguer les sols salés bruns déliquescents, qui contiennent peut-être du chlorure de calcium (*sabakh*), des sols à efflorescence sèche à chlorure de sodium dominant (*shura* en akkadien, *d'après* JACOBSEN, 1982).

Au début du IIe millénaire, l'agriculture irriguée est donc intégrée dans un système cohérent de connaissances capable d'en ressentir les risques à défaut de pouvoir les mesurer.

LES RISQUES DE SALINISATION

Dans les systèmes primitifs

Dans les systèmes d'irrigation par captage au niveau d'un coude du fleuve, les bassins sont subdivisés au maximum pour tirer plus de profit de l'eau. Il n'est plus possible alors de les drainer. Sur des sols limoneux avec une nappe peu profonde, les conditions sont réunies pour que les sols se salinisent.

Dans les systèmes ultérieurs

Les grands travaux, comme ceux entrepris au début du IIe millénaire par ENTEMENAK, roi de la ville de Girsu, permettent d'irriguer avec des quantités plus importantes d'eau. Les risques de salinisation sont alors importants. les registres d'imposition du temple de Girsu, soigneusement revus par JACOBSEN (1982) sur une période de trois siècles en donnent un exemple particulièrement bien documenté. Sous URUKAGINAK (2400 av. J. -C.), le temple perd une superficie de 3 ha rendue impropre à la culture à cause des sels. Des rapports similaires montrent qu'entre la période de Sargon d'Agadé et celle de la IIe dynastie d'Ur, soit trois cents ans après, les parcelles cadastrées sous le nom de Ugig, se sont salinisées, leur rendement en orge décroissant de 2500 $l.ha^{-1}$ à 1400 $l.ha^{-1}$ seulement. Ce dernier chiffre correspond à peu près aux normes actuelles dans la région.

Les terres gérées par le temple de Girsu sont cultivées en 3500 av. J.-C. à parts égales en orge et en blé. Puis, la proportion de blé diminue régulièrement pour ne plus représenter que 15 %, en 2400 av. J.-C., 2 %, en 2100 av. J.-C., et disparaître complètement en 1700 av. J.-C. L'orge résistant mieux à la salinisation des terres que le blé, on voit qu'il y a eu très tôt une adaptation aux problèmes de sels.

Le déclin de la IIIe dynastie d'Ur, après 2100 av. J.-C., est en grande partie attribuée à la salinisation des terres. JACOBSEN (1982) y voit les raisons du déplacement du centre culturel et historique de la Mésopotamie vers le Nord, moins affecté par le sel.

LA MAÎTRISE DES RISQUES

D'autres raisons ont été invoquées pour expliquer le déclin des sociétés hydrauliques : organisation sociale insuffisante (MC GUIRE GIBSON, 1974), ruptures de digues, décadence du pouvoir central (FORBES, 1965), ou atterrissement (SCHILSTRA, 1962). Il n'empêche que la salinisation des sols est un phénomène général et permanent.

En effet, l'évapotranspiration potentielle est supérieure à 2000 mm sur toute la moyenne et la basse Mésopotamie (AL ZUBAIDI et PAGEL, 1974 ; DOSSO, 1980). À partir de Bagdad et vers le sud, la nappe phréatique se rapproche de la surface. L'irrigation fait monter le niveau de la nappe au-dessus d'un certain niveau critique ce qui induit des remontées capillaires et l'évaporation en surface. Il se forme alors, en surface, une pellicule de sels qui se dissout à l'irrigation suivante dans le sol ; avec la poursuite du cycle, la teneur en sels des sols augmente peu à peu. À l'heure actuelle, 70 % des sols de la basse Mésopotamie sont plus ou moins affectés par les sels. Les risques de dégradation de la structure par alcalinisation sont heureusement limités. Les sols ont peu d'argile, donc des capacités d'échange faibles. Ils contiennent souvent du gypse et toujours 20 à 30 % de carbonate de calcium fin. Dans la région de la Diyala, les pratiques agricoles de l'Antiquité étaient l'économie de l'eau, qui minimise les remontées de nappe, et la jachère, qui aurait permis aux espèces halophiles, principalement *Alhaji maurorum,* d'assécher la surface du sol sur une épaisseur suffisante pour éviter les remontées capillaires (MC GUIRE GIBSON, 1974). De plus, les techniques qui permettent de limiter l'évaporation étaient connues au milieu du IIe millénaire, en particulier les ombrages protecteurs (KRAMER, 1983). À cette époque, l'almanach des travaux n'a rien à envier aux traités modernes ; en juillet, on desherbe, de septembre à octobre, on laboure en 3 fois, puis on sème, et on ramasse les mottes ; de novembre à février, on donne 4 irrigations. La première à l'émergence des tiges, puis lorsque le sol est couvert de végétation «comme une natte au fond d'une barque» (KRAMER, 1983), ensuite après

l'apparition de la deuxième feuille et enfin à maturation, mais cette dernière est facultative.

Les surfaces possédées sont minimes, 5 ha au plus (JOANNES, 1986). Un contrat de vente à Tell ed Deir, daté de 1720 av. J.-C., permet de se faire une idée de la taille des parcelles : «1 ha 300 de terrain situé à Kar-Shamash dans un district d'irrigation à côté du champ de Shamash-Rabi [...] à côté du champ de Belshunu [...] sa face étant la voie d'eau du nom d'Ajabu, son arrière étant le canal d'irrigation Balala» (KRAMER, 1983). Le cadastre est précis, les techniques agricoles sont légères, les semis clairs. Les rangs sont espacés de 75 cm et, à Girsu, on employait la semence à raison de 25 à 90 $l.ha^{-1}$, soit 2 à 6 fois moins qu'aujourd'hui.

On peut donc supposer que l'irrigation des petites parcelles ne faisait pas courir de grands risques aux sols. Au chadouf, l'exhaure obligatoire partout où les terres cultivables surplombaient le fleuve, n'est d'ailleurs pas de nature à produire des apports d'eau excessifs.

LA PERMANENCE DU PROBLÈME

Les sociétés qui ont développé l'agriculture irriguée ne l'ont pas fait sous la pression du climat. Elles ont utilisé cette technique lorsque les villes se sont établies en bordure des fleuves, à un moment où leurs connaissances agronomiques étaient étendues. Elles ont eu deux millénaires pour assimiler l'usage de l'eau. Tout donnerait à penser que cette mutation aurait dû s'opérer sans problème. Pourtant, elles n'ont pas échappé au problème de stérilisation des sols par le sel, cause majeure d'échec agricole et raison de migration des populations qui doivent vivre à proximité de leurs ressources agricoles.

Il est frappant de constater que dans cette même région, le problème demeure entier de nos jours. En Iraq on estime que 70 % des 8 millions d'hectares de sols irrigués au sud de Bagdad sont salés (AL ZUBAIDI et PAGEL, 1974). L'orge s'y cultive de nos jours avec des rendements de 600 à 1 800 $l.ha^{-1}$ (DIELEMAN, 1977), guère meilleurs qu'à l'époque de la IIIe dynastie d'Ur. Dans la partie syrienne de l'Euphrate, la mise en eau du barrage de Tabka, sur le cours supérieur de l'Euphrate en Syrie, a permis la mise en irrigation d'une superficie équivalente à celle qui a été inondée par le lac de retenue après dix année de fonctionnement soit 55 000 ha. On espère tripler cette superficie dans les tranches en cours, mais l'objectif de 640 000 ha, que s'était fixé le gouvernement, est loin d'être atteint (MÉTRAL, 1987). Dans la basse vallée se pose le problème des sels. Devant l'ampleur du problème et le besoin pressant de nouvelles terres à cultiver, l'effort se porte sur la partie nord du bassin, moins susceptible d'être affectée, et les populations préfèrent s'y établir. L'histoire des terres du temple de Girsu recommence, avec des moyens techniques considérables et des effets qui se font sentir plus vite.

CONCLUSIONS

Une si grande permanence des problèmes n'est pas pour rassurer et donne à réfléchir. Le sel est une composante du paysage avec laquelle les compromis sont limités. Parmi les espèces végétales utiles, seules quelques-unes sont résistantes. Pour les autres cultures, comme le coton, les fèves, il faut soit se contenter de rendements minimes, soit éliminer les sels. On élimine les sels en conduisant l'eau des drains en dehors du circuit des sols cultivés. Plusieurs exutoires sont possibles.

Les dépressions naturelles ont été les premières utilisées. Les sels s'y évaporent et forment des sebkhas. L'eau est perdue et les sels sont partiellement recyclés par le vent ou par les pluies. Ce système très en vogue aux premiers siècles de notre ère fonctionne encore de nos jours.

Beaucoup plus tard, lorsque les machines ont permis de creuser des fossés, les eaux de drainage ont été rejetées dans le fleuve. Ce système recycle les sels qui se retrouvent un peu plus concentrés vers l'aval.

Récemment, on a proposé de réinjecter les eaux des drains dans des stockages souterrains (basse vallée de l'Euphrate en Syrie).

Une solution idéale serait l'élimination des sels du paysage tout en conservant l'eau, comme la désalinisation et le recyclage des eaux de drainage par exemple. Ce sont des techniques chères, utilisées uniquement pour l'alimentation en eau des villes des régions du golfe, au Koweït entre autres. Pour appliquer ces techniques à l'agriculture, il faudrait soustraire du paysage des quantités importantes de sels, de l'ordre d'une dizaine de tonnes par hectare. De ce fait, elles seraient limitées à de faibles surfaces, à proximité des villes, pour des cultures à haute valeur ajoutée.

Elles auraient au moins le mérite de résoudre partiellement un problème vieux de six mille ans.

J.-O. Job : *pédologue*, ORSTOM, 7 rue Teimour, Tunis el Menza 1 1004, Tunisie

Bibliographie

AL ZUBAIDI (A. H.) et PAGEL (H.), 1974. - Chemical characteristics of some Iraki soils. *Beït, zur Trop.*, Landwirt., ünd Veter., vol. 3 : 9-322.

ANDRÉ-LEICKMAN (B.), 1983. - Naissance de l'écriture. Édition de la Réunion des musées Nationaux, Paris.

AURENCHE (O.), 1981. - Préhistoire des sociétés hydrauliques du Proche-Orient ancien. «L'homme et l'eau en méditerrannée et au Proche Orient.» Sous la direction de J. Métral et P. Sanlaville. Tome I : le milieu. GIS Maison de l'Orient, Lyon.

BETHEMONT (J.), 1982. - Sur les origines de l'agriculture hydraulique. «L'homme et l'eau en méditerranée et au Moyen-Orient.» Tome II : Aménagements hydrauliques : 7-30.

BURINGH (P.), 1958. - Living conditions in the lower mesopotamian plain in ancient times. *Sumer*, vol. XIII, n° 1-2 : 30-57.

CAUVIN (J.), 1978. - Les premiers villages de Syrie-Palestine du IXe au VIIe millénaire av. J.C. La Maison de l'Orient, n° 4, Maison de l'Orient, Lyon.

CAUVIN (J.), 1981. - Le problème de l'eau au Proche-Orient. De l'homme prédateur aux premières sociétés hydrauliques. «L'homme et l'eau en Méditerranée et au Proche-Orient.» Sous la direction de J. Métral et P. Sanlaville. Tome I : le milieu. GIS Maison de l'Orient, Lyon.

CAUVIN (J.), 1987. - Mureybet et les origines de l'agriculture. *Archeologia, dossiers histoire et archéologie*, n° 122 : 22-26.

COHEN (M. N.), 1977. - The food crisis in prehistory, overpopulation and the origin of agriculture. Yale Un., Press, New Haven.

DE MEYER (L.), 1977. - La septième campagne de fouilles à Tell-ed-Deir (1975). *Sumer* vol. XXXIII, n° 1 : 128-134.

DE MEYER (L.), GASHE (H.) et TANRET (M.), 1984. - Tell El Der : la vie en Babylonie il y a 4 000 ans. *Archeologia*, n°195 : 4-28.

DESHAYES (J.), 1969. - Les civilisations de l'Orient ancien. Les grandes civilisations, Arthaud, Paris.

DIELEMAN (P. J.), 1977. - Reclamation of salt affected soils in Irak. ILRI pub., n° 11, Wageningen, Hollande.

DOSSO (M.), 1980. - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate. Thèse doct. ing., Univ. de Toulouse.

FORBES (R. J.), 1965. - Studies in Ancient Technology. Vol. II, Leiden.

GENTELLE (P.), 1978. - Étude géographique de la Plaine d'Aï Khanoun et de son irrigation depuis les temps antiques. *Public de l'URA*, n° 110, CRA CNRS, Paris.

GEYER (B.), 1985. - Géomorphologie et occupation du sol de la moyenne vallée de l'Euphrate dans la région de Mari. "MARI 4", Édit. Recherches sur les civilisations, Paris.

JACOBSEN (T.), 1982. - Salinity and Irrigation in Antiquity. Dyala Basin archaeological projects : Report on essential results, 1957-58, Undena Publications, Malibu.

JACOBSEN (T.) et ADAMS (R.), 1958. - Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture. *Science*, vol. 128, n° 3334 : 1251-1258.

JOANNES (F.), 1986. - Les archives d'une famille babylonnienne. *Archéologie*, n° 219 : 56-61.

KRAMER (S. N.), 1983. - L'histoire commence à Sumer. Arthaud éd., Paris.

MC GUIRE GIBSON, 1974. - Violation of fallow and engineered disaster in Mesopotamian civilisation. Irrigation impact on Society, ch. 1 : 1-6, Downing T.E. and Gibson McGuire ed.

MÉTRAL (F.), 1987. - L'homme et l'eau en méditerranée et au Proche-Orient. Tome IV : l'eau dans les techniques. Gis, Maison de l'Orient, Lyon.

SCHILSTRA (J.), 1962. - Irrigation as a soil and relief-forming factor in the Lower Mesopotamian Plain. *Netherland J. of Agic. Sci.*, vol. 10, (3) : 179-193.

SCHWAB (D. E.), 1983. - Some agricultural and meteorological terms in akkadian. *Sumer*, vol. XXXIV, n° 1-2 : 146-169.

Éric Roose

Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols

Influence du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale

INTRODUCTION

L'érosion est un concept qui recouvre plusieurs processus naturels très variables dans le temps et dans l'espace : l'arrachement de particules solides, leur transport et leur sédimentation. L'érosion normale est généralement lente, de l'ordre de quelques tonnes par kilomètre carré et par an, mais elle connaît des soubresauts catastrophiques, les glissements de terrain par exemple. Pendant des siècles, un versant peut rester stable, puis, à la suite d'une longue série d'averses, glisser en entraînant avec lui des arbres centenaires ou des villages. L'érosion accélérée se développe sous l'effet des activités de l'homme : le surpâturage, l'extension des défriches et des cultures à des zones fragiles, les feux répétés, les techniques culturales mal adaptées, la réduction de la jachère et le déséquilibre du bilan des nutriments et des matières organiques aboutissent plus ou moins rapidement à la dégradation des couvertures végétales et pédologiques. Ce mode déséquilibrant d'exploitation du milieu entraîne le développement du ruissellement et de différentes formes d'érosion (en nappe, en ravine, en masse, etc.) en fonction de causes et de facteurs différents.

Cependant, si l'homme augmente les risques d'érosion par ses techniques maladroites, on peut néanmoins espérer que chaque communauté rurale, par l'adaptation progressive de son système d'exploitation aux conditions écologiques, parvienne, au bout d'un certain temps, à mettre au point des stratégies qui lui permettent de maîtriser son environnement.

Dans cette note, nous passerons rapidement en revue les stratégies traditionnelles et modernes de lutte antiérosive. Devant l'échec actuel de celles-ci, nous proposerons une nouvelle stratégie, la gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols (GCES), fondée sur l'analyse des besoins des paysans, démarche ascendante qui leur permette de résoudre eux-mêmes leurs problèmes d'environnement. Nous analyserons ensuite la fragilité du milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale et la diversité des stratégies de gestion de l'eau développées par différentes ethnies en relation avec diverses situations écologiques. Nous suggérons de fonder sur cette diversité les projets d'intensification de la production dans le cadre d'une gestion conservatrice du milieu.

LES STRATÉGIES EN PRÉSENCE

La culture itinérante a été pratiquée sur tous les continents à une époque où la population était peu dense (20 à 40 hab.km^{-2} en fonction de la richesse du sol et du climat). Après défrichement, on cultive sur les cendres et on abandonne la terre dès qu'elle ne rend plus assez pour le travail fourni. Pour que le système reste équilibré, il faut une réserve de terre considérable. Si la pression démographique augmente, le temps de jachère diminue et le sol se dégrade progressivement.

Les stratégies traditionnelles

Face à ces problèmes de dégradation des couvertures végétales et pédologiques, les générations successives ont développé différentes stratégies d'économie de l'eau et de gestion de la fertilité des sols en fonction des conditions écologiques et socio-économiques.

LES BILLONS, LES CULTURES ASSOCIÉES ET L'AGROFORESTERIE

Dans les zones forestières humides et volcaniques du Sud-Ouest du Cameroun, les Bamileke ont réussi à assurer un équilibre raisonnable du milieu malgré une forte population (150 à 300 hab.km^{-2}) en combinant les cultures associées, qui couvrent toute l'année de gros billons, à divers systèmes agroforestiers.

LES ALIGNEMENTS DE PIERRES, MURETTES ET FUMURE ORGANIQUE

Comme bien d'autres ethnies, les Dogons du Mali se sont jadis retranchés dans les falaises gréseuses de Bandiagara pour résister à l'influence musulmane. Pour survivre, ils ont dû développer toute une série de méthodes conservatoires :

- petits champs entourés de blocs de grès piégeant le sable en saison sèche et le ruissellement lors des pluies ;
- murettes de pierres et remontées de terre sableuse depuis la plaine pour créer des sols sur les dalles gréseuses qui font office d'impluvium ;
- structures en nid-d'abeilles qui servent d'unité de production pour des oignons irrigués à l'aide de calebasses ;
- paillage et compostage des résidus de culture, des déchets familiaux et des déjections animales.

LES GRADINS EN COURBE DE NIVEAU

Lorsque la population est dense, que la terre est rare et le travail manuel bon marché, on trouve souvent des gradins en courbe de niveau avec des canaux d'irrigation comme sur le pourtour méditerranéen, en Asie et en Amérique latine.

LES BOCAGES : ASSOCIATION ÉTROITE ENTRE LES CULTURES, L'ÉLEVAGE ET L'ARBORICULTURE

L'Europe a déjà connu plusieurs crises d'érosion. La plus connue se situe au Moyen Âge, lorsqu'il fallut abandonner la jachère naturelle, sous la pression démographique. Le travail du sol et l'enfouissement du fumier furent introduits pour restaurer plus vite

la fertilité chimique et physique des sols. On a associé l'élevage à la culture et on a cloisonné les paysages par une succession de bosquets, de prairies et de petits champs clôturés par des haies vives. On peut se demander si ce n'est pas vers ce type de solution qu'il faudrait tendre dans la frange soudano-sahélienne. Mais, actuellement, la mécanisation et l'industrialisation de l'agriculture, ainsi que la crise économique imposent une remise en cause de ces aménagements. Une nouvelle crise d'érosion se développe et il faut trouver de nouvelles stratégies de conservation des sols.

Des stratégies modernes d'équipement rural

Plus récemment se sont développées diverses stratégies modernes de lutte antiérosive.

La restauration des terrains de montagnes (RTM)

La restauration des terrains en montagne s'est développée en France à partir de 1850, puis dans les montagnes d'Europe où, pour protéger les plaines fertiles et les voies de communication, les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué les couvertures végétale et pédologique et corrigé les torrents par des techniques de génie civil et biologique (Lilin, 1986).

La conservation de l'eau et des sols (CES)

La conservation de l'eau et des sols cultivés, a été organisée aux États-Unis d'Amérique depuis 1930. L'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes, comme le coton, l'arachide, le tabac ou le maïs, dans les Grandes Plaines a déclenché une érosion catastrophique par le vent et par l'eau. En 1930, 20 % des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion.

Sous l'impulsion de Bennet (1939) s'est constitué un service de conservation de l'eau et des sols, présent dans chaque canton, pour conseiller et pour aider les fermiers qui demandent un appui technique et financier ; les services centraux effectuent les études et les projets.

Deux écoles s'affrontent encore aujourd'hui :

- l'une, à la suite de Bennet, observe que c'est le ravinement qui provoque les transports solides les plus spectaculaires ; or, le ravinement provient de l'énergie du ruissellement qui est fonction de sa masse et de sa vitesse au carré (E. Ruiss. = 1/2 MV^2). La lutte antiérosive s'organise donc autour des moyens de réduction de la vitesse du ruissellement et de sa force érosive (banquette de diversion, seuils et exutoires enherbés) sans réduire la masse de ruissellement au champs ;
- l'autre école, d'après les travaux de Ellison (1944), sur les processus de battance des gouttes de pluie, et de Wischmeier et Smith (1960), rappelle que le ruissellement se développe suite à la dégradation de la structure de la surface du sol par l'énergie des gouttes de pluie. La lutte antiérosive s'organise cette fois sur les champs autour du couvert végétal, des techniques culturales et d'un minimum de structures dans le paysage.

La défense et restauration des sols (DRS)

La défense et restauration des sols s'est développée en Algérie, puis autour du bassin méditerranéen entre les années quarante et les années soixante, pour faire face à de graves problèmes de sédimentation dans les retenues artificielles et de dégradation des

routes et des terres. Il s'agissait avant tout de mettre en défens les terres dégradées par le surpâturage et le défrichement et de restaurer leur potentiel d'infiltration par l'arbre, considéré comme le moyen le plus sûr d'améliorer le sol. D'énormes moyens mécaniques ont été mis en œuvre pour capter le ruissellement en nappe dans les terres cultivées (diverses banquettes, levés de Monjauze, etc.), pour reforester les terres dégradées et pour structurer des zones d'agriculture intensive (PLANTIE, 1961 ; MONJAUZE, 1964 ; GRECO, 1978).

La gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols (GCES) : une stratégie fondée sur le développement rural

Depuis 1975-1980, chercheurs, socio-économistes et agronomes ont élevé de nombreuses critiques pour constater l'échec fréquent des démarches d'équipement menées trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (LOVEJOY et NAPIER, 1986).

Aux États-Unis, malgré cinquante ans de travaux remarquables des services de CES, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, limite de tolérance sur les sols profonds.

Au Maghreb et en Afrique de l'Ouest, les paysans préfèrent souvent abandonner les terres aménagées par l'État plutôt que d'entretenir des moyens de production dont ils ignorent l'objectif et la propriété (HEUSCH, 1986).

Les raisons évoquées des échecs partiels sont multiples (MARCHAL, 1979 ; LEFAY, 1986 ; REIJ *et al.*, 1986) :

- choix de techniques peu adaptées au sol, au climat, à la pente ;
- mauvaise planification ou réalisation peu soignée ou absence de suivi et d'entretien ;
- absence de préparation des bénéficiaires et rejet du projet à cause d'une perte de surface non compensée par l'augmentation des rendements ;
- désorganisation des unités de production (parcelles morcelées et isolées).

Aussi fallait-il développer une nouvelle stratégie ; la GCES prend mieux en compte les besoins des gestionnaires des terres (paysans et éleveurs) en proposant des méthodes qui améliorent à la fois la capacité d'infiltration du sol et les rendements ou la marge bénéficiaire (ROOSE, 1987). Avec, pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols, elle comporte 3 phases :

- *dialogues préparatoires* entre paysans, chercheurs et services techniques. Cette phase comprend 2 enquêtes pour localiser les problèmes, évaluer leur importance, leur cause et les facteurs sur lesquels on va pouvoir jouer pour réduire le ruissellement et l'érosion. Elle comporte aussi des «tours de champs», avec une communauté villageoise active pour développer leur sens de la responsabilité communautaire et découvrir la façon dont ils ressentent les problèmes de dégradation et les stratégies qu'ils mettent en œuvre en vue d'améliorer l'usage de l'eau, d'entretenir la fertilité des sols, de renouveler la couverture végétale et de maîtriser la divagation du bétail ;
- la deuxième phase met en place des *expérimentations sur les champs des paysans* pour quantifier et comparer les risques de ruissellement ou d'érosion et les gains de rendement sous différents types de mise en valeur ou de techniques culturales ;
- enfin un *plan d'aménagement global* doit être défini après trois à cinq ans de dialogue pour intensifier rationnellement l'exploitation des terres productives, pour structurer le paysage et pour fixer les ravines en privilégiant les méthodes biologiques simples, maîtrisables par les paysans eux-mêmes. Rien ne peut se faire sans l'accord préalable des paysans amenés à gérer l'ensemble de leur terroir.

Après ce rapide tour d'horizon des stratégies en présence, voyons comment s'organise la lutte antiérosive dans la zone semi-aride d'Afrique occidentale.

LES DIVERSES STRATÉGIES EN MILIEU SOUDANO-SAHÉLIEN D'AFRIQUE

Entre les énormes billons accumulés par les Sénoufo et le semis direct des Mossi du Yatenga, les stratégies d'économie de l'eau sont vraiment contrastées. Il n'est donc guère étonnant que l'imposition uniforme des méthodes de CES mises au point par BENNET (1939) dans la plaine américaine aboutisse à des échecs. Il convient par conséquent d'analyser la diversité des conditions écologiques dans la zone étudiée avant de décrire la diversité des stratégies mises au point par divers groupes ethniques.

Le milieu soudano-sahélien est fragile et diversifié

Sous cette appellation globale, on peut distinguer 4 régions écologiques (tabl. I) (P = pluviométrie moyenne annuelle) :

- la région sahélienne (P = 150 à 400 mm) ;
- la région sud-sahélienne (P = 400 à 700 mm) ;
- la région nord-soudanienne (P = 700 à 1 000 mm) ;
- la région sud-soudanienne (P > 1 000 mm).

Les précipitations annuelles décroissent donc de 1 200 à 150 mm vers le nord, mais elles ont diminué de 200 mm en moyenne ces dix dernières années. Les pluies tombent en trois à six mois avec des intensités très élevées (45 à 75 $mm.h^{-1}$ pendant trente minutes) en comparaison avec la faible capacité d'infiltration des sols battants (3 à 12 $mm.h^{-1}$). Les averses journalières atteignent 75 à 50 mm tous les ans, 120 à 90 mm tous les dix ans et 170 à 110 mm tous les cent ans (BRUNET-MORET, 1963). L'indice d'érosivité des pluies (fig. 1) «Rusa» diminue de 600 à 100 à mesure qu'on se rapproche du Sahel (ROOSE, 1980).

Les paysages les plus fréquents sur granite et sur grès (fig. 2) sont formés d'un plateau cuirassé plus ou moins vaste, d'un court éboulis de blocs, d'un long glacis gravillonnaire recouvert d'un voile sablo-limoneux de plus en plus épais, d'un bourrelet de berge et du lit mineur souvent encaissé. La majorité des pentes sont faibles (0,5 à 3 %) mais très longues. Elles peuvent être envahies par des dunes plus ou moins anciennes ou être plus raides sur roches basiques ou quartzitiques.

Les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés et hydromorphes en profondeur et les sols bruns plus ou moins hydromorphes ou vertiques de bas de pente sont pauvres chimiquement (carences N-P, parfois K, pH 6 à 4) et de structure instable (peu de matière organique, beaucoup de limons et sables fins). Dès qu'ils sont dénudés, il se forme en surface une croûte (de battance ou de sédimentation) très peu perméable. Après quelques années de cultures (coton, arachide, niébé, ou divers haricots qui alternent avec sorgho, maïs, mil, fonio) avec labour et 2 sarclo-buttages par an exécutés avec la traction animale, il se forme vers 12-15 cm une discontinuité peu pénétrable aux racines (compacité, pH, carence ou toxicité ?). Le pédoclimat est donc beaucoup plus sec encore pour les cultures que pour la végétation naturelle.

Les cultures couvrent mal le sol et laissent très peu de résidus. Les tiges de cotonnier sont brûlées ; les fanes d'arachide et autres légumineuses sont utilisées comme fourrage ; les feuilles de céréales sont broutées sur place et les tiges restantes sont utilisées pour quelques travaux artisanaux ou sont brûlées. Les jachères sont en voie de disparition, trop courtes et trop surpâturées pour régénérer efficacement la fertilité des sols.

La végétation, une savane arborée assez dense à l'origine, a été terriblement dégradée ces dernières années du fait du surpâturage, de l'extension des cultures, du ruissellement et de la baisse de niveau des nappes, des énormes besoins en bois de feu. Les troupeaux se sont beaucoup développés durant les années humides dans tout le Sahel ;

Tableau I - Diversification de la zone «soudano-sahélienne»

ZONE Pam exemple	SUD-SOUDANIENNE > 1000 mm Korhogo	NORD-SOUDANIENNE 1000 à 700 Koutiala	SUD-SAHÉLIENNE 700 à 400 Ouahigouya	NORD-SAHÉLIENNE 400 à 150 Gorom Mare Oursi
Références	CAMUS, 1976	B. MORET, 1963	B. MORET, 1963	CHEVALLIER *et al.*, 1982
Précipitation				
P annuel moyen	1 350	900	725	535
1969-1985	- 250	- 200	- 150	- 100
P mensuelle max.	318	250	207	177
P jour 1/1 1/10 1/100	76 - 119 - 169	62 - 107 -166	55 - 101 - 146	49 - 79 - 109
I_{30} 1/1 1/10	75 - 106	60 - 78	59 - 82	32 45
Rusa	675	420	360	260
Drainage calculé	156 à 468	10 à 180 mm	0 à 50	0
Densité en hab.km^{-2}	30 à 80	30 à 50/près de Koutiala	70 à >100	10 hab.km^{-2}
Sols du versant	ferrallitique SA ± gravillonnaire	ferrugineux lessivé SA ± gravillonnaire + vertisols + sols bruns sur roche basique	ferrugineux lessivé SA ± gravillonnaire + vertisols + sols bruns sur roches basiques	ferrugineux peu lessivé sur dunes ou nappes sableuses sur sol brun rouge subaride.
Végétation	Savane arborée *Daniella, Parkia Butyrospermum* + *Andropogon* + divers	Savane arborée *Parkia, Butyrosp.* + épineux + *Andropogon* + divers	Savane arbustive *Combretum*, baobab. Acacias et épineux + rares *Andropogon*.	Steppe, bush-Baobab, acacias *Balanites, Ziziphus*, graminées annuelles.

Agro-système	*Drainage farming* drainage des excès	*Rainfed farming* Infiltration totale des pluies	*Runoff farming* captage pluie + ruissellement.	*Valley farming* cultures limitées aux vallées.
Techniques traditionnelles	Ignames/grosses buttes maïs + divers/ billons mil/arachides + divers/billon Cultures associées aux arbres Drainage entre parcelles.	Cultures à plat +2 sarclages sorgho/coton mil/sorgho/arachide/niebe passage eau collinaire infiltration pluie/champ Murettes et cordons pierres. Alignements herbes/bois	Culture à plat +2 sarclages sorgho ou mil/ arachide ou niebe paillage, ZAI Boli = trous d'eau, cordons ou alignements pierres, herbes/bois parfois début-tage/sable.	Semis à plat +2 sarclages mil sur sable sorgho sur bas-fond argileux pâturage sur versants jardins dans bas-fonds cultures décrues/ mares
Techniques modernes proposées	CES (1964-1968) Reboisements cuirasses bandes d'arrêt fixation ravines protection rizières	GCES Koutiala 1985 . Amélioration parcours . Diguettes de protection . Haies vives + cordons, pierres ou bandes d'herbes . Exutoires enherbés . Aménagement bas-fond	DRS Gerès 1960-1965 puis CES ORD + FEER GCES CIRAD/ORD . Améliorer parcours . Mares pour bétail + Irrigation . Cordons pierres + herbes + haies vives/champs. . Aménagement ravines . Aménagement bas fond.	GCES . Plantation arbustes fourragers dans demi-lune ou fossé. . Aménagement par cours . Mares pour bétail . Captage ruissellement . Diguettes filtrantes/sur glacis . Cultures de bas-fonds.

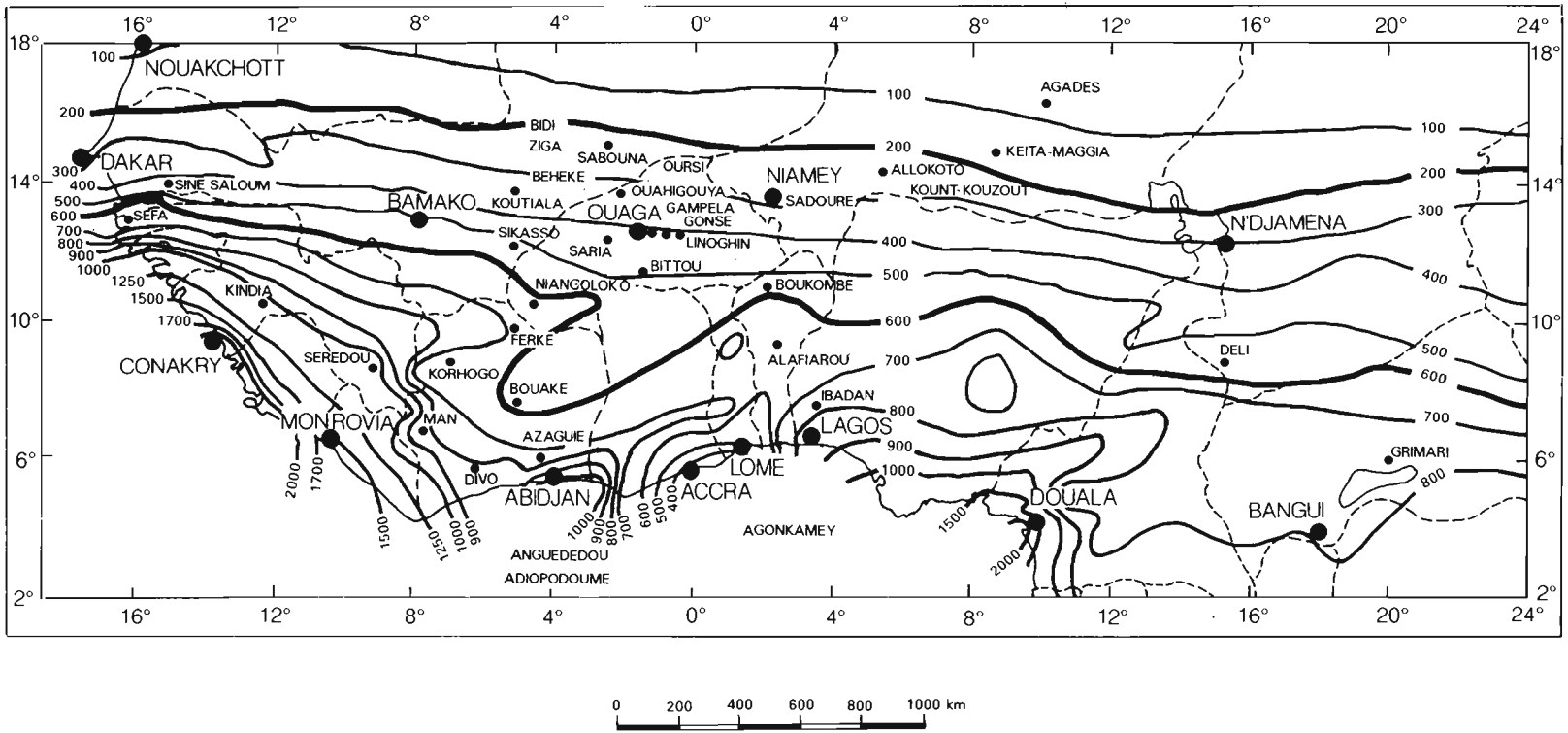


FIGURE 1 - *Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rusa de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre . Situation des parcelles d'érosion et des sites de recherche -développement.* D'après *les données pluviométriques rassemblées par la service hydrologie de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.*

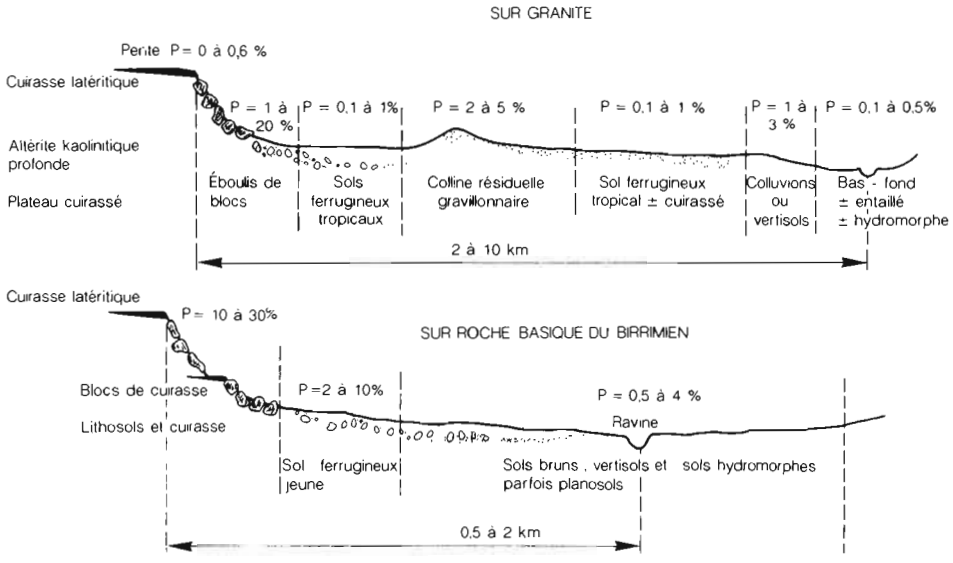


FIGURE 2 - *Toposéquences typiques en région soudano-sahélienne du centre du Burkina Faso.*

aussi durant la période sèche, la biomasse produite, en diminution, n'arrive plus à nourrir à la fois les troupeaux du village et les troupeaux transhumant du Sahel vers des zones plus humides (QUILFEN et MILLEVILLE, 1984 ; HALLAM et VAN CAMPEN, 1985).

Les processus d'érosion les plus actifs dans cette zone sont l'érosion en nappe, l'érosion en ravine et l'érosion éolienne. Les études sur les transferts de matières par le vent et par le ravinement ont été fort peu développées jusqu'ici au sud du Sahara. Comme les processus d'érosion en nappe sont à l'origine de la dégradation des sols, du ruissellement et du ravinement, nous ne présenterons ici que le résumé des recherches sur parcelles d'érosion dans la région (tabl. II, III, IV, VI, VII, VIII, IX).

Zone sud-soudanienne : cultures pluviales drainées (*drainage farming*)

CAS DES SÉNOUFO DE LA RÉGION DE KORHOGO

Le milieu

L'ensemble des dispositifs de mesure d'érosion - drainage - pluie et des observations a été réalisé sur le bassin de Waraniene, à 5 km de Korhogo, bassin représentatif des savanes arborées à *Parkia biglobosa, Butyrospermum parkii,* et *Daniella olivieri* sur arène granitique du Nord de la Côte-d'Ivoire. La strate herbacée est abondante (*Andropogon, Hyparrenia, Pennisetum,* etc.). L'ensemble de la végétation est profondément modifié par les feux de brousse quasi annuels, par les défrichements sélectifs et par les cultures traditionnelles billonnées.

Le climat, tropical de transition, est sec et chaud pendant quatre mois (d'où certains caractères de sol ferrugineux en surface) mais fort humide pendant quatre mois

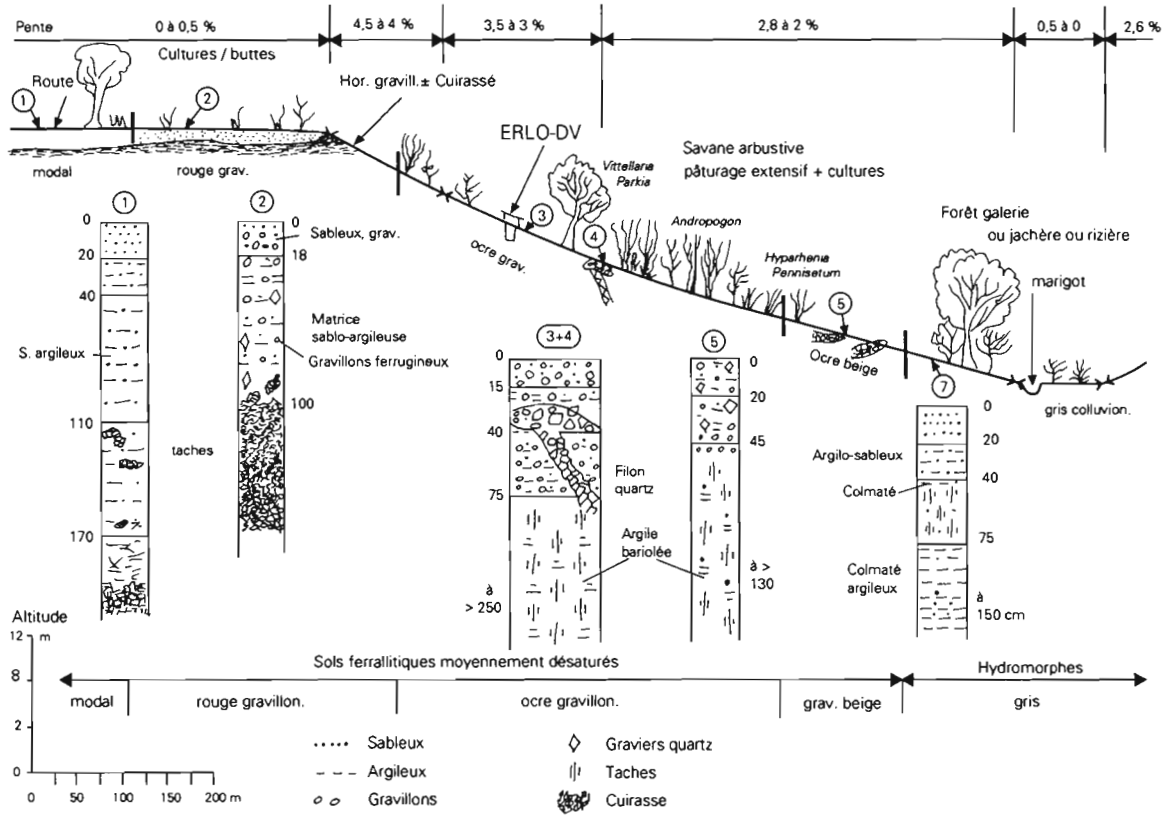


FIGURE 3 - *Schéma de la toposéquence «Case Erlo-Dv» de Waraniene (Korhogo : Nord Côte-d'Ivoire).*

(P = 150 à 320 mm.mois^{-1}) pendant lequel on observe 160 à 450 mm de drainage (ROOSE, 1979). La toposéquence (fig. 3) comprend un plateau cuirassé (sols rouges ferrallitiques modaux au centre, gravillonnaires sur le pourtour), une ou plusieurs corniches cuirassées, un large glacis concave (pente de 4 à 2 %) (sols rouges gravillonnaires sous la corniche, ocre 100 m plus bas et ocre beige 400 m en aval) et une petite plaine colluviale (sols gris hydromorphes sableux) très cultivée (apport d'eau par inféroflux).

Les cultures traditionnelles d'igname sur grosses buttes sont commencées dès février après défrichement et brûlis progressif. L'année suivante les buttes sont reprises pour former de gros billons (60 cm de hauteur, distance de 100 à 150 cm) sur lesquels les Senoufo plantent du maïs et divers condiments en cultures associées (ou quelquefois du manioc). Les troisième et quatrième années, le billon est fractionné et rejeté dans le sillon (sur les adventices et les résidus de culture) pour former un billon plus petit planté de mil, de sorgho, d'arachide et de divers légumes (gombo, tomates, tabac, etc.). Les bas-fonds plus ou moins étendus sur les colluvions latérales, sont occupés par des rizières irriguées.

Les observations

Les mesures sur petites parcelles d'érosion (tabl. II et III) montrent que les sols ferrallitiques sont très perméables tant qu'ils sont couverts (KR = 1 à 7 %), mais ils peuvent se dégrader et donner des coefficients de ruissellement importants (KR = 40 à 89 %) lors des averses de fréquence décennale qui tombent sur des sols dénudés humides. Les pertes en terre sous culture sont modérées (E = 0,2 à 6 t.ha^{-1}.an^{-1}) grâce à la présence de gravillons, de pentes modérées (2 à 3 %) ou de billons perpendiculaires à la pente.

Tableau II - Parcelles de Korhogo (ROOSE, 1979) 1967-1975 sur sol ferrallitique gravillonnaire, pente = 3 %, parcelles de 200 m² et 22 m de long. Pluies de 1 156 à 1 723 mm.an^{-1} (Md = 1 280 mm) et Rusa = 658. K = 0,021 0,011 (nappe de gravillons).

	KRAM %	KR max. %	E t.ha^{-1}.an^{-1}
Savane dégradée brûlis précoce	3,2	28	0,209
Sol nu travaillé chaque mois	33	89	5,4

Les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et des sols

Les versants sont couverts d'un damier de jachères et de champs plus ou moins étendus billonnés alternativement dans le sens de la pente ou perpendiculairement, qui assure un bon drainage plus ou moins ralenti par les cloisons de bordure de champs, l'orientation des billons et/ou la culture de riz pluvial dans les sillons ; les bordures des parcelles sont soulignées par un fossé, qui sert de déversoir aux eaux excédentaires et qui se transforme souvent en ravineau peu profond.

Au défrichement, les paysans respectent un certain nombre d'arbres utiles et de souches d'arbustes (souvent des légumineuses) qui vont envahir rapidement le terrain lorsqu'il est finalement abandonné à la jachère. Le faible niveau de fertilité est entretenu

Tableau III - Parcelles de Niangoloko (CHRISTOI, 1966) 1955-1961, sol ferrallitique sablo-argileux, pente = 2,5 %. Pluies de 979 à 1 422 mm (Md = 1 080 mm), cultures : mil-arachide-mil-arachide

	KRAM %	KR max. %	Érosion $t.ha^{-1}.an^{-1}$
Jachère	0,4	1	0,09
Cultures à plat	6,6	39	25,4
Culture sur billons/pente	2	23	6,34
Culture sur billons à la pente	0,3	3	1,5

KRAM = Coefficient de ruissellement annuel moyen en % des pluies.
KR max. = Coefficient de ruissellement max. pour une forte averse.
E = Érosion à la parcelle exprimée en tonne par hectare et par an.
K = Érodibilité du sol selon WISCHMEIER et SMIDT (1960).

par l'apport des cendres du foyer et de poudrette mêlée au compost familial, par l'enfouissement des adventices et des résidus de cultures lors de la préparation des nouveaux billons et bien sûr par une jachère plus ou moins longue selon la pression démographique. Les Sénoufo acceptent facilement la présence des arbres à objectifs multiples dans leurs systèmes de production (fruits, bois de feu, perches, médicaments, etc.).

L'impressionnant travail du sol (buttes et billons qui dépassent 60 cm de haut) favorise la formation de beaux tubercules, mais améliore aussi considérablement l'infiltration (CAMUS *et al.*, 1976). Les paysans sénoufo remanient aussi les petits bas-fonds secondaires pour élargir la zone de riz irrigué.

Stratégie moderne d'aménagement des bassins versants

En 1964-1968 fut entrepris une action de CES sur la zone dense de Korhogo ayant 3 objectifs :

- protéger les rizières contre l'ensablement par les ravines ;
- reboiser pour produire du bois de feu et assurer la continuité du débit d'étiage des sources ;
- protéger les terres cultivées sur les versants en ralentissant le ruissellement.

On a donc boisé les éboulis cuirassés, planté quelques bois villageois, interdit les feux de brousse (amende collective de 10 000 à 25 000 FCFA en 1964 au village par où passe le feu) et tracé des pistes coupe-feu. Parallèlement, on a tracé au rooter des bandes d'arrêt enherbées et plantées d'arbres repères (anacardier, teck, gmélina) en courbe de niveau dans les champs et les jachères. Enfin, on a fixé quelques grosses ravines et aménagé les bas-fonds pour la riziculture irriguée.

Cet aménagement a été mis en place après l'échec des aménagements DRS du Groupement européen de restauration des sols de Haute-Volta (Geres) dans la région de Ouahigouya. GOSSELIN (1965) rapporte que dès 1962-1964 on a donc veillé à faire des investissements plus légers (300 m de bandes d'arrêt par hectare = 650 FCFA contre 7 000 FCFA pour les fossés de diversion du Geres et 9 000 FCFA pour les cordons de Vetiver. Ont été également favorisés les aménagements faciles à réaliser sans topographe expert (bandes enherbées sur 2 raies de Ripper) et qui ne demandent

presque pas d'entretien mais favorisent le couvert végétal du sol (lutte contre les feux de brousse, plantations d'arbres, pistes pare-feu). GOSSELIN (1965) a bien noté que le préliminaire de cet aménagement de l'espace est de réduire la divagation du bétail pour lequel il propose toute une série d'actions :

- amélioration des kraals - en pente avec apport de paille de brousse en vue de produire beaucoup de fumier collectivement ;
- plantation d'arbres qui servent de piquets verts tous les 5 m autour des villages pour y aménager des parcs à bestiaux ;
- amélioration des jachères : stylosanthes à brouter sur place en saison sèche ;
- clôture des pâtures pour éliminer les feux en supprimant les pailles sèches par broutage complet (3 ou 4 parcs en rotation rapide à raison de 2 animaux.ha^{-1}.an^{-1}).

On pourrait schématiser actuellement l'aménagement ainsi :

- favoriser le drainage des eaux excédentaires (billonnage cloisonné) dans des exutoires aménagés (exutoires largement profilés enherbés) ;
- favoriser l'infiltration, la couverture du sol, la production de biomasse et donc la protection des sols ;
- améliorer la gestion de la biomasse (feu, élevage, fourrage, paillage/compost) ;
- améliorer l'usage des arbres (agroforesterie) ;
- améliorer la gestion du bétail (production animale en fonction des potentialités fourragères).

VARIANTE : CAS DES SÉNOUFO DU SUD-MALI

Dans le cadre des opérations de recherche-développement menées par l'Institut d'économie rurale (IER) à Bamako, l'Institut royal des tropiques (IRT) à Amsterdam et la Compagnie malienne des textiles (CMDT) dans la région de Sikasso, la Division de recherche sur les systèmes de production rurale (DRSPR) a proposé aux paysans le système d'équipement antiérosif suivant (HALLAM et VAN CAMPEN, 1985 ; VAN CAMPEN *et al.*, 1985 ; VAN CAMPEN et KEBE, 1986) :

- grosse digue de protection en amont du bloc de culture avec diversion vers un exutoire aménagé tous les 200 à 300 m (largeur 10 m, profondeur 0,3 m) ;
- dans les champs cultivés, diguettes en terre de diversion (pente 0,3 %) tous les 100 à 50 m, protégées par enherbement (théoriquement) ;
- labour, sarclage et buttage le long de ces diguettes.

Ce système classique a donné satisfaction à quelques paysans car les nappes d'eau sauvages ne circulent plus sur leurs parcelles mais entre les champs. Cependant, les paysans désapprouvent les diguettes sinueuses implantées dans leur champs car l'irrégularité des parcelles pose des problèmes de mesure de surface, de calcul des intrants et surtout de mécanisation des travaux culturaux.

Ce système d'équipement antiérosif de blocs de culture sans tenir compte du parcellaire, ni de l'ensemble du système de production, ni des besoins économiques des paysans ne s'est pas étendu naturellement. Les pertes en surface (10 à 14 %) ne sont pas compensées par des augmentations tangibles de rendement. Le réseau de drainage se détruit rapidement par défaut d'entretien ; sans protection par enherbement, au bout de quatre ans les exutoires utilisés comme chemin d'exploitation sont ravinés, les fossés sont comblés de sédiments et les diguettes sont tassées et souvent cassées par les eaux débordantes ou par le passage du bétail. La réalisation du dispositif demande un gros effort au propriétaire et au personnel d'encadrement mais n'entraîne pas une dynamique communautaire de conscientisation pour l'aménagement de l'environnement (HALLAM et VAN CAMPEN, 1985 ; ROOSE, 1985).

Zone nord-soudanienne (P = 1 000 à 700 mm) : culture pluviale au sens stricte (*rainfed farming*). Cas des Minianka de la région de Koutiala (Mali)

LE MILIEU

Le milieu (tabl. I) est peu différent du milieu sud-soudanien à part bien sûr une fréquence plus faible des plus fortes averses, une réduction des risques de drainage, l'apparition de nombreux épineux (en particulier *Acacia albida*), le développement des sols ferrugineux tropicaux lessivés, beaucoup plus fragiles que les sols ferrallitiques et l'allongement des glacis en pente douce. L'environnement humain est fortement influencé par l'usine de coton de Koutiala, par un encadrement rapproché de la Compagnie malienne pour le développement des textiles (CMDT) et par une organisation villageoise très efficace. Les défrichements s'étendent rapidement en ne respectant que 10 à 30 arbres utiles à l'hectare.

Les cultures traditionnelles jadis essentiellement céréalières et cantonnées sur les hauts glacis gravillonnaires se développent actuellement sur le glacis sablo-limoneux suite à la vulgarisation de la culture attelée du coton (ou arachide/niébé sur sols pauvres) alterné avec des céréales (sorgho ou mil et/ou maïs). Le semis est effectué le plus tôt possible après labour ; il est suivi de 2 sarclages et éventuellement d'un buttage. Après la récolte, le paysan s'accorde avec un Peul pour y faire paître le troupeau à condition d'y installer un parc (contrat de fumure/pacage). Ensuite les tiges de coton sont brûlées pour raison sanitaire tandis que la majorité des pailles des céréales sont utilisées pour des besoins artisanaux, pour la cuisine et le bétail. Le restant (10 à 25 %) est brûlé sur place avant le labour. Les bas-fonds qui formaient jadis une réserve de fourrage vert en fin de saison sèche sont cultivés en sorghos s'ils sont secs, en riz s'ils sont hydromorphes ou en jardin potager/fruitier.

LES OBSERVATIONS

Les mesures sur parcelles d'érosion (tabl. IV, V, VI, VII) montrent que les sols ferrugineux tropicaux et les sols bruns sont presque aussi perméables que les sols ferrallitiques tant qu'ils sont bien couverts par une vieille jachère ou par une savane arborée. Mais, une fois cultivés, ces sols sont moins stables et laissent s'échapper un fort ruissellement inacceptable dans les zones semi-arides (KRAM [Coefficient de ruisellement annuel moyen en pourcentage des pluies] de 6 à 25 % et jusqu'à 75 % lors des averses de fréquence rare). Malgré les pentes faibles et le travail du sol (0,5 à 2 %) les pertes en terre sont trop élevées (14 à 20 $t.ha^{-1}.an^{-1}$) sur sol nu et sous cultures peu couvrantes (E = 3 à 6 $t.ha^{-1}.an^{-1}$). Sur le sol gravillonnaire peu profond de Gampela, seul le billonnage cloisonné est nettement différent des autres préparations du sol (non-travail traditionnel ou billonnage non cloisonné) mais il n'améliore pas les rendements car le sol ne peut stocker l'eau. À Gonsé, on a constaté une forte influence de la date des feux de brousse. Lors des plus fortes averses, la brousse brûlée tardivement se comporte pratiquement comme une parcelle nue (KR max 75 %).

LES TECHNIQUES TRADITIONNELLES DE CONSERVATION

Les techniques traditionnelles de conservation des sols sont limitées à des murettes en pierres si le sol est rocailleux (sur grès, quartzite ou roches vertes) ou à des lignes de

Tableau IV - Parcelles de Gampela (ROOSE et PIOT : 1984) 1967-1972 ; sol ferrugineux tropical sur cuirasse vers 25 cm ; pente 0,8 % ; surface 5 000 m^2. Pluies de 636 à 817 $mm.an^{-1}$ (Md = 731 mm) Rusa MD = 319. K = 0,05 0,32 0,16. Cultures sorgho - mil - arachide - Essais influence du labour profond + billonnage au tracteur + diguettes de diversion

	KRAM %	KR max. %	E t.ha1.an^{-1}
Sol nu	-	-	16,0
Cultures à plat traditionnelles	22,5	40	4,1
Cultures sur billons/pente diguette en terre	23,7	45	5,9
Cultures sur billons/pente + diguettes en terre	18,2	37	4,4
Cultures sur billons pente cloisonnée + diguette en terre	4,6	31	1,4

Seul le billonnage cloisonné est nettement différent des autres traitements.

Tableau V - Parcelle de Gonsé (ROOSE, 1980) 1968-1974. Sol ferrugineux lessivé sur cuirasse, pente 0,5 %, surface 250 m^2. Pluies de 553 à 809 mm Md = 691 ; Rusa MD = 321. Savane arborée avec touffes d'herbes. Effet date feu de brousse

	KRAM %	KR max. %	E $t.ha^{-1}.an^{-1}$
Protection intégrale	0,3	1	0,033
Feux précoces	2,6	10	0,147
Feux tardifs	15,3	73	0,344

Tableau VI - Parcelles de Saria (ROOSE *et al.* , 1979) 1971-74. Sol ferrugineux lessivé sur cuirasse à 50 cm, pente 0,7 % ; Surface 100 m. Pluie 602 à 724 mm (Md = 643) Rusa Md = 380. K = 0,06 0,35 0,23

	KRAM %	KR max. %	E $t.ha^{-1}.an^{-1}$
Sol nu	39	70	20
Culture de sorgho butté	27	60	6
Jeune jachère	0	30	0,5
Vieille jachère	3	5	0,15

Tableau VII - Parcelles de Linoghin (PIOT et MILLOGO, 1980) 1973-1978. Sol brun vertique pente 1 à 1,3 % ; surface, 100 et 5 000 m. Cultures coton, sorgho, niébé, maïs, jachères ; travail du sol au tracteur. Pluies de 555 à 896 (Md = 636 mm) Rusa Md = 309 ; K = 0,008 0,28 0,14

	KRAM %	E $t.ha^{-1}.an^{-1}$
Sol nu travaillé après chaque averse	47	14,1
Sol cultivé à plat	18	3,2
Sol cultivé diguette + billon/pente	19	3,9
Sol cultivé diguettes + billons perpendiculaires pente	6,6	0,6
Vieille jachère naturelle		
- brûlée	19	0,8
- non brûlée	3,7	0,09

pierres, d'herbe ou de branches. Le travail du sol, peu profond mais répété toutes les trois à quatre semaines avant que la culture couvre sérieusement la terre, brise la croûte de battance en même temps qu'il détruit les adventices et rétablit une bonne infiltration dans le profil.

STRATÉGIE ACTUELLE D'AMÉNAGEMENT DES TERRAINS VILLAGEOIS

Suite à l'expérience de Fonsébougou, l'équipe de la DRSPR a développé à Kaniko (et dans 3 villages environnants) une approche plus souple où l'association villageoise après mûres discussions a décidé des priorités suivantes dans le plan général d'aménagement proposé (HALLAM et VAN CAMPEN, 1985 ; ROOSE, 1985) :

- protection du bloc de culture contre les eaux ruisselantes des collines par l'aménagement du parcours extensif (mise en défens, replantation d'arbres fourragers, bandes enherbées et lignes de cailloux dans les passages d'eau) et par un système de diguettes de protection dirigeant les eaux vers des exutoires aménagés. Implantation d'une pépinière villageoise ;
- protection des exploitations contre la divagation du bétail par l'implantation de haies vives autour des exploitations et plus tard des parcelles. Utilisation de buissons et d'arbres à objectifs multiples (*Acacia albida, Parkia, Butyrospermum*). Formation combinée d'exutoires fixés (saignées de pierres) plus ou moins enherbées et de routes d'accès pour évacuer les récoltes ;
- amélioration de l'infiltration sur les parcelles cultivées :
  - griffage en sec, labour à plat, deux sarclages et buttage cloisonné,
  - introduction de légumineuses en rotation ou en association (mucuna ou niébé, remplissage des manquants),

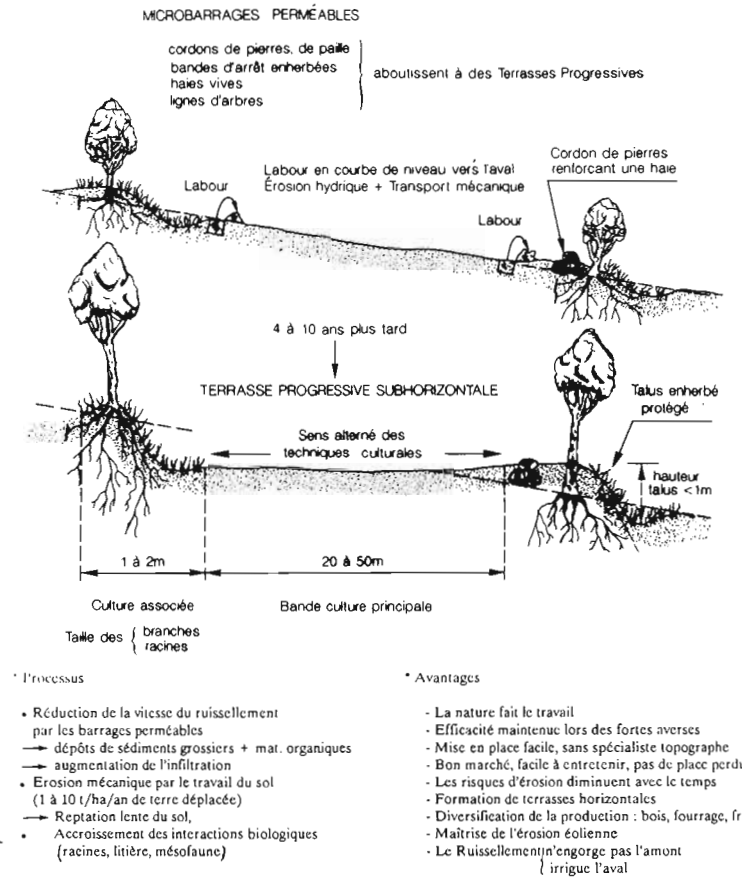


FIGURE 4 - *Méthode des micro-barrages perméables.*

- recyclage maximal des résidus de culture (fumière, compostière, etc.),
- bandes enherbées ou lignes de cailloux entre les limites de parcelles tous les 25 m pour ralentir le ruissellement naissant sur le champ (fig. 4) ;
- enfin aménagement des bourrelets de berges (souvent très dégradés) et des bas-fonds (rizière ou jardins qui associent des cultures sur plusieurs étages : légumes/fourrages, arbustes fruitiers, grands arbres) microbarrages constitués de diguettes en terre (2 m de hauteur) avec exutoires empierrés latéraux.

Si on inverse l'ordre, on risque un ensablement total des bas-fonds, mais le système veut favoriser toutes les initiatives paysannes, même si l'ordre prévu n'est pas toujours respecté. De cette façon, l'ensemble du village s'est engagé dans l'aménagement du terroir et son niveau d'information s'accroît de toutes les expériences de la communauté. Il est clair que ce projet DRSPR/CMDT, correspond bien à la stratégie GCES où la lutte antiérosive fait partie intégrante de l'amélioration du système agraire.

Zone sud-sahélienne (P = 700 à 400 mm) : culture sous impluvium (*runoff farming*). Cas des Mossi du Yatenga (Burkina Faso)

LE MILIEU

Le milieu est nettement plus aride que le climat soudanien, même en saison des pluies, de telle sorte qu'on y observe des manifestations d'érosion éolienne (voiles de sable, monticules de sable sous les touffes herbacées pérennes, nebka et dunes anciennes qui recouvrent les buttes cuirassées). La végétation est plus rabougrie et dispersée. Le *Butyrospermum* disparaît au bénéfice du baobab, du *Pterocarpus lucens* et des épineux (*Balanites, Ziziphus* et nombreux acacias dont le fameux *Acacia albida* qui constitue des parcs dans les vallées cultivées). Les graminées pérennes (*Andropogon*) se raréfient pour laisser la place aux graminées annuelles à cycle rapide.

Les paysages granitiques cuirassés s'estompent au Nord sous des nappes de sable (sols ferrugineux peu lessivés) tandis que les sols bruns ou vertiques des zones de roches vertes sont vigoureusement ravinés. Les nappes phréatiques ne sont plus alimentées par le drainage des versants mais par les mares des bas-fonds et par les zones gravillonnaires ou rocheuses.

Paradoxalement, la population, nombreuse dans cette région (localement de 70 à 110 hab.km^{-2}) est habituée à des migrations saisonnières ou semi-permanentes vers les pays côtiers pour mieux valoriser le travail ; en saison sèche, les campagnes sont donc peuplées de vieux, de femmes et d'enfants : il faudra en tenir compte lors du choix du type d'aménagement du terroir.

LES OBSERVATIONS

Des mesures de ruissellement et d'érosion sont en cours à Bidi sur 3 grandes parcelles cultivées sous impluvium sur un versant sableux filtrant (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1988). Le ruissellement annuel n'est pas négligeable sous culture traditionnelle (10 à 30 %). Les cordons pierreux n'ont guère réduit le ruissellement global (- 1 à 5 %) ni les plus forts ruissellements (KR max. de 60 à 85 %). Cependant, lors des fortes averses, ils ont écrêté les débits de pointe (- 25 %), retardé et prolongé (quinze à trente minutes) les écoulements et, de ce fait, ils ont réduit les risques d'érosion. À leur abri peuvent se développer des systèmes de culture plus intensifs (fertilisation et travail répété du sol) qui améliorent l'infiltration mais fragilisent les sols. L'impluvium apporte aux parcelles cultivées un appoint de 100 mm qui ne contribue à la recharge de la réserve hydrique du sol que si on maintient sa capacité d'infiltration grâce à la rugosité créée par les pierres (gain d'infiltration de 25 mm) et par le travail du sol (gain d'infiltration de 75 mm). Cet appoint d'eau entraîne une augmentation de production de la biomasse (localisée surtout près de l'impluvium et devant les pierres) et des rendements (+ 33 à 81 %) sauf lorsque les pluies s'arrêtent trop tôt (- 11 % de grain en 1985). L'efficacité de l'aménagement sur l'infiltration varie suivant les averses en fonction des états de la surface du sol et des qualités des cordons de pierres : il faut donc prévoir l'entretien des parcelles et des aménagements (tabl. VIII, Bidi).

SYSTÈME TRADITIONNEL DE CULTURE ET DE GESTION DES EAUX

Les Mossi ont un comportement de pionniers. Ils défrichent en brûlant presque tous les arbres (sauf quelques *Acacia, Sclerocarya*, etc.) puis ils sèment le sorgho sur les

Tableau VIII - Ruissellement en zone sud-sahélienne. Parcelles de Bidi (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1988) 1985 à 1990. Sol ferrugineux tropical sablo-argileux bien drainant, profond de 25 à plus de 220 cm sur cuirase. Pente 2,5 %. Parcelles (100 x 20 m) sous impluvium (50 x 20 m). Culture de mil : 3 traitements : traditionnel, *idem* aménagé, *idem* aménagé + labour, fumure légère : 7 N + 10 P + 7 K, 2 sarclages + débuttage. Aménagement = 6 cordons de pierres isohypses (2 lignes de blocs) tous les 20 mètres.

	PLUIE mm			RUISSELLEMENT KRAM %	KR max.	EFFET AMÉN. SUR RENDEMENTS EN GRAIN
1985	239		tradit.	29	75	
		parcelles	tradit. + cordons	24	57	- 11 %
			tradit. + cordons + labour	-		
1986	530		1	24	85	
		parcelles	2	23	67	+ 81 %
			3	-	-	
1987	484		1	11	62	
		parcelles	2	8,7	60	+ 31 %

Les cordons pierreux ont peu d'action sur le ruissellement global (KRAM) mais bien sur les débits de pointe, le retard de l'écoulement.et les risques d'érosion. L'impact sur les rendements en grain dépend des dernières pluies de l'année.

meilleures terres et le mil sur les terres sableuses, en poquets tous les mètres, sans travailler le sol, dès les premiers orages de mai ; ils recommencent les semis 2 à 5 fois puis ils assurent 2 sarclages à la houe. Sur les terres sableuses du Nord, le sarclage s'accompagne d'un débuttage qui améliore l'infiltration (SERPANTIÉ, 1986). La culture attelée est en recul depuis la longue sécheresse. Pour faire face à l'épuisement des terres, les paysans apportent des matières organiques (5 $t.ha^{-1}$ de poudrette de kraal et de cendres ménagères ou un paillage de tiges de céréales et de rameaux de légumineuses buissonnantes peu appétées par le bétail comme *Piliostigma reticulatum* et *Bauhinia rufescens*) ou ils abandonnent la terre à la jachère pâturée.

La méthode du ZAI pour récupérer les terres épuisées est tout à fait originale. Elle combine le piégeage du ruissellement, la fumure organique localisée et l'activité perforatrice des termites (trinervitermes) pour améliorer l'infiltration. Après un premier orage, le paysan creuse à la houe un petit trou (10 à 50 cm de diamètre, 10 cm de profondeur) et il y dépose un peu de poudrette ; ces matières organiques attirent les termites qui creusent jusqu'à la surface du sol des galeries pour s'en nourrir, puis tapissent les galeries de leurs excreta. À la deuxième averse, le ruissellement s'engouffre dans ces galeries et mouille le sol en profondeur en formant des poches d'humidité à l'abri de l'évaporation immédiate. Les 5 à 15 graines de mil ou de sorgho semées les jours suivants vont germer rapidement et trouver en profondeur une réserve d'eau et de nutriments qui leur permettront de tenir jusqu'aux averses suivantes. L'influence d'un léger paillage (1 à 2 cm) posé sur les plaques de sol infertile est semblable : les termites y reconstituent la macroporosité tandis que la paille protège le sol de la battance (ROOSE et PIOT, 1984).

La tradition des boli (trous d'eau de quelques mètres cubes avec rejet des déblais vers l'aval en demi-lune) permet également de récupérer une fraction des eaux de ruissellement pour alimenter en eau le bétail près des parcours ou pour irriguer un petit jardin (DUGUE, 1987).

Enfin, s'il manque de terre, les paysans Mossi récupèrent, par des structures en nid-d'abeilles, les *zipellés* (surfaces de terre érodées, dénudées et encroûtées où la jachère ne peut même plus se développer par défaut d'infiltration). Ils entourent leurs petites parcelles d'alignements de pierres, d'herbe ou de piquets pour ralentir le ruissellement et provoquer le dépôt de sédiments grossiers et perméables (sables, agrégats et matières organiques diverses). Dès la seconde année, cet horizon sableux est travaillé, fumé et planté ; il n'est pas rare d'y récolter 600 à 800 $kg.ha^{-1}$ de sorgho (WRIGHT, 1985). Par la suite, les parcelles récupérées sont plantées d'arbres à objectifs multiples (acacias, etc.) et un nouvel alignement est mis en place en amont pour capter les eaux ruisselantes des collines.

LE YATENGA, LABORATOIRE DES STRATÉGIES ANTIÉROSIVES

Depuis vingt-cinq ans, le Yatenga a connu une succession d'aménagements antiérosifs à grande échelle pour tenter de ralentir la dégradation rapide des couvertures végétales et pédologiques de ces paysages fragiles en bordure du Sahel.

La DRS de 1960 à 1965

Le Service forestier, puis le Geres, ont aménagé 200 000 ha, réalisé 35 000 km de fossés de diversion ou d'absorption, le rootage croisé des zones tassées gravillonnaires, 70 km de murettes ou de diguettes en pierres dans les exutoires, 24 barrages collinaires et d'autres structures en demi-lune pour améliorer l'infiltration dans le haut des versants (le parcours extensif) et pour protéger les plaines cultivées. Cet aménagement, intéressant techniquement, s'est rapidement soldé par un échec, car les paysans, non concernés, ont continué à vivre selon leur mode d'utilisation traditionnel du paysage (MARCHAL, 1979, 1986).

La CES de 1976 à 1985

Le Fonds de développement régional (FDR) puis le Fonds de l'eau et de l'équipement rural (FEER) ont fait appel à des groupements villageois décidés à construire des diguettes de diversion en terre sur des blocs de culture de 25 à 100 ha. Plus de 47 000 ha de terre de culture ont été aménagés en dix ans (MIETTON, 1986). Mais étant donné le rythme de construction (max. = 9 000 $ha.an^{-1}$) et la faible durée de vie des aménagements des parties de versant (deux à quatre ans, sans protection végétale des diguettes), il faudrait plusieurs siècles pour couvrir toutes les terres qui en ont besoin. On a donc été amené à reconsidérer les anciennes techniques traditionnelles étudiées par diverses organisations non gouvernementales (WRIGHT, 1985).

La GCES de 1985 à 1988

Parmi de nombreux projets d'aménagements antiérosifs qui évoluent rapidement - Projet agriculture écologie (PAE), Projet agroforestier (PAF), Association française des volontaires du progrès (AFVP), OXFAM, etc. -, nous ne rapporterons ici que celui de la cellule recherche-développement de l'Institut national d'étude et de recherche agricole (Inera)/Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)-département des systèmes agraires (DSA) au sein du Centre de recherche pour la promotion agricole (CRPA) de Ouahigouya (Dugue, 1986-1987 ; RODRIGUEZ, 1987 ; ROOSE, 1986-1987). La stratégie GCES est la même qu'au Mali, à savoir :

- enquête auprès des paysans-éleveurs sur leurs problèmes de gestion de l'environnement : dégradation de la fertilité des sols, de l'infiltration, des matières organiques ;
- recherche expérimentale des techniques traditionnelles les mieux adaptées pour accroître l'infiltration, la production de biomasse et donc pour mieux assurer la protection des sols sur les terres cultivées ;
- plan d'aménagement de l'ensemble du paysage conçu avec les paysans (ROOSE et RODRIGUEZ, 1990).

LES CHOIX DES MOSSI DU YATENGA

Les choix des Mossi du Yatenga ont été assez différents de ceux des Minianka (Koutiala, Mali).

Les Mossi ont préféré commencer par l'aménagement de leurs parcelles individuelles et sont tentés de capter le ruissellement à tous les niveaux de la toposéquence

- cordons ou alignements de pierres qu'il faudrait pérenniser en réservant une bande enherbée (*Andropogon*) à l'amont pour étaler le ruissellement et une haie vive à l'aval avec des arbres tous les 5 m pour tenir les pierres en place ;
- plantation d'arbres autour des parcelles ;
- utilisation maximale des résidus de culture - fumière au village, compostière au champ ;
- grattage des sols lors des premières averses, labour à plat avec 2 sarclages et buttage cloisonné pour rompre la croûte de battance ;
- récupération de l'eau des pistes sur les champs voisins, dérivation des petites ravines.

Aménagement du haut glacis pour récupérer le ruissellement qui provient des parcours

- contrat de mise en défens temporaire par rotation des parcours avec replantation d'arbres et herbacées fourragères ;
- trou d'eau en tête des ravines (citerne) qui évolue en microbarrage demi-lune pour alimenter le bétail et organiser une irrigation d'appoint sur 1 000 m² (maïs hâtif puis pastèques) ;
- diguette en terre et cordon pierreux perméable qui captent les eaux de ruissellement d'un impluvium pour l'irrigation d'appoint d'un champ (BEDU, 1986).

Aménagement progressif des bas-fonds

- en amont, diguette filtrante (SERPANTIÉ à Bidi ; PAE, AFVP - Groupement de recherche et d'échanges technologiques (Gret)/Centre interafricain d'études hydrauliques (CIEH) à Kongoussi/Rissian ;
- diguette en terre (hauteur inférieure à 2 m) avec exutoire latéral empierré ;
- microbarrage en gabions avec exutoire central.

À tous les niveaux du paysage, il s'agit de capter, de ralentir puis de redistribuer le ruissellement pour augmenter le stockage de l'eau en surface ou dans la nappe en vue d'améliorer la production ou de réduire les risques. L'apport immédiat d'un supplément de ruissellement sur les parcelles déjà humides en cours d'averse pose des problèmes (risque de ravinement) ; le creusement de citernes ou de petites mares est plus

satisfaisant, mais il reste à mettre au point une pompe à main capable d'élever 10 $m^3.j^{-1}$ à 1 m au-dessus du sol.

Là où il manque de pierres, on cherche à mettre au point des microbarrages biologiques (haie vive ou ligne de végétation difficiles à maintenir tant que le bétail circule librement en saison sèche) ou des segments de diguettes en terre protégées tous les 25 m par un exutoire empierré de sécurité.

Zone nord-sahélienne (P < 400 mm) : cultures localisées dans les bas-fonds (*valley farming*). Cas des communautés Peul, Songhaï et Bella de la mare d'Oursi (Burkina Faso)

LE MILIEU

On constate une nette rupture avec les précipitations des régions soudaniennes : les pluies sont plus erratiques et limitées dans l'espace, leurs hauteurs et intensités sont beaucoup plus faibles (tabl. I). Si les sols sont sableux, on observe peu de ruissellement que le sol soit cultivé en mil ou en jachère (couverture végétale faible, surpâturage) mais une érosion éolienne non négligeable. En revanche, sur les piémonts et glacis limono-argileux, les sols mis en culture sont vite glacés et on observe un ravinement très actif et une dégradation rapide sous culture de sorgho (CHEVALLIER *et al.*, 1985).

LES OBSERVATIONS

Des mesures d'érosion et de ruissellement ont été effectuées par le Centre technique forestier tropical (CTFT) pendant trois ans à la mare d'Oursi, sur un voile sableux au pied d'un massif de gabbro. Le ruissellement est d'ordinaire assez faible (5 à 10 %). Le travail du sol, en cassant la croûte de battance, améliore l'infiltration déjà très élevée sur ces voiles sableux ; cependant, lors des fortes averses, on peut encore enregistrer plus de 40 % de ruissellement (y compris sur jachère en défens). L'érosion hydrique est encore forte sur sol nu, (pentes de 5 %) mais peu élevée les années les plus sèches tant sur mil que sur jachère en défens. Ce qui n'apparaît pas ici ce sont les transports éoliens très actifs dès qu'on remue la surface du sable. (tabl. IX).

Tableau IX - Parcelles de la mare d'Oursi (PIOT et MILLOGO, 1980) 1977-1979. Sol ferrugineux peu lessivé sur placage éolien en piémont sur massif de gabro, pente 5 %. Surface 100 et 2 800 m. Cultures mil. Rusa 53 à 171. Pluie 279 à 388 mm

	KRAM %	KR max. %	E $t.ha^{-1}.an^{-1}$ Md	ANNÉES SÈCHES
Nu travaillé après chaque averse	6	37	17,8	16
Cultivé en mil	5,5	44	2,2	0,6
Jachère en défens	9,7	44	1,6	0,2

Le système traditionnel de culture et d'aménagement

Alors qu'au Nord du Sahara en milieu méditerranéen (pluies en saison fraîche), il existe plusieurs systèmes pour collecter les eaux de pluie ou de ruissellement pour faire pousser des arbres ou des céréales au milieu de larges impluviums (jessour, citerne, tabia, fogara, par exemple), les stratégies de gestion des eaux dans la zone tropicale sahélienne (pluies en période chaude) sont peu apparentes. En réalité, elles s'appuient sur le choix des cultures en fonction des sols (mils sur sols sableux, sorghos dans les bas-fonds et jardins irrigués autour des mares), sur l'adaptation aux opportunités des orages (très faible travail du sol, semis directs répétés très peu coûteux en graines (3 $kg.ha^{-1}$) et en travail (9 h), grandes surfaces semées quitte à en laisser une partie lors du sarclage) et sur les migrations à faible distance (récolte de fonio sauvage, de bulbes de nénuphar), habitation sur les champs de novembre à août près des greniers et du lieu de traite, migration du troupeau sur un pâturage occasionnel) (Milleville, 1982).

D'après Milleville (1982), la limite de culture des céréales passe par l'isohyète 350 mm de précipitation ; le choix de la mare d'Oursi est donc un peu limite pour représenter cette zone. Cependant, les pluies annuelles ont beaucoup baissé ces dernières années et les pluies sont très variables selon les années et les terroirs et leur efficacité varie en fonction des sols et de la répartition des pluies. De plus, les rendements en grain (150 à 250 $kg.ha^{-1}$) sont si faibles que l'élevage et le nomadisme à faible distance sont très importants pour assurer la survie.

Système d'aménagement moderne

Le milieu étant extrêmement fragile, il est périlleux de conseiller le développement du système agropastoral au rythme de la croissance démographique. En réalité, le développement semble bloqué aujourd'hui car presque toutes les terres cultivables sont cultivées ; avec la disparition des jachères, les sols s'épuisent et le coût des intrants (fertilisation minérale, graines à cycle court) n'est rentable que les années où les pluies sont abondantes et bien réparties (Milleville, 1982).

On pourrait cependant expérimenter à l'échelle d'un terroir comme à Keita (Niger) :

- l'installation de haies vives ou d'épineux fourragers (*Balanites, Acacia albida*) sur les zones sableuses ;
- des impluviums qui collectent les eaux pour de petits champs billonnés sur glacis ;
- l'aménagement agroforestier des bas-fonds (cordon de pierres, haies vives, arbres fourragers ou fruitiers) ;
- l'aménagement des bordures de mare en vue d'une culture intensive diversifiée (fourrages pour la production laitière, céréales, légumes et quelques fruitiers).

Cependant, il est clair que la production agricole est limitée aux bas-fonds et que l'élevage avec un nomadisme à faible distance est mieux adapté à ce milieu sahélien très fragile.

CONCLUSION

Le milieu semi-aride d'Afrique occidentale est en définitive très diversifié dans l'espace (du point de vue ressource en eau, distribution des orages, capacité d'infiltration des sols) et dans le temps (variabilités interannuelle et saisonnière). La végétation naturelle évolue très différemment selon la zone climatique et le mode d'exploitation par l'homme et les troupeaux. En outre, les différentes ethnies qui occupent

aujourd'hui ces paysages ont adapté leurs modes d'exploitation du milieu et leur stratégie de gestion de l'eau et de la fertilité des sols à cette diversité écologique.

Face aux pressions démographiques et socio-économiques, ces modes de gestion ne sont plus adaptés et les couvertures pédologiques se dégradent. Les stratégies modernes «d'équipement rural imposées par des ingénieurs dépêchés par le pouvoir central» (LILIN, 1986) sont trop rigides ; mal adaptées à la diversité des circonstances écologiques et humaines, elles se heurtent à la résistance des traditions populaires.

Devant ces échecs, constatés tant aux États-Unis qu'au Maghreb et en Afrique occidentale, l'auteur suggère une approche de développement rural, «la gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols» (GCES):

- qui part d'une enquête sur les besoins ressentis par les paysans-éleveurs, et la diversité des risques de dégradation du milieu ;
- qui expérimente sur leurs propres champs les techniques simples les plus prometteuses en vue d'améliorer l'infiltration, la production de biomasse, et finalement de réduire les risques d'érosion ;
- qui forme progressivement les communautés villageoises à la gestion de leur environnement.

Le ruissellement est abondant sur les longs glacis mal couverts de ces zones semi-arides. Pour réduire les pertes en eau et en nutriments, les structures antiérosives ne suffisent pas, mais elles sont souvent indispensables pour installer un système cultural plus intensif qui vise une meilleure infiltration (travail du sol pour rompre l'état encrouté de la surface), une meilleure stabilité structurale (gestion de la biomasse et en particulier des résidus de culture) et une amélioration des conditions de croissance des plantes (fertilisation minérale et organique).

Cela prend du temps ; c'est difficile à financer mais c'est un nouveau champ d'expérimentation qui s'ouvre aux chercheurs... bien loin des stations de recherches classiques. Il manque en effet cruellement :

- des mesures quantitatives des érosions éolienne et hydrique en zone sahélienne et de l'efficacité des diverses méthodes de conservation de la productivité des sols ;
- des informations sur les moyens d'augmenter la sécurité des systèmes de production et sur les aspects économiques et sociologiques de la lutte antiérosive.

É. Roose : *pédologue*, ORSTOM, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

BIBLIOGRAPHIE

BEDU (L.), 1986. - Contribution à la mise en valeur du Yatenga. Aspects techniques du projet d'aménagement de Ziga. Rapport de stage ESAT, 87 p.

BENNET (H.), 1939. - Elements of Soil Conservation. Mac Graw-Hill, New-York, 2e édit.

BONVALLOT (J.), 1986. - Tabias et jessour du sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22, 2 : 163-172.

BRUNET-MORET (Y.), 1963. - Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Haute-Volta. ORSTOM Paris, 23 p., *multigr.*

BRUNET-MORET (Y.), 1963. - Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République du Mali. ORSTOM Paris, 23 P + graphes., *multigr.*

CAMUS (H.), CHAPERON (P.), GIRARD (G.) et MOLINIER (M.), 1976. - Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture (Korhogo, 1962-1972). Paris, *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 52, 81 p.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. - Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi : 1976-1981. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 190, 252 p.

CHRISTOI (R.), 1966. - Mesure de l'érosion à Niangoloko (Haute-Volta). *Oléagineux*, 21, 8 : 531-634.

DUGUE (P.), 1986. - Appropriation des techniques de lutte contre l'érosion et le ruissellement par les paysans du Yatenga. *Doc. Systèmes Agraires*, n° 6 : 41-48.

DUGUE (P.), 1987. - Programme de recherche/développement du Yatenga. Rapport de synthèse 1986. INERA Ouagadougou, 96 p. + Ann.

ELLISON (W. D), 1944. - Studies of raindrop erosion. *Agr. Eng.*, 25 : 131-181.

GOSSELIN (P.), 1965. - Conservation des sols et aménagement des terroirs de la région Nord (Boundiali, Odienne, Korhogo). Rapport Service des sols Korhogo (Côte-d'Ivoire) du 1-4-1962 au 1-4-1964. 36 + 24 p.

GRECO (J.), 1978. - La défense des sols contre l'érosion. La Maison Rustique, Paris, 183 p.

HALLAM (G.) et VAN CAMPEN (W.), 1985. - Reacting to farmers complaints of soil erosion on agriculturally intensive farms in Southern Mali : from fixed answer to flexible reponse. *Proc. ISCO* 4, Maracay, Venezuela : 638-653.

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

LAMACHÈRE (J.-M.) et SERPANTIÉ (G.), 1988. - Conséquence de trois méthodes d'amélioration des bilans hydriques au champs pour une culture de mil : Bidi, Burkina Faso. ORSTOM Ouagadougou, 39 p., *multigr.*

LEFAY (O.), 1986. - Étude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. Rapport de stage ORSTOM-CNEARC - INRF, 50 p. + annexes.

LILIN (Ch.), 1986. - Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22, 2 : 139-146.

LOVEJOY (J. B.) et NAPIER (T. L.), 1986. - Conserving soil : sociological in-sights. *J. Soil and Water Cons.*, 41, 5 : 304-310.

MARCHAL (J.-Y.), 1979. - L'espace des techniciens et celui des paysans. *Mém. ORSTOM*, Paris, n° 89 : 245-252.

MARCHAL (J.-Y.), 1986. - Vingt ans de lutte antiérosive au Burkina Faso. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22, 2 : 173-180.

MIETTON (M.), 1986. - Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22, 2 : 181-196.

MILLEVILLE (P.), 1982. - Étude d'un système de production agropastoral sahélien de Haute-Volta. ORSTOM Ouagadougou, 66 p., *multigr.*

MONJAUZE (A.), 1964. - Rénovation rurale : rôle et dispositifs des aménagements d'infiltration. Délégation générale, dépt. forêts, service DRS, Alger, 16 p.

PIOT (J.) et MILLOGO (E.), 1980. - Synthèse de six années d'étude du ruissellement et de l'érosion à Linoghin (Haute-Volta). CTFT, Ouagadougou, Haute-Volta.

PLANTIE (L.), 1961. - Technique française algérienne de banquettes de DRS. Délégation générale dépt. forêts, service DRS d'Oran, 22 p.

QUILFEN (J.-P.) et MILLEVILLE (P.), 1984. - Résidus de culture et fumure animale : un aspect des relations agriculture-élevage dans le nord de la Haute-Volta). *Agron. trop.*, 38, 3 : 206-212.

REIJ (C.), TURNER (S.) et KUHLMAN (T.), 1986. - Soil and Water Conservation in Sub-Saharan Africa. Issues and options. CDCS, FREE University Amsterdam, 82 p.

RODRIGUEZ (L.), 1987. - Les aménagements collectifs contractuels de Ziga et Sabouna. Perspectives. Inera-ORD Ouahigouya, 12 p. + Ann.

ROOSE (É.), 1979. - Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite, sous culture et sous savane arbustive soudanienne : Korhogo, 1967-1975. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 17, 2 : 81-118.

ROOSE (É.), 1980. - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 130. , 569 p.

ROOSE (É.), 1985. - Conservation des sols au sud Mali : rapport de mission auprès de la DRSPR, Sikasso Mali, 22 p.

ROOSE (É.), 1986. - Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22, 2 : 197-208.

ROOSE (É.), 1986-87. - Aménagement intégré et lutte contre le ruissellement et l'érosion en région soudano-sahélienne du NW du Burkina Faso. Rapport de mission ORSTOM Inera/ORD, 22 p.

ROOSE (É.), 1987. - Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahélien d'Afrique Occidentale. Stratégie ancienne et nouvelle. Séminaire Icrisat/INRAN, Niamey. 24 p., proceedings Icrisat, Patancheru, 385p. : 55-72.

ROOSE (É.), ARRIVETS (J.) et POULAIN (J.-F.), 1979. - Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne : Saria (Haute-Volta) : synthèse des campagnes 1971-74. ORSTOM Paris, 123 p., *multigr.*

ROOSE (É.) et PIOT (J.), 1984. - Runoff, erosion and soil fertility restoration in the Mossi Plateau. *Proc. Harare Symposium, IAHS, Public*, n° 144 : 485-498.

ROOSE (É.) et RODRIGUEZ (L.), 1990. - Aménagement du territoire au Yatenga (N. O. du Burkina Faso). Quatre années de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. CRPA de Ouahigouya, ORSTOM, Montpellier, 40p.

SERPANTIÉ (G.), 1986. - Confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. Comm. 1-9 Séminaire Cirad/DSA Montpellier, 22 p.

VAN CAMPEN (W.), HALLAM (G.), BA (L.) et VIERSTRA (G.), 1985. - La lutte antiérosive et la conservation des sols : Activités de la DRSPR dans la zone de Fonsebougou et de la ZAER de Kaniko - IER, DRSPR Sikasso, Mali, 36 p.

VAN CAMPEN (W.) et KEBE (D.), 1986. - Lutte antiérosive dans la zone cotonière au Mali-Sud. Comm. 3e Séminaire Cirad/DSA Montpellier, 25 p.

WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1960. - A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7th Intern. Soil Science*, vol. 1 : 418-425.

WRIGHT (P.), 1985. - La gestion des eaux de ruissellement au Yatenga (Burkina Faso). OXFAM, Ouagadougou, 38 p.

Jacques BONVALLOT

Plaidoyer pour les jessour

Tunisie du sud

INTRODUCTION

Les zones arides de l'Afrique du Nord, et particulièrement de la Tunisie, ont toujours été considérées comme des régions marginales où la précarité climatique ne permettait pas une vie facile. L'Empire romain, il y a deux millénaires, y trouvait ses limites sud, précisément non loin de la région qui fait l'objet de ce propos. On a beaucoup parlé, et on parle encore beaucoup, de désertification, d'aridité de plus en plus forte, de difficulté de vie accrue dans ces zones âpres et rudes où les dunes, qui envahissent les champs et les olivettes, rappellent que le Sahara est proche. Longtemps refuge des hommes, les montagnes rocailleuses, qui ferment l'horizon, sont progressivement désertées. Elles furent pourtant, en leur temps, le lieu de multiples implantations humaines, de greniers fortifiés qui jalonnaient de leurs murailles les pitons les plus escarpés. Il semble que se soient produits des phénomènes irréversibles qui expliqueraient la désertion des populations. Aridité en croissance continue ? Non pas tant que l'abandon progressif de techniques agricoles, parfaitement adaptées aux dures conditions climatiques, sur des sols que l'évolution géomorphologique quaternaire avaient bien dotés en potentialités agronomiques.

Car la longue chaîne de montagnes formée par les Jbels (mont, montagne) Matmata et Demmer (fig. 1) qui s'étend sans discontinuité depuis le sud de Gabès jusqu'en Libye, si elle présente des caractères peu propres à l'agriculture, offre localement de bonnes possibilités agricoles. Elle est formée, à l'ouest, par un vaste plateau structural, le Dahar, qui culmine aux alentours de 700 mètres d'altitude ; façonné dans les couches calcaires de l'Oxfordien, du Callovien, de l'Albo Aptien et du Turonien, il s'incline doucement en direction de l'ouest et du Sahara. Vers l'est, au contraire, ce plateau domine, par l'intermédiaire de 2 cuestas aux pentes fortes, la grande plaine de la Jeffara ; celle-ci est formée de glacis souvent encroûtés par le calcaire ou le gypse, dans les roches plus tendres du Trias, à des altitudes comprises entre le niveau de la mer et 300 m.

En opposition avec les versants et les escarpements du secteur montagneux des Matmata et du jbel Demmer, principalement dans les vallées et dans les dépressions situées entre les 2 cuestas, les formations calcaires sont recouvertes, sur plusieurs mètres d'épaisseur, d'un matelas de lœss et de limons éoliens qui s'est déposé là durant les périodes humides du Quaternaire. Ce lœss fait la «richesse» agricole d'un pays par ailleurs exempt de sols assez profonds propices aux cultures annuelles. La dernière phase de dépôt, qui est comprise entre 30 000 et 10 000 ans BP (COUDE-GAUSSEN *et al.*, 1983, 1987), a subi des épisodes de pédogénèse (de 27 000 à 29 000 BP et de 20 000 à 22 000 BP), avec différenciation d'horizons carbonatés, et des reprises d'érosion localisées qui ont provoqué son ravinement en bad-lands dans

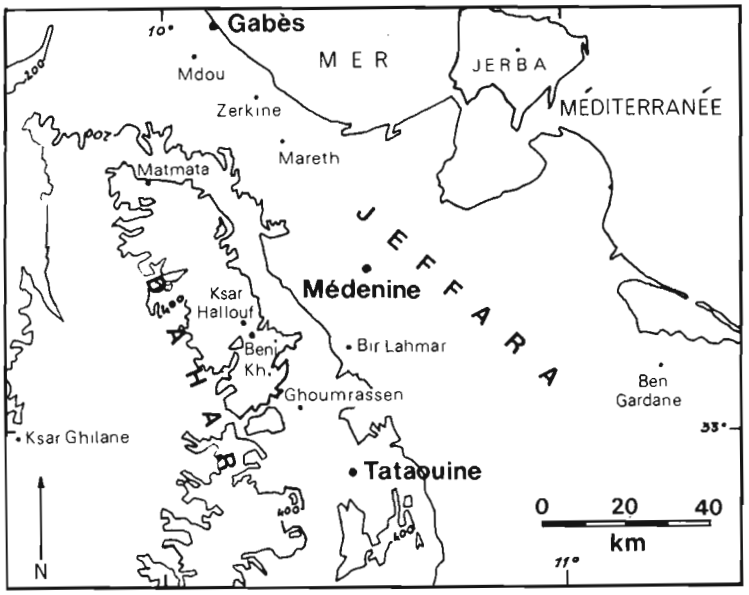


FIGURE 1- *Localisation.*

l'amont des bassins versants et son épandage sous forme de terrasses dans la plaine de la Jeffara (M'TIMET, 1979).

Cette région de la Tunisie présaharienne est en général très peu arrosée et les précipitations moyennes annuelles ne dépassent pas 250 mm (FLORET et PONTANIER, 1982).

Mais ce qui caractérise le climat est sa grande irrégularité ; de très fortes pluies peuvent succéder dans le temps à de très longues périodes de sécheresse. C'est ainsi que, les 3 et 6 Mars 1979, des pluies d'une telle violence s'abattirent sur le Sud tunisien qu'elles causèrent des crues énormes qui provoquèrent des dégâts considérables à l'infrastructure routière, aux habitations et aux cultures. On dénombra la destruction de 890 maisons, de 100 citernes publiques ou privées, de 1 400 km de pistes agricoles, et la perte de 7 600 ovins ou caprins (BONVALLOT, 1979).

Les oueds qui prennent naissance non loin de la ligne de crête s'écoulent sur des pentes relativement faibles vers l'ouest et le Sahara où ils se perdent ; vers l'est, en revanche, leur haut bassin versant, façonné dans un secteur de pentes très fortes, est relayé vers l'aval par de grands cônes de déjection caillouteux, puis par des glacis parcourus de chenaux bien calibrés. Les conditions de l'écoulement, tributaires des pentes mais également de la taille des bassins versants, sont donc beaucoup plus propices aux phénomènes d'ablation sur le versant tourné vers la Méditerranée que sur celui qui fait face au Sahara. Le relief a en outre une forte influence sur le volume des précipitations, comme le montre la figure 2 qui souligne un fort gradient pluviométrique en fonction de l'altitude. C'est donc dans les zones de plus fortes pentes que les pluies sont les plus abondantes et c'est également là que les phénomènes de ruissellement s'exerceront avec le plus de violence.

Là également, le maigre couvert végétal n'assure aucun rôle d'écran entre le sol et les pluies. Les escarpements calcaires sont en général occupés par une steppe claire à *Stipa tenacissima* (alfa) qui n'assure qu'un recouvrement maximal de 20 % (CHAHBANI, 1984). Les zones de limon éolien sont le domaine des steppes et des friches postculturales à *Artemisia herba-alba* et à *Arthrophytum scoparium*, alors que les glacis de l'aval sont recouverts de la même association ou d'une steppe à *Rhanterium suaveolens* s'ils

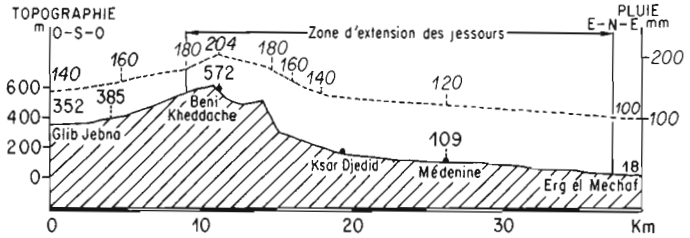


FIGURE 2 - *La double cuesta de Dahar dans la région de Beni Khedache et la Jeffara près de Médenine (les tiretés mentionnent la pluviométrie exceptionnelle de mars 1979).*

ont des sols sableux. Mais, dans un cas comme dans l'autre, les recouvrements restent faibles et la végétation n'interpose en aucun cas un écran efficace entre les pluies et le sol, si bien que les croûtes de battance formées par compaction de la surface sont généralisées dans de nombreux secteurs.

Dans cette région, sous bioclimat méditerranéen aride inférieur pour la plaine et aride supérieur pour la montagne (FLORET et PONTANIER, 1982), les conditions climatiques sévères sont extrêmement contraignantes pour la céréaliculture sans irrigation pourtant traditionnellement pratiquée dans la Jeffara au gré de pluies souvent ponctuelles. Irrégularité dans l'espace et dans le temps, d'une part, violence des courts épisodes pluvieux, d'autre part, ne favorisent pas une bonne gestion de l'espace. Pourtant, la culture des céréales, qui va en se développant, utilise de plus en plus de moyens mécaniques lourds ; elle revêt un caractère de loterie, 1 année sur 5 en moyenne garantit une récolte satisfaisante en un lieu donné. Seule, la dispersion des champs sur une vaste zone, de façon à réduire le risque climatique, permet, dans une certaine mesure, de remédier à cet inconvénient. Les parades traditionnelles à la sécheresse en plaine, basées sur l'épandage des crues des oueds sur les glacis par des prises directes, ou sur l'utilisation de la décrue autour de dépressions épisodiquement submergées, sont inadaptées à l'agriculture mécanisée et donc sous-employées.

À ces systèmes de production plutôt extensifs, mis en œuvre sur les glacis de l'aval dans les zones proches des concentrations humaines, s'oppose une mise en valeur d'un tout autre type dans les vallées de la zone montagneuse et le long de celles qui entaillent les glacis encroûtés de la Jeffara. Ici, le contrôle du ruissellement à des fins agricoles a toujours été une des préoccupations des habitants, même si l'on assiste, depuis quelques décennies à une désaffection évidente pour certains aménagements pourtant très efficaces*.

UN SYSTÈME INGÉNIEUX EN VOIE D'ABANDON : *TABIAS* ET *JESSOUR*

Les *tabias* sont des levées, digues ou barrages, en terre, édifiées sur des glacis, sur des versants ou dans les vallées pour lutter contre le ruissellement ou pour stopper les eaux afin de les contraindre à déposer leur charge solide et à s'infiltrer ; le *jesser* est un jardin irrigué situé derrière un barrage de talweg, et dans lequel les crues déposent des matériaux meubles ; par extension, *jessour* (pluriel de jesser) désigne souvent le couple barrage-jardin.

Les tabias et les jessours bien connus, ont été depuis longtemps considérés comme un des moyens les plus sûrs pour garantir les récoltes dans ces zones péridésertiques

* Désaffectation qu'il faudrait mettre en parallèle avec l'exode rural, difficilement chiffrable et l'émigration d'hommes jeunes vers l'étranger (6 à 7 % de la population totale des délégations de la région), et avec les difficultés de mécanisation de la culture dans ces situations.

climatiquement marginales pour l'agriculture (PERVINQUIERE, 1912 ; DESPOIS, 1961 ; BOUREAU, 1975 ; CHAHBANI, 1984). Les techniques employées ne sont pas propres au Sud tunisien. Elles ont été mises en œuvre dès l'Antiquité, partout en zones aride et semi-aride, chaque fois que le climat ne garantissait pas la régularité des récoltes. C'est le cas notamment en bordure du désert du Neguev (YAIR, 1985) dans une région, elle aussi, tapissée d'épandages éoliens de type lœss. Elles ont permis ainsi à des zones situées aux marges des déserts de subvenir à leurs besoins vivriers.

En Tunisie, les aménagements de talwegs n'ont pas été réalisés uniquement dans les montagnes de la région des Matmata. TIXERONT (1961) en retrouve trace aux Jbels Bou Hedma, Orbata et Ben Younès plus au nord. En Tunisie centrale, nos prospections personnelles signalent de petits barrages en pierres, vraisemblablement romains, qui retiennent un sol épais, dans maintes vallées des Jbels Semmama et Selloum non loin de Sbeitla et de Kasserine.

Les ouvrages ainsi réalisés dans le Sud tunisien sont surtout répandus dans les jbels, là où les talwegs encore étroits sont facilement aménageables ; c'est bien là qu'il faut rechercher les modèles les plus perfectionnés. Ils occupent chaque talweg, même le plus étroit, et le jalonnent d'une coulée de végétation où les couronnes vert sombre des oliviers, le pâle feuillage des figuiers contrastent avec l'aspect jaunâtre des versants arides qui les dominent (fig. 3).

La répartition régionale de ces petits aménagements répond avant tout à des critères pluviométriques. En effet, il faut que les pluies soient suffisamment importantes pour que le système puisse piéger une quantité d'eau telle qu'elle permette une bonne croissance des espèces qui en bénéficient. C'est ainsi que, vers l'ouest, sur le Dahar,

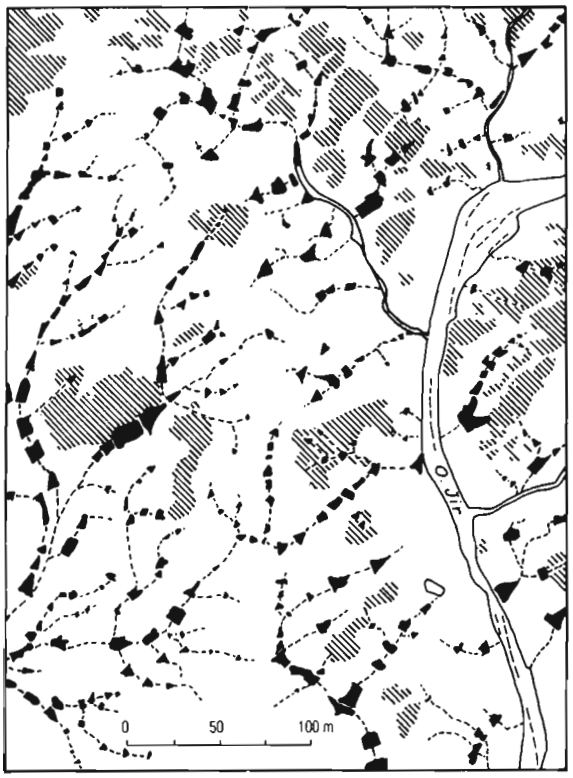


FIGURE 3 - *Réseau hydrographique et jessour (en noir) : en hachures les zones de bad-lands.* D'après *Photo aérienne 091 CL VII/250 TUN, échelle 1/25 000, tirée de* FLORET *et* PONTANIER *(1982).*

au-delà de la ligne de crête principale, avec une pluviosité qui passe rapidement sous les 100 mm.an^{-1}, les talwegs des oueds ne sont plus équipés que sur quelques kilomètres (TIXERONT, 1945-46). La rareté des pluies sur le revers ne permet plus alors aucune activité agricole permanente (fig. 2). Mais le volume des précipitations n'est pas le seul facteur de répartition des jessour dans la chaîne de montagnes. Encore faut-il que les pluies qui s'abattent sur les reliefs puissent éroder et les oueds prendre en charge suffisamment de matériaux meubles pour que, derrière chaque retenue, sédimente un sol épais. C'est donc sur les affleurements tendres de limons à nodules calcaires que l'on rencontrera les paysages agraires les plus accomplis, chaque petite vallée étant alors fractionnée en une multitude de petits champs en terrasses.

L'agriculteur du Sud tunisien a donc mis en œuvre, avec une maîtrise savante des conditions topographiques, des solutions techniques qui permettent de profiter aux mieux du ruissellement et de l'érosion des terres des bassins versants dominant les lieux qu'il se proposait de mettre en valeur. L'aménagement consistait alors en l'édification de barrages en travers du fond des oueds afin de piéger, immédiatement en amont, un sol de plus en plus profond et des réserves d'eau suffisantes pour permettre la céréaliculture et les cultures arbustives.

Il s'agit avant tout de l'édification, au moyen de matériaux prélevés au fond de la vallée ou sur les versants, d'une tabia, appelée aussi *ketra* lorsqu'elle est de taille réduite. Certaines parties, dont le soubassement et le mur de soutènement aval, requièrent l'utilisation de pierres (fragments de croûte calcaire, de rochers, galets roulés) que l'on ramasse à proximité. La hauteur des barrages varie de Deux à cinq mètres en général. Mais ces ouvrages ont pu avoir par le passé des tailles beaucoup plus considérables. Dans la région de Beni-Khedache, en effet, subsistent les vestiges d'énormes tabias, attribuées par les habitants à l'époque romaine, qui ont une dizaine de mètres de haut.

Les tabias peuvent avoir jusqu'à une centaine de mètres de longueur dans les vallées les plus larges mais, plus fréquemment, quelques dizaines de mètres. Leur profil en travers est grossièrement trapézoïdal (fig. 4). Leurs éléments constitutifs sont bien connus des agriculteurs qui leur attribuent des termes précis, car ils appartiennent au patrimoine culturel des populations arabo-berbères qui peuplent ces montagnes. C'est ainsi que le mur de pierres sèches qui arme la tabia vers l'aval, plus ou moins puissant, est appelé *sirra* ; l'avers, *ouajah*, qui disparaît peu à peu sous les apports alluviaux, et le revers tourné vers l'aval, *gfa*, sont colonisés par la végétation herbacée dont le réseau racinaire accroît la cohésion de l'ensemble. On veillait, et on veille encore, à ce que la digue ne devienne pas la demeure de mammifères fouisseurs comme le renard ou les gerboises. Le sommet de la tabia, *rass* ou *thbaba* selon les régions, utilisé comme sentier, permet de passer aisément d'un versant à l'autre. Suivant la position des digues par rapport à la tête de vallée, il existait tout un vocabulaire pour les désigner, mais celui-ci n'est plus connu que de quelques initiés.

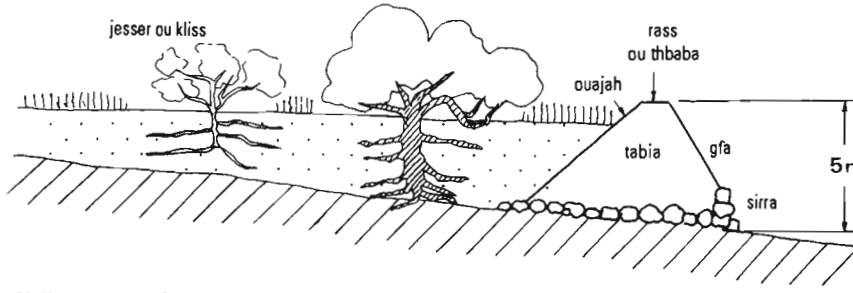


FIGURE 4 - *Profil d'une tabia et de son jesser.*

Derrière la tabia s'accumulent au cours du temps des volumes importants de matériaux meubles, généralement des limons et des sables arrachés au versant par le ruissellement. La Classification française des sols fait de ces matériaux des sols peu évolués d'apport alluvial sur alluvions récentes sableuses à sablo-limoneuses (M'TIMET et ESCADAFAL, 1982). Parfois aussi, lorsque, pour une raison quelconque, une tabia cède immédiatement en amont, des matériaux plus grossiers viennent recouvrir et stériliser le sol cultivable. Parfois même, jugeant le processus naturel de comblement de sa parcelle trop lent, l'agriculteur laboure le versant qui domine immédiatement son champ afin de favoriser le décapage par le ruissellement, puis il édifie une murette de collecte des eaux pour conduire l'écoulement en amont de sa tabia.

Le jesser ainsi créé emmagasine des quantités d'eau et de sol importantes. Le fellah a donc la possibilité, par ce système, de se livrer à des cultures relativement exigeantes en eau - oliviers, petits pois, lentilles, fèves, pastèques - qu'il ne pourrait pas envisager sans aménagement et qui donnent à chaque talweg un aspect constamment verdoyant. C'est donc une excellente technique de piégeage et de rétention d'eau et de sol qui a permis le maintien dans ces montagnes arides de populations solidemment accrochées à leurs terroirs. Mais ce système, pour se perpétuer, doit pouvoir résister aux plus fortes averses. C'est pourquoi il est doté de 2 principaux types de déversoirs :

- le déversoir latéral, *menfess*, est ménagé à une ou aux deux extrémités de la tabia à son contact avec les versants (fig. 5). Il consiste en général en une saignée incurvée dont le seuil se situe le plus souvent au niveau du tiers supérieur de la digue. Il permet à l'eau en excès de s'écouler vers les jessour de l'aval, car il s'agit aussi de ménager une bonne alimentation en eau aux parcelles voisines. Les surplus, qui s'écoulent, par ce type de déversoir, sur le versant contre lequel s'appuie la tabia, perdent leur énergie au cours de leur trajet, et ne provoquent donc pas de dégâts en arrivant dans le jesser de l'aval. La culée verticale du déversoir qui s'appuie contre la tabia est souvent en pierres sèches. Mais il arrive aussi qu'elle ne soit pas protégée. Dans bien des cas également, le seuil déversant est armé d'une couche de grosses pierres afin d'éviter l'érosion ravinante. Il ne paraît pas y avoir de règle bien précise quant à la présence sur chaque tabia de 1 ou 2 déversoirs de type menfess. Tout au plus peut-on noter, sans que cela soit une loi absolue, que les plus grandes sont équipées de 2 déversoirs. Parfois même, des digues à un seul menfess se voient dotées au fil du temps d'un second, le fonctionnement du premier ayant été jugé insatisfaisant. Au total, d'après nos observations (BONVALLOT, 1986), la technique du déversoir de type menfess est la plus employée puisque 60 % des ouvrages situés dans la zone de montagnes en sont équipés ;

- le déversoir central, *masraf*, dont 38 % des tabias sont munies, est beaucoup plus difficile à construire et demande plus d'investissements en travail et en matériaux. Il consiste à installer, au milieu de la digue, entre deux culées de pierres sèches ou maçonnées, un seuil déversant dont la partie aval est formée de pierres taillées disposées en escalier afin de briser l'énergie de l'eau. D'après les paysans, un tel type d'ouvrage n'est pas construit habituellement par eux, mais représente plutôt une innovation introduite par les pouvoirs publics depuis un demisiècle environ. Aussi est-il plus ou moins bien accueilli par les montagnards (*jbalia*). Car, pour qu'il puisse résister aux plus fortes crues, il faut qu'un tel ouvrage soit assis sur une barre rocheuse dure qui s'oppose aux affouillements, ce qui est rarement le cas (HIZEM, 1979). En outre, alors que le déversoir menfess peut parfaitement s'élargir naturellement par érosion latérale du versant (lorsqu'il est revêtu de formations superficielles meubles) lors des crues exceptionnelles, le lourd masraf, armé de solides culées verticales ne peut, s'il est insuffisamment large, évacuer assez d'eau et provoque alors la rupture de la tabia. Ces quelques considérations permettent de voir à quel point ce système des jessour, fruit d'une expérience ancestrale, assure aux paysans une bonne maîtrise de l'eau. Car

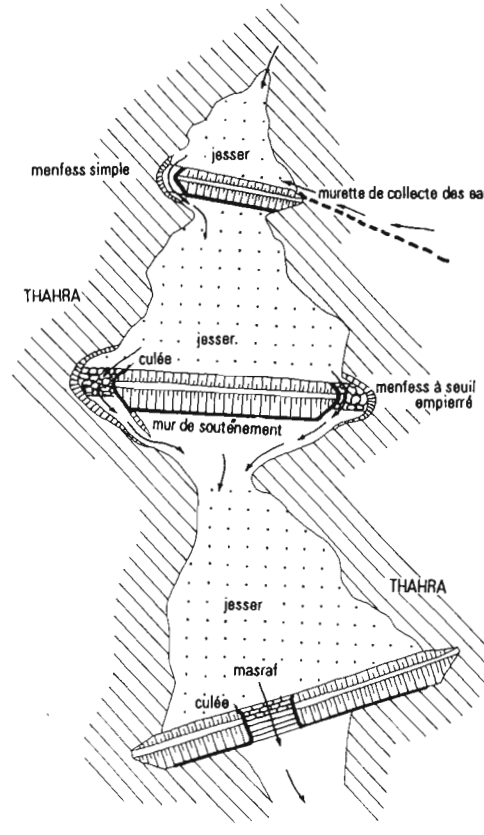


FIGURE 5 -*Tabias et déversoirs.*

tout ici réside dans la recherche d'un équilibre précaire entre les avantages retirés par un piégeage optimal de l'eau et de la terre et les risques encourus par les tabias. En effet, si les seuils des déversoirs sont trop haut placés, les jessour situés en aval seront dépourvus d'eau et les récoltes seront faibles. Si le déversoir lui-même n'est pas assez large, l'eau emmagasinée au cours de la crue risque de miner la digue et de provoquer une brèche qui, par érosion régressive, évacuera une bonne partie de la terre du jesser. En outre, la rupture d'une tabia entraîne presque inévitablement la rupture de celles qui sont situées en aval.

Si, au contraire, les seuils des déversoirs sont placés trop bas ou si les déversoirs sont trop larges, il y aura piégeage insuffisant d'eau et de sol et la production du jesser sera insatisfaisante pour le fellah. C'est donc un système qui demande des soins attentifs et une surveillance constante afin de lutter contre les effets des débordements. Dans la région de Beni Kheddache, par exemple, on sait qu'au-delà de 35 mm d'eau ruisselée, tous les jessour débordent (CHAHBANI, 1984), situation qui se reproduit à peu près tous les cinq ans pour la moitié des aménagements. Ce système exige donc des efforts permanents. La réfection des seuils, le colmatage des brèches, dues au ruissellement, et des terriers de rongeurs, la réédification des murs de soutènement, la surélévation progressive du faîte de la tabia et des seuils des déversoirs au rythme de l'alluvionnement, occupent le paysan après les récoltes de l'été. Force nous est de constater que c'est pourtant de moins en moins la loi générale puisqu'on assiste progressivement à un abandon de ces techniques, seules capables de s'opposer efficacement au ruisselle-

ment. Il s'agissait pourtant bien là d'une mise en valeur des talwegs à des fins de production agricole, qui permettait, par ralentissements successifs de l'eau de l'amont vers l'aval et par prélèvements échelonnés de celle-ci par chaque jesser, une régulation très efficace des oueds, un effet retardateur indéniable et, partant, une bonne protection des basses vallées contre les dévastations des crues.

L'expérience pluriséculaire des fellahs du Jbel en matière de construction de digues et d'aménagement des seuils reposait sur une subtile évaluation des paramètres de l'écoulement. Elle prenait remarquablement en compte, dans un calcul économique peut-être inconscient, l'éventualité de dégradations du système lors d'événements climatiques exceptionnels puisqu'il n'était pas conçu, comme ce fut certainement le cas pour les ouvrages réalisés sous l'Antiquité, pour résister aux crues les plus fortes et ne nécessitait donc pas de colossaux efforts de construction. Mais, comme nous l'avons vu plus haut, tabias et jessour supposent une présence constante de l'agriculteur sur son terroir, une forte occupation agricole qui tend, hélas, de plus en plus, à devenir marginale. Il est vrai que, dans cette région âpre et désolée, il est difficile de résister à l'attrait de la plaine, aux communications faciles, à la proximité de la ville et de ses équipements. Si les densités rurales pour une région aussi peu arrosée restent fortes de 15 à 25 hab.km^{-2} suivant les délégations (INST, 1984), certaines vallées sont actuellement quasi désertées, comme celle de l'oued Temzaïet, non loin de Bir Lahmar ; lors des tournées que nous avons effectuées pour évaluer les dégâts dus aux pluies de février-mars 1979, nous avons constaté que, dans cette vallée, 90 % des jessour avaient été gravement endommagés, alors que dans la vallée de l'oued el Khil, encore habitée, en même situation climatique, 30 % seulement des aménagements avaient été touchés (BONVALLOT, 1979). Il est vrai que de telles pluies ne s'étaient pas produites depuis 1933 (DRE-ORSTOM, 1979).

Si cette situation est due, dans certains cas, au départ des populations vers d'autres régions supposées plus accueillantes, elle peut résulter aussi, mais ceci est plus difficile à évaluer, du manque de main-d'œuvre masculine jeune, partie dans les grandes villes de Tunisie ou à l'étranger à la recherche d'emplois jugés plus lucratifs.

UN SYSTÈME EN VOGUE : LES DIGUES SUR PIÉMONT

Dans le même temps que se manifeste une déprise rurale en montagne qui provoque l'abandon des vallées et des ingénieux systèmes qui les mettaient en valeur, se multiplient les digues de piémont sur les glacis de la Jeffara. Comparée aux jessour du Jbel, elles apparaissent comme des aménagements bien rudimentaires qui, paradoxalement, ont la faveur de tous les agriculteurs, qu'ils soient ou non descendus des montagnes pour «mieux vivre» à leur pied.

Il s'agit de digues basses «fusibles», de quelques centaines de mètres de long, édifiées au moyen de tracteurs munis de pelleteuses et qui interceptent le ruissellement anastomosé des zones d'épandage ou le ruissellement pelliculaire de la surface des glacis. Souvent, les oueds qui descendent des montagnes étalent largement leurs eaux sur de grands cônes de déjection surbaissés et il s'agit de créer, comme le long des talwegs de l'amont, mais sur des surfaces beaucoup plus importantes, des conditions favorables à la réussite de l'arboriculture et de la céréaliculture. En fait, cette procédure d'interception du ruissellement de piémont a fait passer le fellah, de l'autarcie dans laquelle il vivait, à la pratique d'une agriculture spéculative, où l'on essaie de produire plus qu'on a besoin, hautement prédatrice et consommatrice d'espace, et c'est bien là ce qui inquiète pour l'avenir des aménagements de la montagne.

Ici, par souci de rentabilité, il n'y a pas d'investissement coûteux (hors celui de départ) comme la construction de déversoirs et pas d'entretien fréquent des digues. Il

est en effet impératif pour le paysan de trouver des solutions qui, malgré les dépenses entraînées par l'utilisation des tracteurs, lui procurent des bénéfices acceptables. Il se limite donc à construire une digue en terre, de 2 m de haut tout au plus, qui, vue en plan, à la forme d'un V très évasé dont la pointe est tournée vers l'aval. Les matériaux sont compactés de façon rudimentaire par la pelleteuse. Les extrémités des branches du dispositif sont parfois armées de pierres sèches récoltées à proximité, afin d'éviter de trop gros dégâts lorsque l'eau se déverse.

La compaction mal assurée par les engins mécaniques, la mauvaise implantation des digues vis-à-vis de l'écoulement (la bissectrice de l'angle formé par les deux branches de la digue est en effet rarement parallèle à la ligne de plus grande pente, si bien que les déversements se font d'un seul côté), l'absence de déversoir, le manque d'entretien, provoquent souvent la rupture du système. Ces accidents sont d'ailleurs pris en compte dans le calcul de la rentabilité des installations. Car, en édifiant de très longues digues sur le glacis, le fellah s'attend à les voir céder de temps en temps, mais cet inconvénient lui semble largement compensé par les avantages d'une vaste superficie, parfois proche de l'hectare, cultivée d'un seul tenant par les moyens modernes.

En mars 1979, cependant, les dégâts au système des glacis ont affecté environ 60 % des ouvrages. La rupture en chaîne des dignes a provoqué sur ces surfaces où rien ne s'oppose véritablement au ruissellement, une onde de crue dévastatrice qui, dans la région de Ksar Jedid, par exemple, a emporté la route goudronnée en plusieurs points et sur plusieurs centaines de mètres de longueur.

La vogue des aménagements modernes sur le glacis de la Jeffara traduit donc la désaffection de plus en plus prononcée pour les jessour traditionnels du jbel et accompagne la profonde mutation d'une société qui quitte la montagne ancestrale pour s'établir dans la plaine et se livrer à d'autres activités que celles qu'elle pratiquait jusque-là. Ce relatif abandon s'explique d'ailleurs aisément par les difficultés de la vie en montagne comparée à celle que l'on peut mener sur les piémonts, non loin des grandes villes, dans un moins grand isolement.

Tout contribue d'ailleurs aux mutations des dernières décennies. L'utilisation quasi générale du tracteur, pour l'achat duquel l'argent de l'émigration est le bienvenu et les facilités consenties par l'État, déterminantes, permet la mise en culture de grandes surfaces qui n'existent d'ailleurs pas dans les talwegs étroits des montagnes. La culture pas à pas des petites parcelles des jessour apparaît dès lors fort rébarbative, dépourvue d'intérêt et fort peu lucrative.

En fait, les emprunts technologiques à la tradition dans l'édification des ouvrages de piémont sont quasiment inexistants en dehors de celui de l'utilisation de la digue en terre. Il s'agit donc d'une autre orientation et non pas d'une continuité dans le mode d'exploitation de la terre. Et pourtant le système du piémont ne peut se concevoir sans celui des talwegs montagnards et sans le contrôle à l'amont de l'intensité du ruissellement. Car, si les conditions de l'écoulement s'aggravent en montagne, si les volumes ruisselés s'y accroissent, les épandages sur les glacis de l'aval seront de plus en plus dévastateurs et, en tous les cas, difficiles à capter par les systèmes actuellement mis en œuvre. *C'est pourquoi le développement d'une agriculture de piémont*, s'il est inéluctable compte tenu des conditions socio-économiques du moment, *doit être accompagné d'un maintien des aménagements traditionnels* qui sont actuellement délaissés *dans les hauts bassins versants*. Il est en effet inconcevable de promouvoir un aménagement agricole intégré sur les piémonts, comme à Ksar el Ababssa, sans se préoccuper également de l'amont dans les jbels. Si l'on ne peut plus compter sur la présence de nombreux agriculteurs en ces lieux, leur relais doit être pris par l'État de façon beaucoup plus intensive que ce qui a été fait jusqu'à présent. Mais, si intensification de l'aide étatique il doit y avoir, encore faut-il qu'elle réponde à un certain nombre de considérations techniques. La principale nous semble être l'abandon impératif de la

technique des déversoirs de type masraf. Cet ouvrage, s'il est valable d'un point de vue hydraulique, ne l'est plus lorsque l'on considère les atteintes qu'il subit au moment des fortes pluies. Édifié en pierres sèches, parfois consolidé par du ciment, il présente de nombreuses surfaces de discontinuité avec la tabia en terre et se trouve finalement assez facilement détruit par les eaux. Il faut, en outre, qu'il soit assis sur un banc de roche dure pour éviter les affouillements de la base, cas rarement réalisé dans une région où les limons affleurent dans la quasi-totalité des vallées. Sa construction nécessite de gros investissements si l'on considère le volume des matériaux qu'il requiert et les soins à y apporter. Un inconvénient majeur du masraf est, de l'avis même des paysans, son manque de capacité à retenir beaucoup d'eau de la tabia puisqu'il est toujours très bas et largement ouvert.

Mais pour les fellahs des jbels, son défaut principal est d'être «statique». Le seuil déversant horizontal, très large et peu élevé par rapport à la surface du jesser ne peut, en effet, être surélevé progressivement au fur et à mesure de l'accumulation des alluvions car la vitesse de l'eau y est trop forte lors des déversements. Si bien que, lorsque le niveau de la parcelle atteint celui du seuil, l'agriculteur comble le masraf et revient à la technique traditionnelle du ou des déversoirs menfess. La désaffection pour les déversoirs de type masraf, technique imposée de l'extérieur, est générale dans toute la zone de montagne à tel point que, psychologiquement, le paysan se sent moins concerné par ses jessour lorsque ceux-ci ont fait l'objet d'une intervention de la part des «chantiers» financés par l'État.

Il importe donc de revenir à la technique des menfess qui ne présente que des avantages, dont l'essentiel est de pouvoir être mise en œuvre directement par le paysan qui la connaît bien. À l'inverse du masraf, le menfess, destiné à évacuer uniquement les surplus d'eau, est parfaitement évolutif puisque l'agriculture, en plaçant le seuil assez haut au-dessus de la surface du jesser, peut fort bien, si le besoin s'en fait sentir, accroître le piégeage de l'eau et de la terre en ajoutant une ligne de pierres sèches. Mais, dans tous les cas, l'aide de l'État devrait se faire de façon beaucoup plus discrète que pour la construction à grands frais de déversoirs masraf et permettre aux propriétaires et à leur famille d'être associés aux travaux. Car la lutte contre l'abandon de ces montagnes doit être l'œuvre de tous et l'action étatique correctement réorientée doit impérativement se poursuivre et même se renforcer. La menace est grande, en effet, de voir se développer dans les vallées, à l'image de celles de la région de Tamezret ou de Ksar el Ababsa, des paysages agraires désolés où de maigres céréales poussent chichement entre des ravins violemment incisés dans les sols d'anciens jessour. C'est à notre avis une menace très grave qui pèse sur les piémonts très peuplés car, si l'abandon des techniques traditionnelles se poursuit, les eaux, qui ne seront plus freinées sur les fortes pentes, gagneront très rapidement la plaine et y provoqueront des dégâts beaucoup plus importants que ceux qui ont été déplorés jusqu'à présent.

J. BONVALLOT : *géographe*, centre ORSTOM, BP 1857, Yaoudé, Cameroun

BIBLIOGRAPHIE

BONVALLOT (J.), 1979. - Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médenine (Tunisie du Sud) au cours des pluies exceptionnelles de mars 1979. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum.*, vol. XVI (3) : 233-249.

BONVALLOT (J.), 1986. - Tabias et jessour du Sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXII (2) : 163-171.

BOUREAU (P .Y.), 1975. - La terre et les hommes du Djebel Demmer (Sud Tunisien). Thèse Doctorat 3e cycle, géographie, université de Toulouse-le-Mirail. 292 p., *multigr.*, 1 carte h.t.

CHAHBANI (B.), 1984. - Contribution à l'étude de l'érosion hydrique des lœss des Matmatas et de la destruction des jessour. Bassin versant de l'oued Demmer, Beni Khedache, Sud Tunisien. Thèse Doctorat 3e cycle, géomorphologie, université de Paris-I (Panthéon-Sorbonne). 187 p. *multigr.*

COUDE-GAUSSEN (G.), OLIVE (P.) et ROGNON (P.), 1983. - Datation de dépôts lœssiques et variations climatiques à la bordure nord du Sahara algéro-tunisien. *Rev. Géol. dyn. et Géogr. phy.*, (24) 1 : 61-73.

COUDE-GAUSSEN (G.), ROGNON (P.), RAPP (A.) et NIHLEN (T.), 1987. - Dating of peridesert lœss in Matmata, South Tunisia by radiocarbon and thermoluminescence methods. *Z. geomorph.* NF., 31 (2) : 129-144.

DESPOIS (J.), 1961. - La Tunisie. Collection A. Colin, Paris, 224 p.

DRE (Direction des ressources en eau)-ORSTOM, 1979. - Compte rendu de la tournée du 18 et 19 avril 1979 par J. Girard, ORSTOM Tunis, 4 p. *multigr.*

FLORET (Ch.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 150, 544 p.

HIZEM (H.), 1979. - Construction des jessour. Séminaire sur la recherche scientifique et le développement des zones arides en Tunisie. Tozeur, ministère de l'Agriculture, Tunis. 221-224.

INST (Institut national de la statistique), 1984. - Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Ministère du Plan, Tunis. 283 p. *multigr.*

M'TIMET (A.), 1979. - Étude pédologique du bassin versant de l'oued Metameur. Zone aval (Plaine des Ababsa). *Multigr.* DRES-ORSTOM, Tunis, 132 + annexe 6 p. + pl. h.t. + cartes.

M'TIMET (A.) et ESCADAFAL (R.), 1982. - Carte des ressources en sols de la Tunisie. Feuille de Médenine. DRES Tunis,18 p. *multrig.* 1 carte h.t.

PERVINQUIERE (L.), 1912. - Rapport sur une mission dans l'extrême Sud Tunisien (frontière tuniso-tripolitaine). *Mémoires et Documents*, n° 2. Direction générale de l'agriculture, du commerce et de la colonisation, Tunis, 62 p.

TIXERONT (J.), 1945-1946. - L'hydraulique agricole en Tunisie. Archives du BIRH, Tunis. 13 p. *multigr.*

TIXERONT (J.), 1961. - Note sur la mise en valeur hydraulique des territoires du Sud Tunisien. Secrétariat d'État à l'Agriculture, Tunis. 113 p. *multigr.*, annexes, cartes.

YAIR (A.), 1985. - The effect of hillslope hydrology on the spatial distribution of ancient agricultural systems in the Northern Negev desert. International Geomorphology. Abstracts of papers for the First Intern. Conf. on Geomorphology : 667.

Michel LESOURD

Maîtrise et valorisation de l'eau aux îles du Cap-Vert

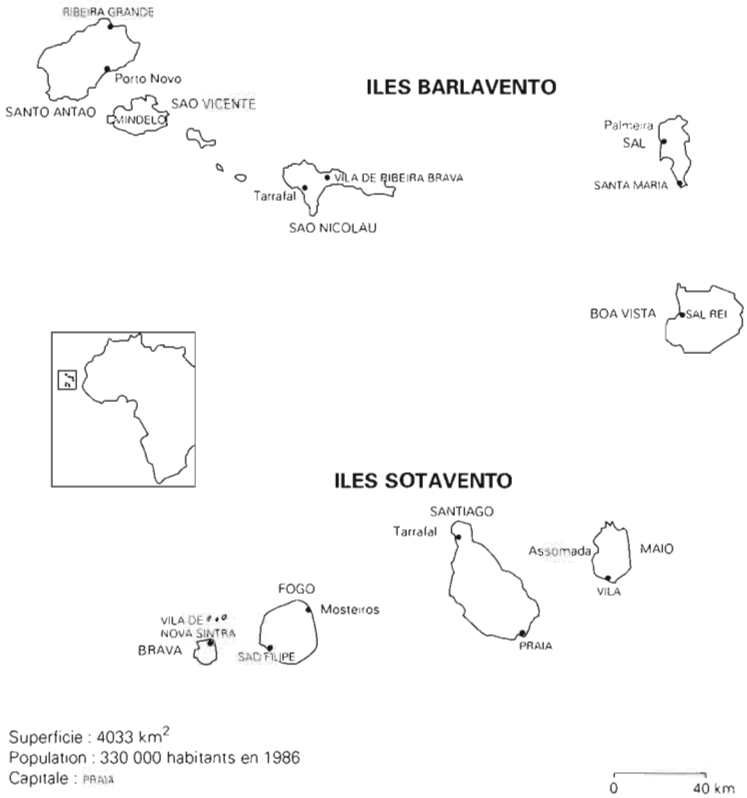
Le défi d'un État et de ses paysans à une nature ingrate

INTRODUCTION

L'archipel du Cap-Vert (4 033 km², 9 îles habitées, 5 îlots), est entièrement compris dans la zone sahélienne ouest-africaine. Situé à 500 km au large des côtes sénégalo-mauritaniennes (entre 14° 48' et 17° 12' de latitude nord, 24° de longitude ouest), ce Sahel océanique est caractérisé par un milieu marqué par l'aridité et par la rareté des ressources hydriques. Le matériel volcanique et les très fortes pentes de ces montagnes dans la mer constituent des handicaps supplémentaires en matière de maîtrise de l'eau.

Depuis son indépendance, acquise en 1975, la République du Cap-Vert s'efforce de maîtriser les médiocres ressources hydriques du pays et d'en valoriser l'utilisation en développant notamment l'irrigation. En aucun cas, les responsables du pays ne considèrent la situation bioclimatique des îles comme irréversible. Nourris d'expériences menées dans d'autres régions semi-arides du monde, comme le Proche-Orient, l'Asie centrale soviétique ou l'Arizona américain, ils réalisent une planification cohérente de l'aménagement rural agricole, en relation avec les graves problèmes de sous-emploi et d'inégalités sociales, ainsi qu'avec la nécessité de limiter l'exode rural et de remédier à la dégradation anthropique multiséculaire du milieu montagnard local. Sans chercher à atteindre une illusoire autosuffisance alimentaire, la République du Cap-Vert tente de réorienter ses productions agricoles commerciales et vivrières pour une meilleure satisfaction des besoins de la population.

Les observations et remarques exposées dans ce travail sont le fruit de plusieurs missions de recherche effectuées au Cap-Vert depuis 1985. Les observations ont privilégié certaines vallées (*ribeiras*) et certaines îles, en raison de l'intérêt des aménagements qu'elles présentaient : Santo Antâo (Ribeira das Pombas, R. das Patas, R. Grande), Sao Nicolau (R. de Fajá), Santiago (R. de Santa Cruz, R. Grande). Des visites d'exploitations agricoles d'État (Monte Genebra à Fogo, Justino Lopès à Santiago) et de divers périmètres de reboisement permettent de mieux comprendre les problèmes de gestion de ressources liées à l'eau et de restauration du milieu. Des discussions avec divers responsables techniques et politiques du développement ont eu lieu, notamment avec M. J. PEREIRA SILVA, ministre du Développement rural et des Pêches. Enfin, une documentation très dispersée a complété et servi de comparaison avec mes observations personnelles. La plupart sont des rapports d'expert, ainsi que des études plus consistantes de projets d'aménagement dont on trouvera une liste partielle en bibliographie.



Superficie : 4033 km^2
Population : 330 000 habitants en 1986
Capitale : PRAIA

FIGURE 1 - *République du Cap-Vert (croquis de situation).*

LA DIFFICILE QUÊTE DE L'EAU

L'importance des contraintes naturelles

Au Cap-Vert, les contraintes climatiques, géomorphologiques et hydrologiques sont décisives.

L'archipel est situé dans la zone de rencontre des alizés du nord-est et des vents de mousson qui apportent l'air chaud et humide du sud-ouest. De l'ampleur des oscillations du front intertropical (FIT) vers le nord dépend le volume des précipitations annuelles. Mais l'irrégularité interannuelle du déplacement du front et la position très septentrionale de l'archipel donnent le plus souvent une situation de faible et très irrégulière pluviosité. De plus, comme les autres États sahéliens, le pays subit depuis plus de deux décennies une crise prolongée de sécheresse. Seuls, les versants exposés «au vent» des alizés relativement humides de l'est reçoivent des précipitations notables et des aérosols pendant la saison pluvieuse (juillet à octobre), car les vents de mousson restent exceptionnels. La station de Praia (Santiago, altitude : 64 m) totalise 228 mm de précipitations moyennes annuelles pour la période 1875-1986. À São Nicolau, Vila de Ribeira Brava a reçu 250 mm en moyenne annuelle entre 1944 et 1982.

Les variations saisonnières sont déterminantes. La référence à la notion agrométéorologique de «pluie utile» montre bien la médiocrité de l'alimentation pluviométrique.

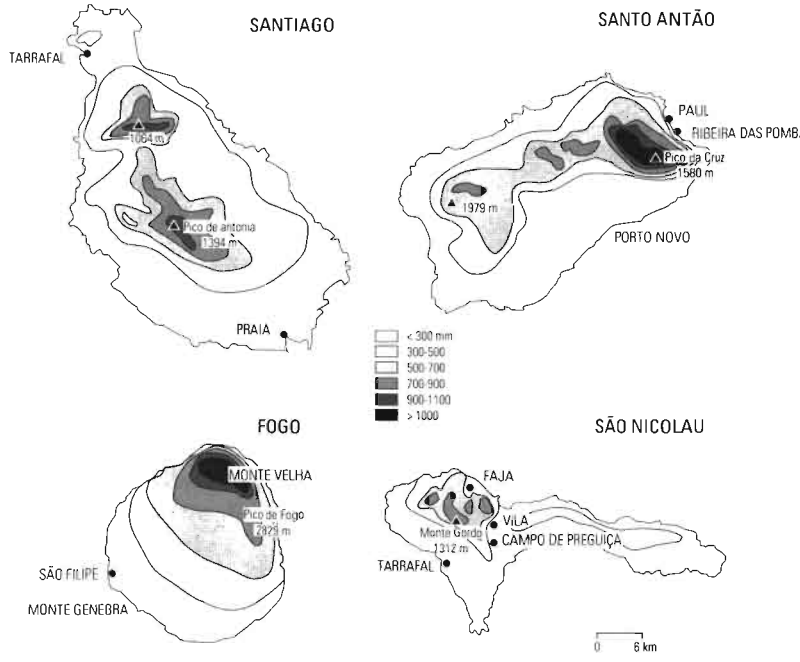


FIGURE 2 - *Répartition des précipitations dans les îles agricoles en république du Cap-Vert.*

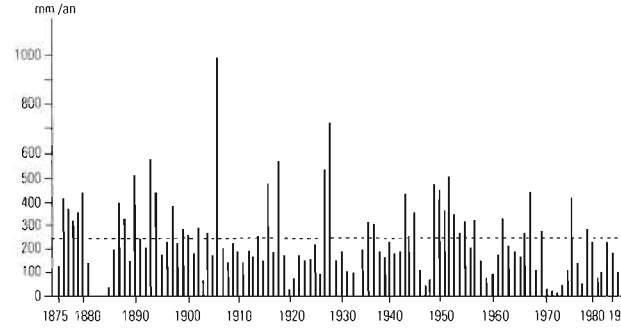


FIGURE 3 - *Évolution de la pluviométrie annuelle moyenne Praia-île de Santiago (1875-1984) (alt. 64m).*

Les probabilités pour que la pluie atteigne certains seuils sont médiocres ainsi qu'en témoignent pour l'île de Santiago les données du tableau I.

Au-dessous de 350 m d'altitude, le risque pour le maïs, principale plante alimentaire de l'archipel, est considérable. Au total, les cultures non irriguées sont aléatoires 2 années sur 3 dans le Cap-Vert subhumide (pluie inférieure à 600 mm.an^{-1}) et semi-aride (pluie inférieure à 400 mm), ces deux zones oro-bioclimatiques représentant 75 % de la superficie de l'archipel.

L'analyse du déficit hydrique annuel révèle le stress subi par la végétation. A Santiago, aucune station, même montagnarde, n'a reçu suffisamment de pluie, compte tenu des températures et de l'évaporation qui les accompagnent, pour compenser les

Tableau I - Probabilité (%) d'occurrence des pluies pour diverses intensités et pour différents mois

		PROBABILITÉS (%)			
	mm.mois^{-1}	juillet	août	septembre	octobre
Praia (alt. 64m)	50	6	45	58	28
	75	3	18	43	21
	100	1,8	10	33	16
	150	0,7	3	19,5	10
Trindade (alt. 205m)	50	6	48	68	36
	75	1,8	33	55	28
	100	0,2	22	44	23
	150		8,5	29	15,5

pertes en eau. Quant aux «coups d'harmattan» de la saison sèche, ils sont particulièrement redoutables. L'abaissement brutal du taux d'humidité de 80 % à 10 % pendant plusieurs heures suffit pour provoquer d'irréparables dégâts aux cultures, même irriguées.

L'archipel est constitué de matériel éruptif dont la mise en place remonte à la fin de l'ère tertiaire. Les trois îles orientales, Sal, Boa Vista et Maio, plus anciennes, ont été aplanies et partiellement sédimentées. Les autres îles sont très montagneuses (Pico de Fogo, 2 921 m) et des manifestations de volcanisme actif ont régulièrement lieu (la dernière éruption de Fogo remonte à 1951).

La tectonique puissante qui a permis la constitution de l'archipel a été relayée par une érosion considérable qui, notamment pendant les grandes périodes pluviales post-wurmiennes, a contribué à la réalisation du contexte géomorphologique actuel dominé par de très fortes pentes. La combinaison des pentes, d'un matériel volcanique de résistance inégale (basaltes, tufs, brèches) et de précipitations très brutales (grains) - il peut tomber plus de 500 mm en 24 heures sur les sommets - rend très violente l'érosion par le ruissellement, tant sur les pentes que dans les bas-fonds de vallée, où l'attaque latérale est très forte. La protection des berges va ici de pair avec les travaux d'irrigation.

Une grande partie des eaux pluviales se perd en mer, mais le reste s'infiltre dans les roches perméables. L'eau est stockée dans des nappes. Il en existe d'anciennes, fossiles, et d'actuelles. Selon les structures géologiques, les sources jaillissent pour la plupart soit en altitude, soit au niveau de la mer. Des sources sous-marines ont été découvertes grâce à des analyses d'images de télédétection satellitaire.

Les ressources hydriques souterraines totales du Cap-Vert sont estimées à 235 000 m^3.j^{-1}, dont 180 000 m^3.j-1 pour l'eau agricole. Cependant, compte tenu des contraintes économiques et techniques actuelles, il n'est pas possible de mobiliser plus de 120 000 m^3.j^{-1}. En 1985, environ 75 000 m^3.j^{-1} étaient utilisés pour l'agriculture. Les possibilités sont donc loin d'être illimitées. À raison d'une consommation moyenne à l'hectare de 35 m^3.j^{-1}, cela correspond à 1 265 ha supplémentaires théoriquement irrigables, et moins si l'utilisation est continue en contre-saison. Ceci est inférieur aux possibilités topographiques théoriquement irrigables qui sont de 3 350 ha au total. Actuellement, un peu moins de 1 900 ha sont irrigués.

Ces potentialités sont, certes, modestes, mais la productivité d'un hectare de *regadio* (parcelles irrigables) est 20 à 25 fois supérieure à celle d'un hectare de *sequeiro* (parcelles de culture sèche). L'aventure vaut donc d'être tentée.

L'État, principal acteur d'une active politique de l'eau

Dans les dernières années du régime colonial, le Portugal avait mis en place une politique de développement de l'hydraulique de l'archipel. Depuis le début du XXe siècle, la succession d'années exceptionnellement sèches avait entraîné de terribles famines. La dégradation progressive de la situation politico-économique de l'Empire, le statut de *assimilados* donné aux Cap-Verdiens obligèrent aussi le colonisateur à œuvrer pour une valorisation des ressources agricoles des îles.

Depuis l'Indépendance, l'État a fait de la lutte contre les contraintes naturelles un des axes majeurs de sa politique : lutte contre l'érosion, reforestation en sont les principaux aspects. La maîtrise de l'eau par la mise en valeur des terres irrigables et l'amélioration des surfaces irriguées existantes est une autre action d'une politique d'ensemble destinée à augmenter les ressources hydriques de l'archipel.

Au-delà, ce sont les nécessités alimentaires de la population qui expliquent aussi la politique de l'eau, ainsi que l'importance relative de l'activité agricole. Les deux tiers de la population cap-verdienne vivent en milieu rural, et 45 % des ruraux actifs sont des agriculteurs... La valorisation des activités agricoles et d'élevage au Cap-Vert, sans prétendre résoudre le problème alimentaire de l'archipel, devrait permettre de créer des emplois et de limiter un exode rural menaçant. Elle devrait aussi apporter quelques devises par l'exportation de matières premières agricoles.

Le programme cap-verdien est ambitieux. Entre 1976 et 1979, pendant la période d'émergence, l'État a surtout cherché à faire le point des ressources hydrauliques. Le premier plan national de développement (1981-1985) a été marqué par l'élargissement des recherches hydrogéologiques et une première phase de réalisations techniques et économiques dans les quatre principales îles agricoles. Le deuxième plan (1986-1990) est plus ambitieux. S'il garde les mêmes orientations en matière de lutte contre la désertification avec le traitement intégré de plusieurs bassins versants, il insiste aussi sur la valorisation de l'eau : création de la *Junta de Recursos Hídricos*, chargée de faire le point sur les informations existantes et potentielles, et réalisation d'un schéma directeur d'utilisation des eaux qui prévoit la création de 240 à 260 ha de terres irriguées d'ici 1990. Cet objectif peut sembler modeste, mais le Cap-Vert tient à faire preuve de prudence compte tenu des difficultés techniques et commerciales qui caractérisent l'économie des cultures irriguées.

Enfin, aux actions menées par l'État, s'ajoutent des réalisations paysannes davantage limitées à des aménagements ponctuels de terroirs, à l'exception, toutefois, du terroir de Fajá, sur l'île de São Nicolau.

LES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES : RECHERCHE, CAPTAGE, STOCKAGE DE L'EAU

Recherche et captage

Comme l'essentiel des besoins en eau ne peut être fourni que par les eaux souterraines, l'effort pour localiser, mesurer et connaître le fonctionnement de ces nappes a été particulièrement important. Le travail a été confié, après l'Indépendance, principalement à des organismes de recherche tel le Burgeap, organisme français de recherches géologiques appliquées. Ce dernier s'est attelé à la difficile tâche d'actualisation des données qui concernent les sources et les aquifères de l'archipel répertoriées par diverses missions, surtout portugaises, avant 1975.

Ces recherches hydrologiques ont été complétées par divers travaux d'hydrologie dans les bassins versants des îles et de définition des sites de mobilisation des eaux superficielles. Les résultats ont permis d'élaborer plusieurs projets d'utilisation de nappes fossiles ou actuelles. Dans la mesure où l'eau de consommation domestique est une denrée rare, ces projets ne sont pas seulement tournés vers une utilisation agricole de l'eau.

Les travaux de captage sont généralement réalisés dans le cadre de projets régionalisés par île et par vallée, la partie technique étant confiée à des partenaires étrangers. Sur la seule île de Santiago, les projets du deuxième plan seront réalisés avec notamment l'aide des Saoudiens, des Français et de la Communauté économique européenne... Rappelons que le poste «ressources hydriques» (captage, stockage, adduction d'eau) représente 27 % du budget quinquennal du ministère du Développement rural et pêches (MDRP).

Les techniques sont variées. Sources améliorées, puits actionnés par motopompe ou par éolienne, forages, digues de captage voisinent avec des réalisations plus sophistiquées, comme les galeries drainantes. Ainsi, à Fajá (São Nicolau), une galerie de 2 180 m a été réalisée pendant le premier plan, qui a permis, là où n'existait qu'un sequeiro, la mise en culture de plus de 35 ha dans la basse vallée. D'autres sont en cours de réalisation dans les îles de Santiago et Fogo.

Stockage et utilisation de l'eau

Par rapport aux techniques traditionnelles que sont les rigoles cimentées (*levadas*), qui courent à flanc de versant et distribuent l'eau par gravité, et les réservoirs (*tanques*), les réalisations nouvelles reprennent et innovent peu. Au sol, la pose de tuyaux suivant le profil en long des rivières (*ribeiras*), la réfection ou la création de nouvelles levadas et la multiplication des réservoirs ont permis de développer de nouveaux périmètres irrigués. Ces réalisations sont nombreuses à Santo Antão, où la coopération néerlandaise a travaillé dans plusieurs ribeiras et dans une moindre mesure à São Nicolau, grâce à la coopération française. Une des conséquences géographiques de ces travaux est la transformation des ribeiras montagnardes : d'ensembles relativement simples, avec une irrigation d'embouchure (nappe phréatique proche), on passe à une organisation plus complexe où apparaissent, en fonction des facilités topographiques, des chapelets de micro-oasis étagées suivant le profil en long. Dans ce contexte, les ribeiras à profil transversal en U offrent davantage de possibilités que celles à profil en V. Une autre conséquence est la multiplication des périmètres de très petite taille en des lieux isolés, comme sur le littoral nord de l'île de São Nicolau, en zone hyperaride.

Diverses techniques d'irrigation existent au Cap-Vert. Petites et grandes exploitations réalisent à cette occasion des terrasses de culture, aux dimensions variées, mais toujours étroites, de manière traditionnelle. Les petites exploitations amènent l'eau aux plantes par des rigoles en terre, parfois empierrées, jusqu'à des casiers de petite taille fermés par une diguette en terre. Leur création et leur entretien sont entièrement manuels. Dans les grandes exploitations, l'exhaure est davantage mécanisé. L'irrigation se fait à la raie et l'eau est amenée par des canaux cimentés. Depuis quelques années, l'irrigation par aspersion y est apparue, mais on la trouve plus particulièrement dans les fermes d'État telles Monte Genebra (Fogo) ou Justino Lopes (Santiago).

Un exemple d'aménagement : la vallée de Fajá (île de São Nicolau)

La galerie a été creusée subhorizontalement dans la vallée de Fajá, au nord de l'île. Elle va chercher l'eau 2 180 m plus loin dans la nappe de la vallée qui se trouve dans des alluvions fossilisées par des cendres et des lapillis du Monte Gordo. Cette nappe glisse sur des laves fossiles peu perméables. Le débit maximal théorique est de 5 000 $m^3.j^{-1}$, mais, en tenant compte de la recharge naturelle, le débit maximal d'utilisation a été limité à 1 000 $m^3.j^{-1}$ (il pourra, si la pluviométrie le permet, être porté à 1 500 $m^3.j^{-1}$). Commencé en 1980, l'ouvrage a été achevé en 1986.

L'aménagement du périmètre irrigué a été effectué sur des terres qui, avant la mise en service de la galerie, étaient des sequeiros. La venue de l'eau, en effet, a précipité la réalisation spontanée, par les paysans, d'aménagements de petite hydraulique, tandis que l'État se chargeait de la construction des réservoirs principaux, d'une capacité de 80 à 100 m^3 répartis sur les deux rives de la vallée. Dès le mois de mai 1984, l'eau coulait à raison de 300 $m^3.j^{-1}$ et elle était distribuée par un petit aqueduc. Les canaux d'amenée d'eau aux champs ont été réalisés en terre, éventuellement pavés de cailloux plats, et les casiers sont de facture traditionnelle. Au total, plus de 35 ha bénéficiaient de l'apport d'eau de la galerie.

Depuis 1987, le MDRP s'efforce de rationaliser la distribution de l'eau sur le périmètre. L'aménagement de nouveaux tanques et de levadas, en ciment, contrôlées par des jeux de vannes, est en cours : 8 réservoirs sont prévus, ainsi que 5 100 m de levées.

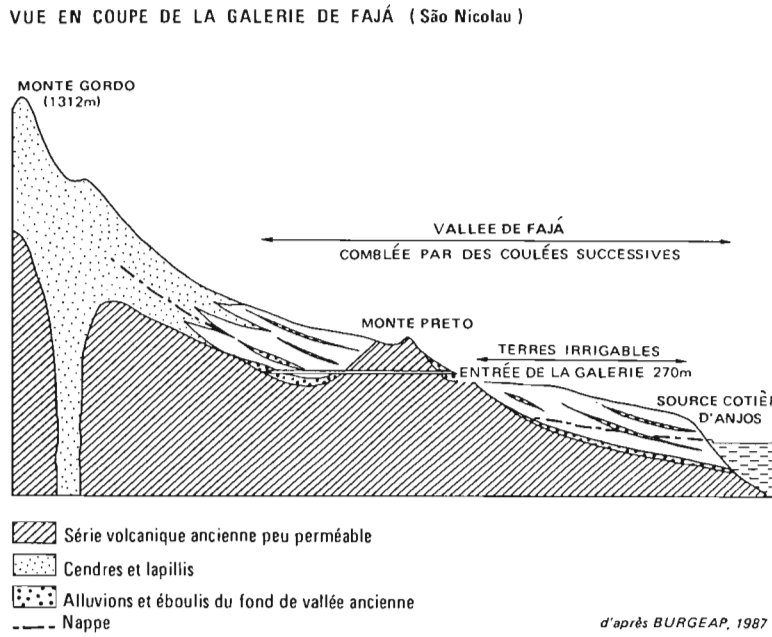


FIGURE 4- *Vue en coupe de la galerie de Fajá (São Nicolau).*

Ménager l'avenir de l'eau

Simultanément à la valorisation agricole de l'eau, l'État s'est engagé dans une politique de lutte contre l'érosion et de reboisement. Si ces actions sont destinées à protéger le milieu et les hommes, elles contribuent aussi à une meilleure gestion des ressources hydriques. Elles ont notamment un rôle d'amélioration des nappes de stockage des eaux de surface ; 39 % du budget quinquennal du ministère du Développement rural et des pêches est consacré à la conservation des sols, des eaux et à la reforestation.

Le contrôle des eaux de ruissellement est assuré par la multiplication des digues en gabions qui coupent le lit des torrents, sur plusieurs centaines de mètres de dénivellation. La terre, piégée en amont des digues, permet éventuellement de réaliser quelques cultures. Près de 5 000 digues de correction torrentielle ont été construites pendant le Ier plan, surtout dans les zones semi-humides arrosées. Dans les basses vallées, des microbarrages ont permis d'étendre les surfaces irrigables.

Les travaux de protection et de mise en valeur des pentes sont considérables : banquettes antiérosives (près de 11 000 km), plutôt réservées à la plantation d'arbres sur les hautes terres, réfection et création de murets et de terrasses dans l'ensemble de l'espace cultivable, et plus particulièrement dans les ribeiras dont les pentes basses et moyennes sont susceptibles de bénéficier d'une irrigation gravitaire ultérieure. Les aménagements les plus spectaculaires sont ceux des bassins versants des îles de Santiago (Ribeira Seca, Flamengos, São Miguel, Ribeira Grande), de Santo Antão (Ribeira Grande, Paul, Alto Mira) et de Fogo (périmètre de Monte Genebra, au sud de l'île). Si beaucoup d'initiatives reviennent à l'État (grands travaux), de nombreux pay-

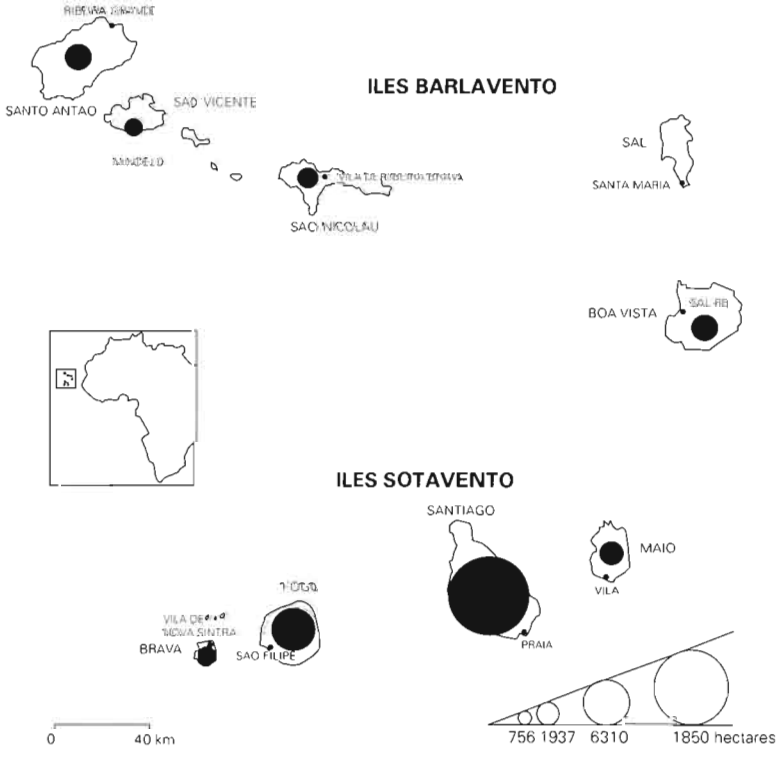


FIGURE 5 - *Le reboisement du Cap-Vert (1975-1986).*

sans n'hésitent pas, individuellement, à aménager leur terre. Difficiles, coûteux en temps et en argent, ces travaux ont le double avantage de limiter l'érosion et, dans un pays où les espaces irrigables plans sont rares et exigus, d'offrir à l'agriculture de nouvelles superficies.

Le IIe plan prévoit des stratégies d'intervention différenciées selon le milieu ; alors que, dans les zones arides et semi-arides, l'accent est mis sur la reforestation et sur la récupération des eaux superficielles, en zones humides et subhumides, il est mis sur le contrôle des crues dans les vallées et sur la mise en place, sur les plateaux (*achadas*) et sur les versants, d'un système agro-sylvo-pastoral intégré, producteur.

Le reboisement est un autre aspect de la politique d'ensemble de maîtrise de l'eau. Divers facteurs historiques anciens et récents expliquent la dégradation des forêts climaciques du Cap-Vert. En 1988, l'effort a été considérable, avec 5 851 ha plantés (2 294 947 arbres). Il concerne toutes les zones écologiques de l'archipel.

Si, en zone aride et semi-aride, les boisements ont surtout une vocation de constitution de pâturage et de combustible, dans les zones subhumides d'altitude (700 à 1 500 m) leur rôle est essentiel dans la reconstitution des nappes : meilleure infiltration, accroissement des pluies, etc. Les conditions pluviométriques plus favorables, l'importance des «précipitations latérales», liées à la forte nébulosité et aux vents marins, et la présence des sols volcaniques épais d'excellente texture expliquent un taux de reprise relativement élevé et un renouveau forestier de grande ampleur. Les principales essences utilisées sont des *Eucalyptus* (Monte Velha, Fogo), mais aussi divers *Acacia* et, particulièrement depuis quelques années, des *Cupressus* associés à des Pins (*Pinus canariensis, Pinus radiata*). Les plus beaux périmètres en résineux se trouvent aujourd'hui à Santiago (flanc sud du Pico de Antonia), à Santo Antâo (Cova, Pico da Cruz) et à Sâo Nicolau (Monte Gordo).

LA VALORISATION DE L'EAU PAR LE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION

Utilisation de l'eau et nouvelles structures d'exploitation

Au Cap-Vert, si les terres irriguées des fonds de talwegs et les basses pentes sont traditionnellement et en majorité la propriété de grands planteurs, la petite propriété existe aussi. Les grands domaines sont équipés de manière traditionnelle - ce sont souvent de très anciennes exploitations - avec une modernisation limitée (motopompes, éventuellement arrosage par aspersion). En revanche, là où des potentialités hydrauliques ont été créées, apparaissent, à côté de la propriété paysanne, des structures nouvelles : domaines d'État, exploitations aménagées par l'État et redistribuées au privé, plus rarement coopératives de production. À ces types différents correspondent des utilisations variées des ressources hydrauliques :

- les fermes d'État sont le plus souvent de grandes exploitations créées sur de bonnes terres, abandonnées par d'anciens planteurs portugais. Elles peuvent être liées à la création d'un point important d'approvisionnement en eau. Tels sont le complexe agropastoral de Justino Lopès (50 ha irrigués) près de Pedra Badejo (Santiago), le domaine de Monte Genebra (Fogo) ou encore le périmètre de Campo de Preguiça (Sâo Nicolau). Toujours centres d'expérimentation, l'État en assure la gestion et utilise une main-d'œuvre salariée temporaire ou permanente ;
- les périmètres aménagés par l'État sont partagés entre divers attributaires selon des critères déterminés qui privilégient les agriculteurs nécessiteux qui résident à proximité. Ce sont toujours des regadios de taille modeste, soutenus (au moins au début) par une aide nationale ou internationale ; ainsi, à Sâo Nicolau, les périmètres de Tarrafal

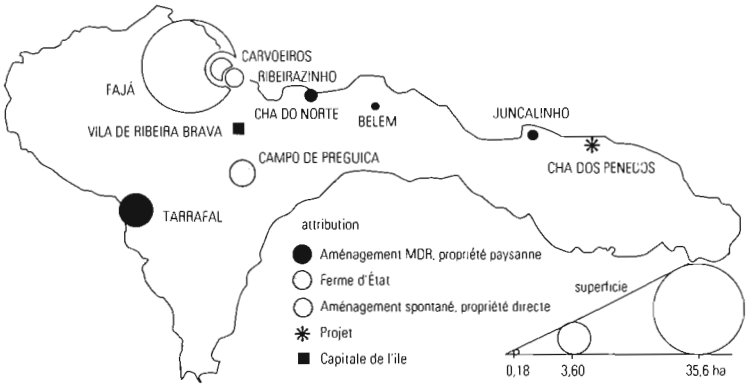


FIGURE 6 - *Création et développement des périmètres irrigués dans l'île de São Nicolau.*

(3,4 ha), de Cha do Norte (0,49 ha) ou de Juncalinho (0,33 ha). Une orientation vers des spéculations précises est donnée au départ mais elle peut ensuite évoluer ; à Tarrafal, par exemple, arboriculture fruitière puis maraîchage ;

- les coopératives de production sont encore très rares au Cap-Vert. Elles peuvent soit être placées sous la tutelle de l'Institut national des coopératives, soit ressortir au domaine privé. La très forte tradition d'individualisme paysan limite leur développement ; moins de 2 % des chefs d'exploitation sont membres d'une coopérative de production, et ce secteur ne couvre que 0,4 % de la surface agricole utilisée du pays ;

- le cas le plus général est donc l'aménagement spontané, par les paysans, de regadios en aval de travaux réalisés par l'État. Ainsi en est-il de la basse vallée de Fajá (São Nicolau) où 35,6 ha de sequeiros, initialement cultivés en maïs et en haricot, sont devenus après maintes tractations foncières un regadio de cultures maraîchères, vivrières et commerciales, aménagé de manière traditionnelle.

Davantage de produits vivriers commercialisables

Si le maïs et les diverses variétés de haricots sont toujours produits en sequeiro, il n'en est pas de même de certains vivriers, qui entrent pour une part importante dans la consommation alimentaire locale. Les regadios produisent en effet 95 % des pommes de terres, 73 % du manioc, 48 % des patates douces et la quasi-totalité des légumes de l'archipel.

Ces produits ne couvrent, actuellement, que 80 % des besoins nationaux. L'État cap-verdien espère parvenir à l'autosuffisance en l'an 2000, soit par l'accroissement des superficies cultivées en irrigué, soit par la création de nouvelles surfaces, soit encore par la reconversion des parcelles de culture majoritairement plantées en canne à sucre. Les autorités estiment nécessaire la création de 120 à 150 ha pour la pomme de terre. Les besoins en autres légumes (oignons, carottes, choux, etc.) sont importants et l'État veut en accroître la consommation en la faisant passer de 15 $kg.an^{-1}.habitant^{-1}$ actuellement à 21 $kg.an^{-1}.habitant^{-1}$ en 1990 et à 40 $kg.an^{-1}.habitant^{-1}$ en l'an 2 000. La population de l'archipel sera alors de 500 000 habitants contre 350 000 en 1987. Pour l'ensemble des spéculations, c'est plus de 900 ha de regadios exploités en continu qu'il faudra créer d'ici l'an 2000. À cette préoccupation strictement économique

s'ajoutent des considérations sociales : une surface de 0,25 ha de regadio intensif permet de créer un emploi...

De plus, certains produits pourraient contribuer à améliorer, même modestement, la balance commerciale. S'il est peu probable que les légumes produits au Cap-Vert puissent un jour concurrencer la production de contre-saison d'autres pays africains voisins, des possibilités encourageantes existent cependant pour les bananes vers l'Europe, pour la pomme de terre de semence et pour les oignons vers certains pays côtiers africains.

Dans les périmètres irrigués, la céréaliculture est trop coûteuse : rendements limités et concurrence des produits d'importation vendus par l'État à très bas prix. La canne à sucre, traditionnelle, est avantageuse par sa transformation en alcool. Elle reste pratiquée sur les terres privées, mais elle a été interdite sur les périmètres nouvellement créés. En effet, la canne à sucre est considérée comme une plante «antisociale» puisque par elle s'enrichissent les grands propriétaires et demeurent asservis les sans-terre.

Les choix paysans se sont donc portés sur des cultures vivrières traditionnelles, mais assez rémunératrices en cas de commercialisation. L'association culturale patate douce/manioc/banane présentait, à leur yeux, les meilleurs avantages : boutures et semences autofournies, action bénéfique de la patate douce sur les sols, autoconsommation possible et commercialisation aisée. Bien intégrées dans le système alimentaire cap-verdien, ces plantes occupent 80 à 95 % des superficies cultivées. Les aménagements n'ont en aucune manière bouleversé les habitudes alimentaires des populations, toujours fondées sur la confection de la *cachupa* (plat traditionnel à base de maïs et de haricots) et sur la consommation secondaire de tubercules.

Les cultures maraîchères, carottes, choux, pommes de terre, salades, oignons, tomates, courges, n'apparaissent, dans le système de culture paysan, que comme un complément, en retrait de l'association dominante (5 à 20 % des superficies). Bien qu'elles soient financièrement intéressantes en cas de commercialisation régulière (2 à 3 cycles annuels), ces cultures ont plutôt été réalisées - du moins sur les périmètres paysans de l'île de São Nicolau - en réponse nuancée, à la demande de l'État. Dans le système alimentaire paysan, les légumes demeurent un extra (plat du dimanche). Peu consommés, ils sont, lorsque cela est aisé, commercialisés à São Vicente, sur l'important marché de la ville de Mindelo. À Santiago, ce sont les paysannes des ribeiras voisines (R. Grande, R. de São Francisco) et des régions de São Domingos et de Santiago Maior, qui ravitaillent le marché.

L'arboriculture fruitière existe (manguier, agrumes, papayer, cocotier) et se trouve encouragée par le ministère du Développement rural et des pêches. Mais, à l'initiative paysanne, elle a rapidement évolué vers une polyculture maraîchère, jugée plus rentable.

Là où l'État contrôle la production, et notamment dans les grandes fermes d'État, l'effort pour développer la production légumière a été considérable. À Fogo, le périmètre de Monte Genebra, créé en 1975 dans un vallonnement, au sud de l'île, qui ne reçoit annuellement que 204 mm de pluie en moyenne, a développé des cultures maraîchères et fruitières destinées principalement au ravitaillement local. Sur les 56 ha irrigués, 11 sont réservés à l'horticulture, avec des techniques modernes (aspersion, goutte-à-goutte). La production a rapidement augmenté, comme en témoignent les résultats du tableau II.

C'est aussi dans les périmètres d'État que les rendements sont les meilleurs ; ils atteignent jusqu'à 35 $t.ha^{-1}$ pour la tomate et 50 $t.ha^{-1}$pour la banane, contre 15 à 25 $t.ha^{-1}$ pour la première et 25 à 35 $t.ha^{-1}$ pour la seconde, dans les périmètres irrigués privés. Malgré cela, l'association banane-manioc reste partout dominante.

Tableau II - Évolution de la production vivrière entre 1977 et 1985

	1977 en kg	1985 en kg
Courge	4 519	33 943
Choux	6 668	28 763
Patate douce	2 145	38 669
Tomate	8 200	45 646
Oignon	1 665	17 917
Carotte	399	14 160

La persistance des cultures irriguées commerciales traditionnelles : banane et canne à sucre

L'orientation marquée vers des productions vivrières éventuellement commercialisables caractérise les périmètres spontanés ou ceux redistribués par l'État. Mais, là où ce dernier n'est pas intervenu, ou seulement pour quelques aménagements ponctuels, les cultures rémunératrices traditionnelles prévalent : banane fruit et surtout canne à sucre.

Si la canne à sucre occupait 52 % des surfaces irriguées du Cap-Vert en 1979, elle en occupe 44,3 % aujourd'hui. L'État n'encourage pas sa production dont le seul débouché est la production d'un alcool, rhum agricole (*grogue*) très apprécié dans l'archipel mais peu exporté. La canne est cultivée sur la plupart des regadios, surtout dans les îles Barlavento. Les paysans estiment, en terme de productivité du travail, qu'il s'agit de la spéculation la plus rémunératrice. L'alcool est aussi une des rares sources de plaisir de l'archipel. Mais la majeure partie de la production vient des plantations. Les grands planteurs, présents ou non sur leurs terres, tirent de la canne une sécurité financière. Certains paient le métayer ou l'ouvrier agricole en nature, avec le grogue...

C'est à Santo Antâo et Santiago que l'occupation du sol par la canne à sucre est la plus importante. Cette situation n'encourage guère la diversification des productions en raison des intérêts financiers et matériels des propriétaires ou des locataires, petits ou grands. La rareté des terres irrigables et l'étroitesse des débouchés pour les cultures maraîchères renforcent cette situation.

ÉLÉMENTS DE DISCUSSION : DES VIVRIERS, MAIS POUR QUI ET À QUEL PRIX ?

La République du Cap-Vert s'est engagée dans un processus de valorisation maximale de ses ressources hydriques. Dans un pays si pauvrement pourvu en ressources minérales et biologiques et où la famine la plus récente (1947-48) décima le quart de la population, aucune initiative n'est à rejeter. Pourtant, ce développement des cultures irriguées pose un certain nombre de problèmes, même si le pouvoir d'achat paysan en est sensiblement amélioré.

Une valorisation coûteuse

L'eau cap-verdienne coûte très cher, que ce soit au citoyen cap-verdien ou aux États qui participent à l'aide internationale. La plupart des aménagements récents ont une rentabilité faible et dégagent une valeur ajoutée souvent négative.

RICHARD *et al.* (1984) estiment le coût des aménagements agricoles réalisés à São Nicolau à 590 000 F.ha^{-1} (francs français, FRF) et ils ajoutent «soit trois fois plus que les plus coûteux aménagements réalisés au Sahel». Ils montrent que tous les périmètres irrigués - sauf Fajá, non étudié - dégagent une valeur ajoutée négative si l'on tient compte, en l'intégrant dans les charges d'exploitation, du coût réel de l'eau (recherche, forage, entretien, etc.). Tous les périmètres sont déficitaires ; que se serait-il passé si la République du Cap-Vert avait dû payer ?

À Monte Genebra, le mètre cube d'eau coûtait, en 1985, environ 23 escudos du Cap-Vert (CVE), soit 2,50 FRF (l'eau, captée à une source située au niveau de la mer est remontée par une motopompe qui fonctionne au gazole jusqu'à un réservoir situé à 400 m d'altitude). A Fajá (São Nicolau), ANCEY estimait en 1985 (Sedes, 1985), le coût net du mètre cube à 11 CVE (1,21 FRF) en cas d'amortissement de la galerie sur trente ans. Au Cap-Vert, l'eau vendue au paysan coûte en moyenne 5 CVE.

La conséquence du coût élevé de l'eau est la difficulté à réaliser un amortissement qui permette de rentabiliser les produits agricoles obtenus. Compte tenu de la production moyenne obtenue (12 t.ha^{-1}.an^{-1}, tous produits confondus), il faudra au moins quinze ans pour amortir les aménagements de São Nicolau.

Gaspillage et avenir de l'eau

Certaines réalisations hydrauliques n'ont pas été accompagnées d'encadrement technique des populations bénéficiaires. Ainsi, à São Nicolau, les aménagements agricoles ne sont-ils qu'une conséquence, non prévue au départ, de l'opération «recherche des eaux souterraines». C'est l'abondance de l'eau trouvée qui a conduit à compléter le projet initial par la réalisation de périmètres irrigués.

Mais, si la qualité des aménagements hydrauliques est certaine, en aval, l'opération présente le défaut de ne pas avoir été accompagnée d'une formation paysanne technique pour le suivi de l'utilisation agricole de l'eau. Il aurait été valorisant pour le Cap-Vert d'accompagner le creusement de la galerie de Fajá d'un programme d'irrigation «moderne». Ceci aurait sans doute permis d'éviter, au moins partiellement, le gaspillage d'eau par le système traditionnel des rigoles en terre et la tardive réalisation de bassins de stockage en regard du volume actuel du débit de la galerie.

Un autre aspect caractéristique de la non-prise en compte des conséquences de la présence de l'eau dans la basse vallée de Fajá est la faiblesse de l'encadrement paysan pour la vulgarisation des thèmes techniques liés à l'utilisation des plantes nouvelles : techniques horticoles (rotations notamment), qualité des semences, traitement phytosanitaire. De la même manière, il aurait été judicieux d'intégrer au programme, qui modifie les conditions écologiques de la basse vallée, un volet de lutte contre l'érosion. Les vents violents qui soufflent en permanence du nord-est ne sont pas sans effet sur la transpiration des plantes et sur les sols fragiles des pentes, où les sequeiros se réduisent.

De plus, malgré la réussite nuancée de la mise en place de cultures de contre-saison dans les îles, le succès est-il assuré ? Les nappes d'eau pompées dans le sous-sol sont souvent des nappes fossiles. Leur recharge dépend de l'importance du volume des eaux pluviales ; en devenant plus rare, l'eau des nappes se salinise. Certains pompages

de São Nicolau sont ainsi arrêtés : les regadios de 1985 étaient, en 1987, redevenus des sequeiros de maïs-haricot (village de Carvoeiros).

La faiblesse des débouchés

L'aménagement de périmètres hydroagricoles permet d'offrir aux cap-verdiens des surplus alimentaires et d'améliorer le pouvoir d'achat paysan.

Les cultures maraîchères ne résolvent pas pour autant le déficit alimentaire chronique du pays en céréales. Dans toutes les îles, l'autoconsommation est importante et les marchés urbains, exception faite de Praia et de Mindelo, sont très étroits : São Filipe (Fogo) et Vila de Ribeira Brava (São Nicolau) comptent moins de 3 000 habitants chacune.

Dans ces conditions, comment s'étonner que les responsables de Monte Genebra, à Fogo, aient été contraints de diminuer sensiblement leur production à partir de 1982, malgré les 6 points de ventes sur l'île ? À São Nicolau, alors que l'on continue d'importer la quasi-totalité du maïs, les paysans tentent de vendre à Vila, mais aussi à Sao Vicente et à Sal, leurs productions maraîchères dont le revenu sert à acheter du maïs... Moins de 30 % des légumes seraient autoconsommés. À la fin de l'année 1987, plusieurs commerçants de Fajá évacuaient une partie de la production vers Vila et Tarrafal, ainsi qu'à São Vicente ; malgré les coûts de transport et compte tenu des prix relativement élevés dans ces villes, leur marge bénéficiaire était intéressante.

Pourtant, les perspectives de vente de cultures de contre-saison exportables, à l'image de celles réalisées dans la presqu'île sénégalaise du Cap-Vert, sont étroites. À condition d'éliminer les frais d'embarquement, les exportations de bananes pourraient être accrues. Il serait aussi possible d'exporter des oignons vers l'Afrique de l'Ouest, mais il est vain d'envisager de concurrencer le marché européen des légumes frais. Les perspectives de vente de produits spécialisés, telles les semences potagères, certaines huiles essentielles et les fleurs coupées semblent plus encourageantes, au moins à long terme.

Aux îles du Cap-Vert, la maîtrise et la valorisation des ressources hydriques s'inscrivent dans le temps long. La diversité des actions entreprises n'exclut pas une valorisation insuffisante, car les problèmes techniques et humains liés à l'agriculture irriguée sont nombreux.

Mais les projets d'aménagement intégré des bassins des ribeiras des grandes îles agricoles montrent le souci cap-verdien de traiter, de manière égale et complémentaire, les problèmes écologiques de l'archipel et la question des ressources alimentaires.

Malgré l'effort entrepris, les Cap-Verdiens savent qu'ils ne pourront donner des réponses satisfaisantes au problème alimentaire avec les seuls périmètres irrigués. D'autres programmes de développement des cultures sèches existent aussi. Ils sont fondés sur une meilleure utilisation des pois-légumineuses. Dans les zones les plus humides, l'agro-sylvo-pastoralisme est aussi une réponse, grâce aux eaux pluviales. Le système est avantageux : il offre de la matière ligneuse, fixe l'élevage et s'appuie sur la production agropastorale traditionnelle des plateaux de Santiago et Santo Antão.

Le Cap-Vert et ses paysans sont prêts à arracher au désert la moindre parcelle de terre. Espérance de l'eau et du mieux-vivre : un enjeu économique et politique majeur.

M. LESOURD : *maître de conférence*, Ledra, Université de Rouen, BP 108, 76134 Mont-Saint-Aignan cedex

Lutte contre l'érosion et reboisement

PHOTO 1

Construction d'un petit barrage de correction torrentielle dans des talwegs en forte pente (île de São Nicolau).

PHOTO 2

Reboisement en zone semi-humide d'altitude et aménagement de banquettes cultivables. Plantation de Pinus *et* Cupressus *divers. Perimetro Florestal. Île de Santo Antão.*

Recherche et captage de l'eau

Photo 3

Aménagement traditionnel : puits à moteur et éolienne. Stockage latéral sur bas-versants («tanque»). «Levadas» de distribution de l'eau-Ribeira de Figueiral. Île de Santo Antão.

Photo 4

Aménagement récent : recherche et exhaure de l'eau par creusement de galerie subhorizontale. Ribeira de Fajá. Île de São Nicolau. Cliché pris en 1985, avant l'achèvement des travaux (1986).

PHOTO 5

Utilisation traditionnelle : irrigation gravitaire sur terrasses de cultures alimentées en eau par des levées («levadas») suivant les courbes de niveau. Manioc, patates douces, pommes de terre, légumes. En fond de vallée : banane, canne à sucre. Fontainhas, Île de Santo Antão.

PHOTO 6

Aménagement récent sur grande exploitation. Levadas remplacées par tuyaux en PVC. Casiers traditionnels, billons. Praia Baixo. Île de Santiago.

Clichés : M. LESOURD

REMERCIEMENTS

Ces missions de terrains ont été permises par les soutiens financiers de l'université de Rouen et du Centre d'études de géographie tropicale du CNRS, avec lequel le Laboratoire d'études du développement des régions arides (Ledra) a passé une convention de recherches communes avec l'Instituto de Investigação Agraria (INIA) de la République du Cap-Vert.

BIBLIOGRAPHIE

ATREE, 1985. - Étude sur les débouchés de l'agriculture et de l'élevage en République du Cap-Vert. Rapport définitif. Secrétariat d'État à la Coopération et au Plan, Rép. du Cap-Vert - FED/CEE, 133 p. + annexes.

BARRY (O.), DGFA, MDR, 1987. - Projet du périmètre de Fajá, île de São Nicolau. «Projet de Développement agricole de São Nicolau». M.D.R.P., Ministère de la Coopération. São Nicolau, 31 p.

BURGEAP, 1975. - La mise en valeur des eaux souterraines de l'archipel du Cap-Vert. Rapport préliminaire 1969-1974. Paris.

BURGEAP, 1987. - La galerie de Fajá à São Nicolau. République du Cap-Vert, MDRP, République Française, Ministère de la Coopération, Paris, 16 p.

DELGADO (M. E.), 1987. - Premier Rapport triennal pour la décennie de reboisement 1983-1993. MDRP, Direcção da Reflorestaçao. Praia, Cabo Verde, 17 p. + annexes.

LESOURD (M.), 1986. - Permanence de la sécheresse aux Iles du Cap-Vert : l'aménagement rural ou la lutte contre l'irréversible. *Cahiers Géographiques de Rouen*, n° spécial RCP Sahel Ledra - ACCT, Rouen, septembre 1986 : 109-128.

LESOURD (M.) et REAUD-THOMAS (G.), 1987. - Le fait créole dans la formation de l'identité nationale en République du Cap-Vert. Îles tropicales : insularité, «insularisme». (Actes du Colloque de Bordeaux-Talence 23-25 octobre 1986). Coll. «Îles et Archipels», n°8 ; Cret, ACCT : 107-124.

LESOURD (M.), 1987. - Contraintes géographiques de développement d'un P.M.A. insulaire : la République du Cap-Vert. «Crise agricole et crise alimentaire dans les pays tropicaux». CNRS, Bordeaux : 63-80.

LESOURD (M.), 1988. - Les périmètres irrigués dans l'archipel du Cap-Vert. Mieux manger, mais sur quelle terre et à quel prix. «Les cultures de contre-saison». Laboratoire d'étude pour le développement des régions arides (Ledra), université de Rouen : 19-29.

LESOURD (M.), 1988. - Sécheresse et émigration aux îles du Cap-Vert. Communication au Colloque Nordeste-Sahel. IHEAL, Paris, janvier 1986, Actes du Colloque, 1989. «Les hommes face aux sécheresses», 422p. : 269-276.

MDR (Ministerio do Desenvolvimento rural), 1988. - Recenseamento Agricola das Ilhas de Santo Antão e São Nicolau. Gabinete de Inquéritos Rurais. Praia (Cabo Verde) 1979-1981.

MDRP, 1986. - Documento de Apresentação do Plano Sectorial de Desenvolvimento Rural. MDRP, Ministerio do Plano e Cooperação. Rep. de Cabo Verde, 155 p.

MDRP, 1987. - Estatisticas Agricolas. Gabinete de Estudos e Planeamento. MDRP, Rep. de Cabo Verde, 72 p.

OLIVRY (J.-C.), 1983 - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér Hydrol.*, vol. XX, n°1.

OLIVRY (J.-C.), 1989. - Hydrologie de l'archipel du Cap-Vert. Étude de l'île de Sâo Nicoleau. ORSTOM, *Études et Thèses*, 379p.

RICHARD (J.), FREUD (C.) et PAPAZIAN (V.), 1984. - Évaluation des interventions françaises dans l'île de São Nicolau (Cap-Vert). MRE, Coopération et Développement, Paris, 65 p. + 45 p. annexes.

SABINO (A. A.), 1986. - Projecto de recarga da galeria de Fajá. Ilha de São Nicolau, Cabo Verde. Documento de trabalho, MDRP Sao Nicolau, 22 p. + annexes.

SCET International, 1978. - L'île de São Nicolau. Diagnostic et Schéma d'Aménagement. Rapport, annexes, cartes. Ministère des Relations Extérieures, Coopération et développement, SCET AGRI ; Sec. De Estado da Cooperaçao e Planeamento, MDR Paris.

SEDES, 1985. - Périmètre de Fajá (São Nicolau). Etude agro-économique. Ministère des Relations extérieures, Coopération et Développement, MD Rural du Cap-Vert, Paris, 32 p.

TRIGO DE ABREU (A.), SOARES (H.) *et al.*, 1983. - Desenvolvimento e Pesquisa no longo prazo em Cabo Verde. Mesa Redonda. Nov. de 1981, Praia. Instituto Gulbenkian de Ciencia (Centro de Est. de Economia Agrária), Oeiras (Portugal), 299 p.

Pierre MILLEVILLE

Conditions sahéliennes et déplacements des troupeaux bovins

(Oudalan, Burkina Faso)

INTRODUCTION

Circonscription administrative la plus septentrionale du Burkina Faso, l'Oudalan est caractéristique de la zone sud-sahélienne. Ses conditions climatiques et édaphiques lui confèrent d'indéniables marques d'aridité, mais la pluviométrie (de l'ordre de 350 à 400 mm en moyenne annuelle) est néanmoins suffisante pour qu'une agriculture pluviale extensive y coexiste avec un élevage semi-nomadisant.

En région sahélienne, l'élevage peut être considéré comme une activité de cueillette par animal interposé. La satisfaction des besoins alimentaires du bétail dépend directement, et presque exclusivement, de l'existence de pâturages accessibles aux troupeaux. Une tâche essentielle de l'éleveur, du pasteur, est de rendre possible et de faciliter cet accès, et ceci durant toute l'année, grâce à des modes de conduite appropriés.

Les conditions climatiques sahéliennes imposent un déterminisme strict à la production fourragère, qui subit de considérables variations (saisonnières, interannuelles, spatiales) tant quantitatives que qualitatives. Au cours des trois à quatre mois de la saison des pluies s'élabore la production des formations végétales herbacées, constituées pour l'essentiel d'espèces annuelles, principalement graminéennes. Dès la fin du cycle végétatif de ces plantes (soit souvent avant l'arrêt des pluies), la strate herbacée se dessèche et perd rapidement une grande partie de sa valeur nutritive. Le stock fourrager de la longue saison sèche est alors constitué ; il décroît ensuite progressivement jusqu'au retour des pluies de l'année suivante, sous les actions conjuguées du prélèvement par le bétail et des autres facteurs de dégradation, sans aucun doute amplifiés par le piétinement des animaux. On estime que 40 à 50 % du disponible fourrager herbacé total pourra être ainsi effectivement consommé par le bétail.

La distribution spatiale des ressources fourragères se trouve affectée d'une très forte hétérogénéité. Les précipitations, et plus particulièrement les averses à caractère orageux qui prédominent en début de saison des pluies, sont souvent localisées dans l'espace. Le substrat édaphique, très diversifié, induit de considérables variations dans la répartition de la lame d'eau infiltrée (c'est-à-dire celle qui participe à la production végétale), compte tenu de la variété des états de surface du sol qui conditionnent directement le ruissellement. Ces 2 phénomènes sont responsables d'une extrême hétérogénéité de répartition de la biomasse disponible en fin de saison des pluies. Par la suite, les prélèvements différentiels opérés par les animaux dans l'espace parcouru contribueront à atténuer, ou au contraire à accroître, l'hétérogénéité initiale.

Quant à la variabilité interannuelle des disponibilités fourragères, elle résulte étroitement de celle de la pluviosité : une relation linéaire a ainsi été établie, qui relie, à

l'échelle d'un bassin versant, la biomasse herbacée produite à la pluviométrie moyenne annuelle (SICOT et GROUZIS, 1981 ; GROUZIS, 1987).

Une autre caractéristique essentielle des ressources fourragères, liée d'ailleurs à ces phénomènes de variabilité et de dispersion, réside dans leur non-appropriation. L'espace pastoral est ouvert et en principe accessible à tous, même si des règles plus ou moins tacites tendaient par le passé (et tendent parfois encore) à attribuer à certains groupes d'éleveurs des droits d'accès préférentiels sur telle ou telle portion de territoire. Cette liberté d'accès et de fréquentation de l'espace constitue un fondement du pastoralisme, compte tenu des pratiques adaptatives et contre-aléatoires qu'elle permet (GALLAIS, 1975 ; BARRAL, 1977 ; BENOIT, 1984).

Enfin, si l'espace pastoral est hétérogène et d'accès libre, il est aussi polarisé. En effet, l'existence de points d'abreuvement représente une condition nécessaire de l'utilisation des pâturages. Durant une première période - la saison des pluies -, l'eau, qui se trouve disponible dans les axes alluviaux, les zones dépressionnaires et les flaques, «ouvre» l'espace exploitable ; durant la période suivante - une longue saison sèche -, les points d'eau temporaires tarissent les uns après les autres ; cela entraîne une concentration de plus en plus forte du bétail autour des points d'eau résiduels ainsi qu'une adaptation progressive en matière de choix des pâturages, de rythme et de mode d'abreuvement. Cela dit, l'Oudalan est suffisamment bien pourvu en points d'eau pour que les pâturages, dans leur quasi-totalité (exceptés ceux du nord-ouest), demeurent accessibles durant tout ou partie de la saison sèche. Il reste que l'utilisation aux différentes périodes de l'année des parcours disponibles dépend directement de celle des points d'eau existants. À ce propos, il convient de distinguer d'une part les rythmes quotidiens de déplacement du bétail à partir d'un lieu d'abreuvement et d'un campement, compte tenu de la localisation des ressources fourragères environnantes et, d'autre part, des mouvements de rupture qui aboutissent à l'utilisation d'autres points d'eau et d'autres zones de parcours, selon un rythme saisonnier plus ou moins régulier.

LA SPÉCIFICITÉ DES DÉPLACEMENTS SAISONNIERS

La mobilité constitue une caractéristique essentielle de l'élevage en milieu sahélien. On réserve habituellement le terme «transhumance» à des déplacements affectés d'un rythme saisonnier plus ou moins régulier, et le terme «nomadisation» à des mouvements de nature plus conjoncturelle, quelle qu'en soit l'ampleur. Dans la réalité, cette distinction est souvent difficile à établir et, dans l'Oudalan, ces mouvements du bétail se révèlent très diversifiés quant à leur amplitude, leur durée et leur périodicité. En outre, avant d'examiner les principaux types de déplacements au cours de l'année, il convient de préciser que les causes de ces mouvements sont généralement multiples et que l'éleveur en attend alors des bénéfices variés. La recherche de pâturages plus intéressants sur le plan de la productivité ou de la diversité des formations végétales représente bien entendu la cause majeure des déplacements ; cependant d'autres raisons peuvent jouer : nécessité d'écarter le cheptel des terres de culture en hivernage, fréquentation d'un lieu de cure salée, utilisation d'une nappe d'eau libre, qui permet de supprimer le travail d'exhaure de l'eau des puisards, réduction de l'exploitation laitière du troupeau par éloignement du groupe familial, association à la conduite du bétail d'activités de cueillette (fonio sauvage, bulbes de nénuphar), limitation du déplacement quotidien des animaux, etc. Ces divers aspects interviennent différemment suivant les conditions de milieu (possibilités et contraintes), responsables d'une certaine spécificité saisonnière de la mobilité (BARRAL, 1977).

Préhivernage

Les premières pluies, souvent précoces (mai, parfois même avril), sont très localisées dans l'espace de par leur caractère orageux. En outre, il n'est pas rare qu'un mois ou plus les sépare des suivantes, qui marqueront la véritable installation de l'hivernage. L'eau se trouve alors brusquement présente dans les bas-fonds, sous forme de flaques dispersées sur tous les sols argileux ; cela permet l'accès à des pâturages non exploitables en saison sèche, ou exploitables au prix d'une marche forcée et d'un rythme d'abreuvement épuisant pour le bétail. Cette première pluie, si elle est de hauteur suffisante, s'accompagne peu après de la feuillaison de certaines espèces ligneuses et de la levée de plantes herbacées.

Dès lors, il devient possible de rompre le rythme adopté en fin de saison sèche (*cf. infra*) et de gagner des zones éloignées où les animaux peuvent profiter à la fois de l'eau présente, de la réserve fourragère en partie préservée de l'année précédente et d'un appoint en fourrage vert de bonne valeur nutritive. Ces déplacements supposent qu'il reste alors un certain stock fourrager sur pied, ce qui n'est pas le cas de la majeure partie de l'Oudalan à cette période, et encore moins plus au sud. Ils concernent donc généralement les grandes «brousses tigrées» du nord-ouest et la rive gauche du Béli, et les troupeaux gagnent vers le nord et le nord-ouest des pâturages encore utilisables. L'ampleur et la durée de ce mouvement sont variables, puisqu'il est étroitement tributaire de la localisation géographique et de la hauteur des pluies qui l'ont déclenché.

Le bétail bovin, à cette période de l'année, se trouve souvent en état d'amaigrissement prononcé et soumis à un rythme épuisant ; il retrouve alors des conditions plus favorables puisque la nomadisation limite considérablement ses déplacements quotidiens, améliore son alimentation et permet son abreuvement quotidien à proximité des pâturages fréquentés. Ces effets sont d'autant plus favorables que cette nomadisation intervient en début ou en pleine période des vélages ; les conditions d'alimentation des femelles en fin de gestation sont meilleures et la production laitière plus abondante en début de lactation.

Cette nomadisation de préhivernage est loin d'être générale et la plupart des éleveurs ne la pratiquent qu'en cas de conditions de fin de saison sèche très sévères.

Si les petites mares temporaires s'assèchent, les troupeaux se replient sur les points d'eau permanents de saison sèche. En revanche, si de nouveaux épisodes pluvieux surviennent, le bétail peut poursuivre sa pérégrination et entamer une transhumance proprement dite de saison des pluies, tandis que les vaches qui ont mis bas et leurs veaux regagnent le campement où elles assurent les besoins en lait de la famille jusqu'à la récolte du mil.

Saison des pluies

Avec l'installation des pluies, le domaine pâturable s'ouvre encore davantage, les points d'eau sont dispersés dans l'espace et le bétail dispose de nouveaux pâturages de bonne valeur nutritive. Les formations végétales les plus utilisées à cette période sont celles des bas-fonds (prairies à *Panicum laetum*), des glacis et des brousses tigrées. Le domaine sableux en est à peu près exclu, et ceci pour 2 raisons : la croissance des espèces herbacées y est moins précoce d'une part, et il devient impératif d'écarter les troupeaux des terres de culture d'autre part. 3 cas peuvent alors se présenter :

- le bétail poursuit son déplacement amorcé à l'occasion des premières pluies pour ne revenir sur les terres de culture qu'après les récoltes ou plus avant dans la saison sèche ;

- les troupeaux, rentrés de cette première nomadisation, repartent avec des bergers pour un nouveau déplacement de plus longue durée. Le troupeau est alors souvent scindé et une partie au moins des laitières demeure au campement avec leurs veaux pour que la famille puisse bénéficier de lait pendant la période de soudure céréalière. Pour certains groupes cette transhumance d'hivernage est de grande amplitude et permet de gagner les pâturages et les cures salées du sud du Gourma malien ;

- le groupe familial quitte les terres de culture et s'installe avec son bétail à l'écart, à une distance des champs qui va de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Les bovins et les petits ruminants pâturent alors dans les bas-fonds et sur les glacis environnants, souvent sans être gardés, et ils s'écartent peu du campement où il sont présents matin et soir. C'est de loin le cas le plus fréquent. Les bovins, pendant cette période, sont éventuellement conduits une ou plusieurs fois dans l'une des cures salées de l'Oudalan.

La transhumance d'hivernage suppose qu'une partie de la main-d'œuvre quitte les terres de culture pendant la période des travaux agricoles. On comprend donc que ceux qui y ont systématiquement recours soient préférentiellement des possesseurs de grands troupeaux, pour lesquels l'élevage représente une priorité. En revanche, la plupart de ceux qui mettent en culture de grandes surfaces et disposent d'un nombre réduit de têtes de bétail préfèrent concentrer toute leur force de travail sur les travaux culturaux et garder avec eux la totalité de leur cheptel.

Saison sèche

Les récoltes de mil marquent un mouvement de repli assez général du bétail sur les champs où les résidus de culture pourront durant deux mois environ participer à l'alimentation du bétail. Le fourrage sur pied est alors présent non loin des points d'eau, et de nombreuses mares subsistent. Les pâturages dunaires constitueront, jusqu'au retour des pluies de l'année suivante, les lieux de parcours privilégiés.

Certains troupeaux effectuent alors une transhumance de saison fraîche qui leur permet d'accéder à des pâturages non exploitables par la suite, lorsque certains points d'eau seront taris.

Au fur et à mesure de l'avancée de la saison sèche, le nombre de points d'abreuvement diminue progressivement, et l'on assiste à une concentration de plus en plus forte du cheptel autour des points d'eau permanents. Les troupeaux s'y maintiennent jusqu'aux premières pluies en adoptant (lorsque cela est possible) des rythmes de plus en plus contraignants pour atteindre les pâturages disponibles. En année très déficitaire, des solutions de fuite peuvent être adoptées plus ou moins tardivement. Ce fut le cas en 1973, où le seul recours était un départ général vers le sud, en région soudanienne, et dans une certaine mesure en 1980. Comme les pâturages étaient épuisés dans la majeure partie de l'Oudalan cette année-là, de nombreux éleveurs partirent en pleine saison sèche, avec les bovins et les petits ruminants, pour gagner, au Mali ou au Niger, des zones que, pour certains, ils n'avaient jamais fréquentées jusque-là.

L'importance et la fréquence des déplacements des troupeaux au cours de l'année sont extrêmement variables. Si, à la diversité des groupes sociaux de l'Oudalan, correspond celle de «genres de vie» liés à une mobilité plus ou moins forte, la taille du troupeau apparaît aussi jouer un rôle déterminant. De nombreux éleveurs, qui, par le passé, pratiquaient de manière systématique une transhumance de saison des pluies, l'ont à présent abandonnée ; ils jugent qu'un troupeau de faible importance peut sans grand dommage rester non loin des terres cultivées et qu'il est plus utile de consacrer toute la force de travail disponible aux travaux agricoles. Sur ce plan, les années

sèches des 2 dernières décennies ont sans aucun doute eu un impact direct (et différentiel suivant les groupes et les éleveurs) sur les pratiques pastorales, qu'il est difficile de ne pas interpréter comme une fragilisation accrue d'une grande partie des systèmes d'élevage actuels.

LA MOBILITÉ AU QUOTIDIEN

Suivant la nature du point d'eau, la localisation du campement, la distribution spatiale des ressources fourragères, l'état du cheptel, les besoins et les disponibilités en main-d'œuvre du groupe familial, peuvent se distinguer des types bien différenciés de rythmes quotidiens, plus ou moins spécifiques d'ailleurs des différentes saisons. La figure 1 (qui adopte une représentation schématique proche de celle proposée par LE MASSON, 1980) rassemble les principaux types observés au cours d'un suivi de quelques situations d'élevage de cette région, réalisé durant les années 1980 et 1981. Une enquête plus extensive effectuée en 1982 (COMBES, 1984) a permis de confirmer la validité de cette typologie et de vérifier qu'elle rassemblait l'essentiel des cas rencontrés.

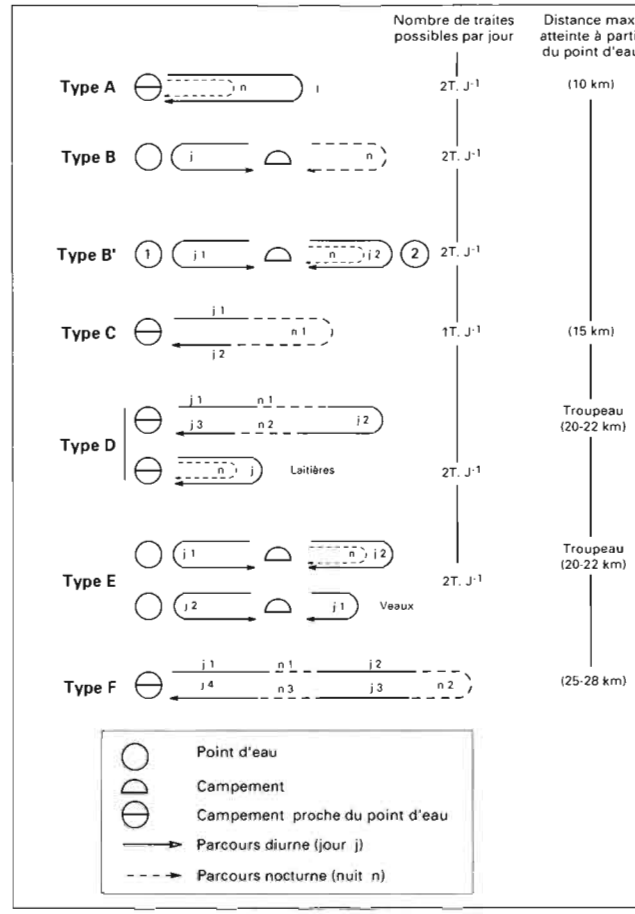


FIGURE 1 - *Typologie des rythmes quotidiens de déplacement du troupeau bovin.*

Type A

Le campement est soit situé à proximité immédiate du point d'eau, soit présent sur le périple quotidien sans être distant de plus de quelques kilomètres du campement. L'abreuvement a lieu quotidiennement, le troupeau pâture durant la journée, rentre au campement le soir et, après un long repos, pâture à nouveau quelques heures pendant la nuit pour revenir au campement le matin. Les veaux, maintenus au campement, sont allaités matin et soir et la traite a lieu 2 fois par jour *. C'est le schéma général de saison des pluies (le bétail trouve alors l'eau disponible en certains points du parcours quotidien) qui se caractérise par de faibles distances parcourues et un excellent rapport temps de pâture/distance parcourue.

C'est également le cas le plus fréquent en début de saison sèche, lorsque l'herbe est encore abondante non loin du point d'eau. Le périple diurne s'allonge progressivement au fur et à mesure que les disponibilités fourragères régressent à proximité du point d'eau ; la distance maximale atteinte à partir de celui-ci peut être d'environ 10 km. Ce type de rythme est favorable à la fois à l'alimentation des animaux du troupeau et à celle des veaux car elle correspond généralement à la période de forte production laitière. Elle n'implique ni le gardiennage, car le bétail divague souvent à de faibles distances du campement, ni une quelconque scission du troupeau (seuls les veaux sont maintenus à part).

Type B

Le campement est situé à plusieurs kilomètres du point d'eau, généralement sur ses terres de culture. Le rythme adopté et ses caractéristiques sont les mêmes que dans le cas précédent, mais durant la nuit le bétail peut aller pâturer dans la direction opposée au point d'eau. Le périple diurne est par ailleurs beaucoup plus polarisé et il permet d'autant moins de choisir les pâturages fréquentés que le campement est situé plus loin du point d'eau. La localisation du campement impose en outre le transport de l'eau à usage domestique ainsi que le déplacement des veaux (en général gardés) jusqu'au point d'abreuvement ou, si possible, sur un point d'abreuvement périphérique pour qu'ils ne puissent pas rencontrer le troupeau au cours de leur parcours et en profiter pour téter les mères.

Type B'

Il s'agit d'une variante du type précédent, où la situation du campement permet une utilisation successive de 2 points d'eau différents, ce qui accroît évidemment l'espace utilisable tout en permettant éventuellement de bénéficier de types de pâturages plus diversifiés. Comme dans le premier cas, les types B et B' n'imposent pas de gardiennage du troupeau au pâturage, dans la mesure où l'abreuvement est direct (nappe d'eau libre). Si l'abreuvement nécessite l'exhaure de l'eau de puisards, le gardiennage sera au moins partiel (accompagnement du troupeau le matin du campement au point d'eau).

---

* Les veaux, qui restent à proximité du campement durant la journée, sont rassemblés le soir dans un enclos de branchages avant l'arrivée du troupeau. C'est la condition nécessaire pour que la traite ait lieu. Ils en sont sortis au moment de la traite (suivi de l'allaitement) et y restent en général parqués pendant la nuit.

Type C

Plus avant dans la saison sèche, les ressources fourragères régressent et sont d'autant plus faibles que l'on se situe près du point d'eau. Il devient nécessaire de fréquenter des pâturages plus éloignés ; le rythme adopté change, bien que l'abreuvement soit toujours quotidien ; le troupeau part du point d'eau en début d'après-midi, gagne par marche rapide des pâturages qu'il atteint à la tombée de la nuit, et revient au campement le lendemain matin.

La priorité est donnée au pâturage nocturne, et une seule traite-allaitement a lieu, le matin. Le gardiennage du troupeau est nécessaire (mais dans certains cas non réalisé) et ce rythme permet d'accéder à des pâturages distants au plus de 15 km du point d'eau. Le rapport temps de pâture/distance parcourue est plus faible que dans les cas précédents, et l'est d'autant plus que le troupeau gagne des pâturages plus éloignés.

Type D

Ce rythme correspond à une réduction croissante des ressources fourragères et à la nécessité de porter plus loin le front de pâture. Bien que pouvant débuter dès la saison fraîche, certaines années très déficitaires, il se situe généralement pendant la deuxième partie de la saison sèche ; il englobe les mois où les températures sont les plus élevées et dépassent régulièrement 40 °C sous abri aux heures les plus chaudes de la journée. Le troupeau ne s'abreuve plus qu'un jour sur deux, car il doit parcourir une longue distance avant d'accéder aux pâturages utilisables. Partant du point d'abreuvement l'après-midi du jour j1, il passe deux nuits consécutives en brousse, en pâturant activement la nuit et pendant les heures les moins chaudes de la journée j2, pour revenir au campement le matin du jour j3. L'abreuvement est suivi de la traite et, en général, un complément d'abreuvement a lieu avant le départ de l'après-midi. Ce rythme ne permet donc qu'une traite-allaitement tous les deux jours, ce qui est insuffisant pour les veaux nés tardivement ; Les veaux âgés sont alors souvent intégrés au troupeau, tandis que les vaches qui ont des veaux en bas âge restent à proximité du campement ainsi que les animaux malades ou affaiblis. Il en résulte souvent une scission partielle du troupeau donc, et les animaux demeurés au campement, rarement gardés, pratiquent alors un rythme de type A, mais dans des conditions de pénurie fourragère prononcée.

Le type D permet d'accéder à des pâturages éloignés de 20 km du point d'eau ; il impose la présence continue d'un berger qui se déplace avec le troupeau, se nourrit du lait de quelques vaches et transporte son eau de boisson dans une outre passée au cou d'une des bêtes les plus dociles.

Le passage du type C au type D se traduit par une amélioration du rapport temps de pâture/distance parcourue ; il se réduit ensuite progressivement au fur et à mesure du recul du front de pâture. En période chaude, le fait que le bétail ne s'abreuve qu'un jour sur deux doit par ailleurs limiter significativement la quantité de matière sèche ingérée, tandis que les besoins d'entretien sont élevés compte tenu de la longueur du parcours (45 à 50 km entre deux abreuvements successifs). On assiste alors à une perte de poids progressive chez la plupart des animaux du troupeau.

Type E

Le campement est installé à une dizaine de kilomètres du point d'eau. Le troupeau s'y rend le jour j1 pour s'abreuver, et gagne le jour j2 des pâturages situés dans la

direction opposée. Le périple nocturne est réalisé à partir du campement, ou plus ou moins intégré à celui de j1 et de j2. Ce type de rythme, par rapport au précédent, permet le retour du troupeau au campement matin et soir, et donc 2 allaitements quotidiens des veaux. La priorité est donnée au pâturage le jour j2 (celui où le bétail ne s'abreuve pas) et pendant la nuit. C'est un système particulièrement adapté aux conditions de saison fraîche ; d'une part les animaux se contentent alors volontiers d'un abreuvement tous les deux jours et, d'autre part, il reste généralement à cette période suffisamment d'herbe entre le campement et le point d'abreuvement pour que le bétail puisse s'alimenter pendant le jour j1. Il n'en va pas de même en saison chaude, lorsque toute herbe a quasiment disparu sur ce trajet ; le type E est alors affecté des mêmes contraintes de pénurie fourragère que le type D, tout en présentant des avantages inconstestables (allaitement des veaux, possibilité de ne pas isoler les laitières du troupeau principal).

En revanche, il est plus exigeant en main-d'œuvre et plus contraignant pour les bergers. Le campement ainsi situé est souvent temporaire et les bergers y sont donc éloignés de leur groupe familial. De plus, il est nécessaire d'abreuver les veaux au point d'eau le jour j2 si possible (pour qu'ils ne rencontrent pas leurs mères sur le parcours), ce qui implique alors un dédoublement de la main-d'œuvre, avec un berger qui garde le troupeau proprement dit et un autre, les veaux.

Type F

Ce rythme est rarissime (il a été pratiqué par certains éleveurs en 1973 ainsi qu'en fin de saison sèche 1980) ; il correspond à l'extrême limite des possibilités physiques du bétail dans des conditions de grave pénurie fourragère. Le troupeau part du point d'eau le soir du jour J1 pour n'y revenir que le matin du jour J4 après avoir donc passé trois nuits et deux jours entiers sans boire. Solution exceptionnelle qui permet d'accéder à des pâturages situés à 25 km environ du point d'eau, elle semble n'avoir été adoptée que par quelques éleveurs peul djelgobe du nord-ouest de l'Oudalan. Les animaux affaiblis ou malades, les jeunes veaux et leurs mères, ne peuvent évidemment pas suivre le troupeau, qui adopte un rythme particulièrement épuisant.

Cette typologie ne doit pas laisser penser à une causalité stricte de la distribution spatiale des ressources fourragères (compte tenu de la localisation des points d'eau) sur le rythme réellement adopté. Le passage du type A aux types C, D, voire F, suppose un espace ouvert, où les seules limitations sont celles imposées par la charge en bétail du point d'eau concerné, et donc par la réduction progressive des ressources fourragères à partir de ce point d'eau.

Cette situation est caractéristique de l'Ouest de l'Oudalan où les points d'eau de saison sèche ouvrent au nord et à l'ouest sur un espace non borné par les utilisateurs d'autres points d'abreuvement, puisque ceux-ci n'existent pas. L'avancée progressive du front de pâture permet donc de gagner de proche en proche des pâturages jusque-là préservés. Il n'en va pas de même pour la plupart des autres zones de l'Oudalan, où les points d'abreuvement sont suffisamment proches les uns des autres pour que les fronts de pâture à partir de 2 points d'eau se rencontrent plus ou moins tôt en cours de saison sèche, ou que les troupeaux puissent s'abreuver à plusieurs points d'eau différents à partir du même lieu de campement. Dans ce cas, les solutions de type D ou E ne peuvent être adoptées le plus souvent, puisque sans objet, et les éleveurs disposent donc d'une gamme plus réduite de choix possibles. Les troupeaux sont alors soumis à des conditions de pénurie fourragère à la fois plus précoce et plus sévère, qui peuvent

constituer une raison impérieuse pour gagner d'autres zones de parcours et utiliser d'autres points d'eau.

Par ailleurs, certains types de rythme imposent plus que d'autres des contraintes aux bergers et au groupe familial, qui sont ou non acceptées compte tenu des disponibilités en main-d'œuvre, des besoins en lait de la famille, de la taille du troupeau, etc. Certains éleveurs, alors que le niveau des ressources fourragères est encore satisfaisant non loin du point d'eau, peuvent opter pour des rythmes plus contraignants qui leur permettent d'accéder les premiers à des pâturages productifs éloignés.

Les comportements adoptés traduisent donc à la fois l'impact des conditions climatiques, celui de la distribution des ressources fourragères dans l'espace, ainsi que l'influence d'autres facteurs moins liés au milieu qu'à la structure et au fonctionnement du système de production.

DES MODES DE CONDUITE CONTRASTÉS

L'exemple de 2 cas suivis au cours des années 1980 et 1981 permet de rendre compte de la succession des pratiques de conduite adoptées par les éleveurs et d'illustrer les raisons et les conséquences de la disparité des comportements observés.

LE PREMIER EXEMPLE concerne une famille peul djelgobe de 25 personnes environ, qui gère un troupeau bovin de plus de 200 têtes. Son campement et ses terres de cultures sont situés à Saba Kolangal, dans la partie ouest de l'Oudalan, face à un vaste domaine de parcours dépourvu de tout point d'eau en saison sèche.

Sur les graphiques de la figure 2 sont schématisés les déplacements saisonniers du troupeau durant les années 1980 et 1981, ainsi que les rythmes adoptés en saison sèche à partir des puisards de Saba. Le centre du cercle symbolise le lieu de campement de saison sèche, et les chiffres entre parenthèses qui suivent dans le texte renvoient à ceux des secteurs de ces graphiques ainsi qu'aux cartes des déplacements saisonniers correspondants.

Après les récoltes de 1979, les conditions fourragères sont très mauvaises. Le troupeau bovin est dissocié en 2 fractions : l'une reste quelque temps sur le champ d'un agriculteur de Saba («contrat» de fumure), pâture à proximité en rentrant matin et soir au point de parcage (rythme A). L'autre adopte le rythme C, bientôt remplacé par le rythme D (abreuvement tous les deux jours) et tout le bétail est finalement regroupé fin janvier. Devant la pénurie fourragère de plus en plus prononcée, les bergers décident en pleine saison chaude d'adopter le rythme F (exceptionnel) qu'ils maintiennent pendant près d'un mois, en accédant alors à des pâturages situés au-delà du forage Christine. Trois bergers se remplacent par roulement (un seul berger conduit le troupeau). À la fin du mois de mai, avec le début des mise-bas, ils décident de revenir au rythme D, qu'ils pratiquent jusqu'aux premières pluies de l'hivernage (6 et 9 juin 1980). Le troupeau avait été divisé auparavant et les animaux âgés, faibles ainsi que les vaches ayant mis-bas étaient conduits séparément. Cette scission va se prolonger durant la saison des pluies.

Dès la première pluie, le troupeau s'installe pendant dix jours à Siringou (1) puis gagne l'ouest de la mare d'Oursi (2). Les vélages sont alors quasiment terminés. Après deux semaines de séjour près de la mare d'Oursi, il rentre à Saba pour repartir immédiatement à Tioffa, au sud-ouest de Déou. Le troupeau principal n'y reste qu'une semaine (3) ; il revient à nouveau à Saba pour se rendre ensuite fin juillet à la cure salée d'Amniganda au Mali (4) et ne revenir à Saba qu'après les récoltes. Les laitières et les bêtes faibles, qui étaient restées à Tioffa (5), partent ensuite à Loukodou (6) au

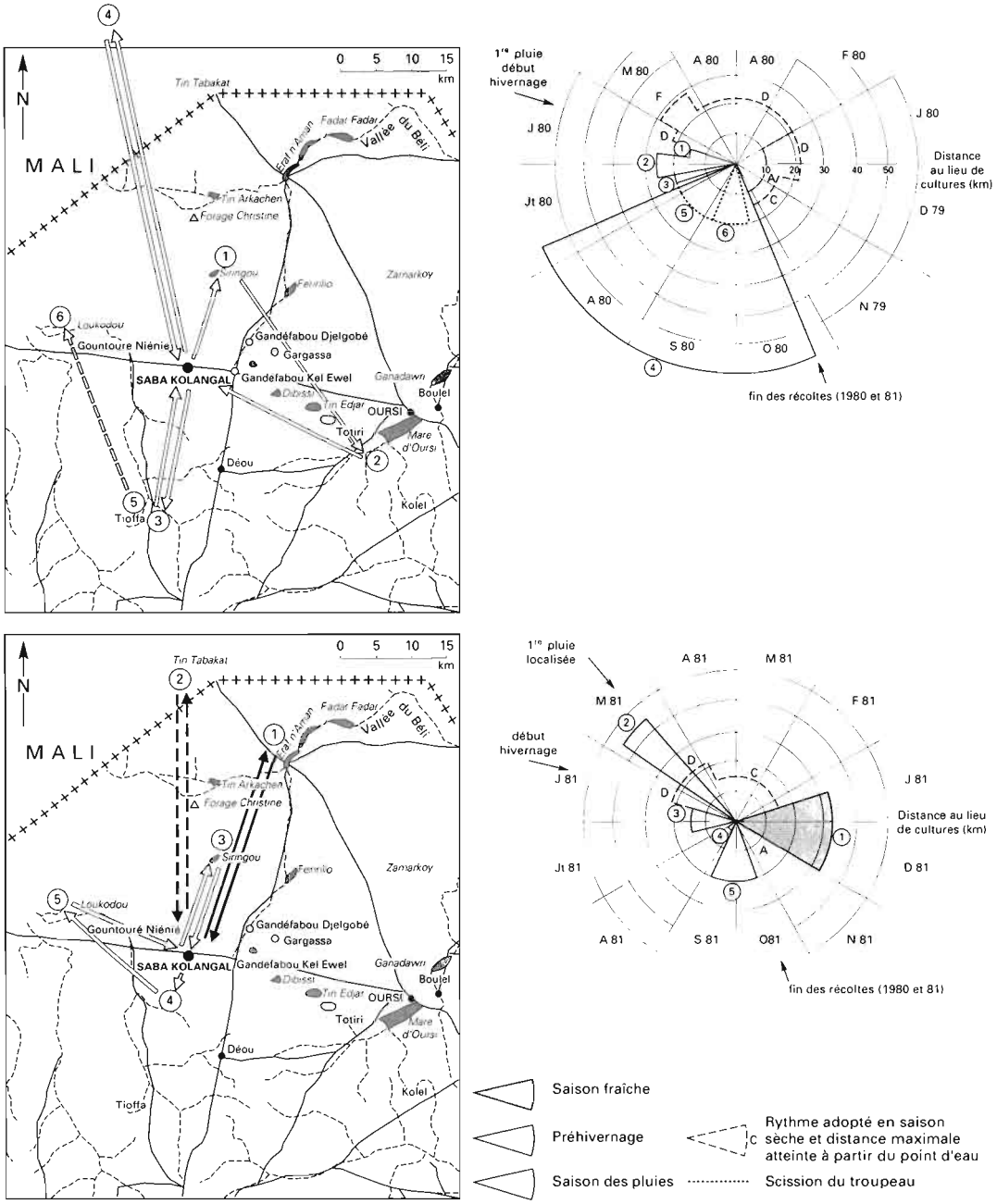


FIGURE 2 - *Déplacement du troupeau bovin de Saba Kolangal en 1980 et en 1981.*

début du mois de septembre, pour rejoindre Saba vers la mi-octobre. Ces déplacements successifs de saison des pluies se justifiaient par la recherche des pâturages de bas-fonds et de glacis les plus productifs, par la nécessité d'écarter le bétail des terroirs cultivés, à partir du mois d'août, et par la fréquentation en saison des pluies des cures salées (Oursi, et surtout Amniganda) considérée sans doute cette année-là comme impérative compte tenu de l'état d'affaiblissement très prononcé de tous les animaux.

Après les récoltes de 1980, le troupeau suit pendant un peu plus d'un mois un rythme de type A, puis entreprend une transhumance en saison fraîche à Eraf N'aman pendant plus d'un mois et demi, tandis que les laitières sont maintenues à Saba. Ce séjour au Béli, au cours duquel le campement provisoire des bergers est fréquemment déplacé, permet l'abreuvement direct du bétail (en évitant donc le dur travail d'exhaure de l'eau des puisards) ; il permet également l'accès à des pâturages qui ne peuvent plus être fréquentés par la suite lorsque le Béli est tari à Eraf N'Aman.

En établissant le campement à une dizaine de kilomètres du Béli, le bétail peut gagner, grâce au rythme de type E, des pâturages situés à une vingtaine de kilomètres du point d'eau, donc dépasser largement le forage Christine. Par ailleurs, l'abreuvement un jour sur deux ne représente pas une contrainte véritable pour les animaux à cette période de l'année (basses températures).

Le troupeau se replie sur Saba le 17 janvier 1981, non parce que l'eau et le pâturage ne sont plus disponibles, mais parce que les bergers ont hâte de retrouver leurs familles. Durant trois mois, les ressources fourragères abondantes vont permettre, à partir des puisards de Saba, de maintenir un rythme de type C, et ce n'est que fin avril que le bétail passera au rythme D. Vers le 10 mai, tombe une pluie très localisée au nord, et le troupeau part immédiatement en déplacement de préhivernage à Tin Tabakat (2) pour exploiter, à partir des flaques d'eau créées, des pâturages qui sont inaccessibles en saison sèche, adopter un rythme quotidien moins contraignant (partir loin permet de marcher moins chaque jour) et bénéficier donc en fin de saison chaude de bonnes conditions alimentaires. Dès la première mise-bas, le troupeau regagne Saba pour reprendre le rythme D qu'il avait interrompu et, à la pluie suivante, il gagne la petite mare de Siringou (3) où , en s'abreuvant chaque jour, il fréquente les pâturages dunaires et les brousses tigrées environnantes. Seules 10 vaches laitières sont alors maintenues à Saba où la pluie importante du 18 juin déclenche les semis. Le troupeau se replie sur Saba le 9 juillet, et tout le campement se déplace le 22 juillet à quelques kilomètres au sud-ouest pour s'écarter des champs, le bétail pâturant dans les bas-fonds et sur les glacis voisins (4). Début septembre, alors que quelques laitières demeurent au campement, le troupeau (qui s'est en fait divisé durant l'hivernage) part à Loukodou (5) pour rentrer à Saba dès la fin des récoltes. Au début du mois de novembre 1981, comme l'année précédente, il repart en transhumance de saison fraîche sur le Béli.

Pour chacune des ces 2 années, le troupeau principal (compte non tenu des animaux qui restent au campement) a été absent de Saba pendant cinq mois environ. Mais les lieux et les périodes de déplacement diffèrent sensiblement, notamment en raison des conditions climatiques, des disponibilités fourragères et de l'état du cheptel.

Quant aux rythmes adoptés en saison sèche, ils apparaissent évidemment liés très directement à la répartition des ressources fourragères et témoignent, dans cette région nord-ouest de l'Oudalan, de la possibilité d'exploiter des pâturages éloignés à partir des points d'eau pérennes situés à leur périphérie.

Le troupeau principal de Saba est toujours accompagné. Seul le sous-troupeau de laitières, éventuellement dissocié du reste des animaux à certaines périodes, n'est pas systématiquement gardé, tout au moins lorsque l'abreuvement est quotidien et qu'il ne

pâture pas à de trop longues distances du campement. En saison sèche 1981, lorsque tout le bétail était encore regroupé en un troupeau unique, un seul berger l'accompagnait au pâturage, mais en fait 3 hommes se remplaçaient régulièrement pour ce gardiennage. L'abreuvement était réalisé aux puisards au retour du troupeau le matin, et un complément était généralement apporté avant le départ de l'après-midi. Ce travail de puisage, compte tenu de la taille du troupeau (200 bêtes), exige la participation de 2 hommes et l'exhaure de 5 m^3 d'eau ou plus *. Durant les déplacements de saison des pluies ou de saison fraîche, il n'est pas rare que 2, sinon 3, bergers soient nécessaires pour accompagner le troupeau.

LE SECOND EXEMPLE se rapporte à une famille Iklan Iderfane dont le campement et les terres de culture sont localisés à Totiri, à quelques kilomètres à l'est de la mare d'Oursi. Le groupe résidentiel, constitué de 5 ménages, comprend 23 personnes lorsqu'il est complet. Les surfaces cultivées sont importantes (environ 0,9 ha par habitant) et permettent en année «normale» de satisfaire les besoins vivriers de la famille.

Le troupeau bovin regroupe 55 têtes en décembre 1981 et manifeste une mobilité beaucoup plus réduite que celui de Saba. La situation du campement permet durant la saison sèche d'utiliser 2 points d'eau : la mare d'Oursi et celle de Tin Edjar ; cette dernière s'assèche assez rapidement mais elle est alors relayée par les puisards qui y sont creusés. La différence fondamentale avec le cas précédent réside surtout dans la très forte charge en bétail qui s'exerce autour de la mare d'Oursi au cours de la saison sèche et qui, selon les disponibilités fourragères de l'année, aboutit plus ou moins tôt à une disparition quasi totale du pâturage herbacé dans un rayon d'une dizaine de kilomètres autour de la mare. Le complexe dunaire situé au nord, bien que vaste, est activement pâturé à partir des points d'eau d'Oursi, Ganadawri, Tin Edjar, Dibissi et Gargassa.

En 1980, confronté à une situation de pénurie fourragère très sévère, le chef de campement décide, dès le 27 février, de quitter Totiri avec le troupeau bovin pour s'installer à Gargassa (à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de Totiri), tandis que le groupe familial demeure sur les champs avec les caprins et les ovins.

Les bovins sont alors abreuvés quotidiennement, à partir de Gargassa, aux puisards de Tin Edjar, pendant un mois (rythme B), puis une fois tous les deux jours (rythme E), en allant pâturer le lendemain de l'abreuvement au nord-est de Gargassa. Le bétail est très affaibli et la mortalité très élevée en fin de saison sèche et en début d'hivernage (11 morts au total, dont 9 veaux nés l'année précédente). Le troupeau rejoint Totiri le 10 juin 1980 à la première pluie et s'abreuve désormais dans les bas-fonds proches ; il n'est gardé que la nuit, car tous les hommes sont accaparés pendant la journée par les travaux agricoles. Début août, après le premier sarclage du mil, le campement se déplace vers son lieu d'hivernage, sur les glacis situés à quelques kilomètres au sud des champs. Jusqu'à la mi-octobre, le bétail pâture à proximité (bas-fonds et glacis) où il trouve des points d'eau dispersés. Durant cette période, il fréquente à peu près chaque semaine la cure salée située en bordure de la mare d'Oursi.

Après les récoltes, le campement se déplace à nouveau pour s'installer sur les champs, et les bovins sont conduits jusqu'au 7 mars 1981 à la mare d'Oursi un jour sur

* Dans ces puisards, l'eau se trouve située à environ 2,50 m de profondeur. Le puisage s'effectue à l'aide d'une calebasse, d'une contenace de 5 à 6 l, suspendue à une corde. Les mesures faites en saison sèche, 1981, indiquent des consommations d'eau quotidiennes de 25 à 35 l par tête (tous âges confondus) suivant la saison (fraîche ou chaude) pour un rythme de type C, c'est-à-dire d'un abreuvement quotidien. Le temps nécessaire à 2 hommes pour abreuver le troupeau variait entre 4 et 5 h.

deux pour s'y abreuver. En raison du relèvement de la température et de la régression des ressources fourragères, l'éleveur décide alors d'abreuver quotidiennement le troupeau, alternativement à Oursi et à Tin Edjar, où des puisards ont été creusés (rythme B', maintenu jusqu'à la fin du mois de mars) : le périple quotidien du troupeau est de 22 kilomètres le premier jour, de 13 kilomètres le lendemain. La mare d'Oursi est ensuite délaissée en raison de la dégradation très poussée des pâturages dunaires environnants, et les bovins, qui sont alors abreuvés chaque jour aux puisards de Tin Edjar, pâturent essentiellement sur les piémonts et sur le massif rocheux, en étant régulièrement gardés jour et nuit.

Une première pluie localisée au début du mois de juin 1981 provoque le départ du troupeau bovin à Zamarkoy ; les flaques qui s'y sont créées permettent d'exploiter sur place un pâturage de brousse tigrée où subsiste encore une quantité appréciable d'herbe sèche. La pluie du 19 juin déclenche les semis à Totiri, et le troupeau regagne le campement le 30 juin pour s'abreuver dans un marigot voisin et pâturer près du massif de Tin Edjar. Comme l'année précédente, les bovins ne sont gardés jusqu'à la fin des sarclages que durant leur petit périple nocturne, ou lorsqu'ils sont conduits à la cure salée d'Oursi. La récolte du mil débute le 12 octobre et les bovins rentrent dans les champs dès le 20 octobre pour y consommer les résidus de culture ; ils pâturent sans gardiennage jour et nuit et continuent à fréquenter épisodiquement la cure salée d'Oursi.

Devant l'état catastrophique des récoltes, 3 des 5 chefs de ménages décident de partir avec leurs familles dans la région de Kaya pour subvenir à leurs besoins alimentaires quotidiens en échange de travaux divers (défrichements, pilage du mil, etc.). Après la ré-installation du campement sur les champs, fin novembre, les bovins sont abreuvés tous les jours, alternativement à la mare d'Oursi et à celle de Tin Edjar, jusqu'au 20 janvier 1982. Plusieurs voyages que le chef de campement doit entreprendre dans la région d'Aribinda pour acheter du mil interrompent le gardiennage et modifient le rythme d'abreuvement. Devant la disparition quasi totale du pâturage autour de la mare d'Oursi, le campement se déplace le 25 février sur les glacis à quelques kilomètres au sud-ouest de Totiri.

Au cours de deux années consécutives, les déplacements du bétail sont donc très limités et ils s'inscrivent presque exclusivement dans le périmètre accessible à partir du point d'eau de Tin Edjar. Les migrations de travail en saison sèche, la priorité accordée à l'entretien des cultures en saison de pluies, font que la main-d'œuvre effectivement disponible pour les activités d'élevage est rare. Le troupeau bovin s'éloigne très rarement du groupe résidentiel et le gardiennage, et donc le choix que peut faire l'éleveur des parcours quotidiens, est irrégulièrement assuré. Les pertes très élevées qu'a subi ce troupeau en 1980 sont directement imputables à cet état de fait, alors que, en 1981, les bonnes conditions fourragères ont permis au bétail de s'en accommoder sans dommage. Les solutions adoptées en conditions de crise apparaissent comme des palliatifs insuffisants. Le chef de campement, bien que très actif et connaissant parfaitement ses bêtes et leurs besoins, avoue lui-même être souvent accaparé par des tâches plus urgentes, en particulier l'approvisionnement en vivres du groupe familial.

CONCLUSION

Le premier exemple évoqué illustre la capacité de certains systèmes d'élevage sahéliens de s'adapter, grâce à la mobilité et à la fréquentation d'un grand espace, à des conditions de milieu diverses et changeantes. De telles pratiques reposent sur une connaissance poussée de l'environnement, de ses atouts et de ses contraintes. Leur maintien, ainsi que celui des genres de vie qui leur sont intimement liés, suppose

qu'une condition primordiale soit remplie : l'espace doit rester ouvert et sous-exploité, pour que, même en année défavorable, le prélèvement des ressources fourragères permette de couvrir les besoins du cheptel sans porter atteinte aux capacités productives ultérieures du milieu.

Or, cette condition n'est plus remplie actuellement. Les densités humaine et animale se sont considérablement accrues. Les terres de culture se sont étendues, non seulement sur les sols sableux qui constituent le lieu privilégié de culture du mil, mais également depuis 1973 dans les bas-fonds argileux, aux dépens des prairies à *Panicum laetum* qui représentent un pâturage de choix en saison des pluies, et de la strate ligneuse localisée préférentiellement dans ces sites. Les différentes formations végétales se dégradent, le ruissellement s'accentue. Même lorsque les conditions climatiques de l'année sont satisfaisantes, les charges animales excèdent globalement ce que les parcours pourraient supporter sans dommage. Cette évolution ne s'accompagne pas, bien au contraire, d'une intensification des pratiques d'élevage. La taille des troupeaux s'est réduite, le gardiennage est souvent mal assuré, les animaux connaissent chroniquement de graves situations de pénurie fourragère, auxquelles les éleveurs ne peuvent répondre, certaines années, que par une fuite généralisée hors de l'Oudalan. Le cheptel se trouve confiné dans des espaces utilisables de plus en plus réduits, et les rapports de concurrence pour l'accès à des ressources rares s'exacerbent.

Dans un tel contexte, les pratiques qui avaient fait la preuve de leur efficacité par le passé deviennent inopérantes, ou ne peuvent plus être le fait que de rares groupes d'éleveurs, placés en situations plus favorables que la plupart des autres, et qui choisissent d'accepter encore les contraintes inhérentes à ce type d'élevage. Tout en reconnaissant que dans les zones semi-arides le pastoralisme génère sa propre disparition et qu'il est nécessaire que d'autres systèmes d'élevage se mettent en place, peut-être pourrait-on admettre que puisse se maintenir pour certains, grâce notamment à l'adoption de nouveaux principes de gestion de l'espace régional et de ses ressources, un mode d'existence délibérément choisi qui ne peut être réduit aux seuls faits de production.

P. MILLEVILLE : *agronome*, LEA, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

BIBLIOGRAPHIE

BARRAL (H.), 1977. - Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 77, 119 p. + 8 cartes h.-t.

BENOIT (M.), 1984. - Le Seno-Mango ne doit pas mourir : pastoralisme, vie sauvage et protection au Sahel. *Mém. ORSTOM*, n° 103, 143 p.

COMBES (J.), 1984. - Enquête sur l'élevage et sa place dans les systèmes de production de l'Oudalan. ORSTOM - ORD du Sahel, Ouagadougou, *multigr.*, 50 p. + ann.

GALLAIS (J.), 1975. - Pasteurs et paysans du Gourma. La condition sahélienne. *Mém. du Ceget*, CNRS, Paris, 239 p.

GROUZIS (M.), 1987. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse d'État, université de Paris-Sud, 336 p.

LANDAIS (E.), LHOSTE (P.) et MILLEVILLE (P.), 1987. - Points de vue sur la zootechnie et les systèmes d'élevage tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum.*, 23 (3-4) : 421-437.

LE MASSON (A.), 1980. - Situation de l'élevage bovin dans la sous-préfecture de l'Oudalan, Gorom-Gorom. Rapport d'activités 1977-1979. ORD du Sahel doc. CIDR n° 228, 177 p.

LHOSTE (P.), 1977. - Étude zootechnique, inventaire du cheptel. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, IEMVT, *multigr.*, 49 p.

MILLEVILLE (P.), 1989. - Activités agropastorales et aléa climatique en région sahélienne. «Le risque en agriculture» : 233-241. *Coll. à travers Champs*, ORSTOM, Paris.

MILLEVILLE (P.), COMBES (J.) et MARCHAL (J.), 1982. - Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan. Étude de cas. ORSTOM Ouagadougou, *multigr.*, 127 p.

SICOT (M.) et GROUZIS (M.), 1981. - Pluviométrie et production des pâturages naturels sahéliens. Étude méthodologique et application à l'estimation de la production fréquentielle du bassin versant de la mare d'Oursi, Haute-Volta. ORSTOM Ouagadougou, *multigr.*, 33 p.

Edmond BERNUS

Hydraulique pastorale et gestion des parcours

C'est dans la zone à vocation pastorale que les éleveurs et leurs troupeaux peuvent exploiter tous les espaces disponibles, toutes les ressources de leur environnement. Cette zone, théoriquement impropre aux cultures sous pluie, passe d'une végétation steppique faiblement arbustive, au nord, à une steppe arborée au sud. Elle possède des ressources hydrauliques et fourragères, variables dans le temps et discontinues dans l'espace, qui permettent aux troupeaux, si les conditions climatiques sont favorables, de s'abreuver et de pâturer grâce à cette complémentarité entre les saisons et entre les régions.

RESSOURCES HYDRAULIQUES ET FOURRAGÈRES

En simplifiant, on peut distinguer dans ces ressources celles qui sont relativement stables de celles qui sont variables et discontinues. Les premières, en ce qui concerne les pâturages, sont formées essentiellement de la strate arborée ; les ligneux, «*par leurs parties vertes et leurs fruits* [...] *possèdent une valeur fourragère "excellente" à "supérieure"*»* pendant toute l'année. Les feuilles des espèces «toujours vertes» et les fruits des espèces à feuilles caduques sont recherchés pendant la saison sèche et au cours de la période préhumide. En saison sèche, les ligneux portent les uniques sources en matières azotées indispensables à la constitution d'une ration équilibrée (RIPPSTEIN et PEYRE DE FABRÈGUES, 1972). Les arbres qui restent verts toute l'année, ou qui conservent leurs feuilles au cours de la période critique (*Balanites aegyptiaca, Ziziphus mauritiana* ou *Z. spina-christi, Salvadora persica, Bauhinia rufescens*, etc.) (nomenclature selon PEYRE DE FABRÈGUES et LEBRUN, 1976), ou encore qui fructifient successivement au cours de la saison sèche, fournissent un apport alimentaire de qualité, alors que les espèces herbacées ne donnent plus qu'un lest dont la valeur fourragère diminue rapidement.

Par ailleurs, les herbes vivaces ne doivent pas être oubliées parmi les ressources relativement stables, en raison des surfaces couvertes par certaines d'entre elles, comme *Panicum turgidum* et, à un moindre degré, *Cyperus conglomeratus* dans les zones sableuses. Si la première «possède une valeur fourragère "bonne" en fin de sai-

* Selon la valeur nutritive du kg de matières sèches, les espèces peuvent être classées en 6 catégories, de 5 à 0 : «supérieures» (5) - «excellentes» (4) - «bonnes» (3) - «moyennes» (2) - «médiocres» (1) - «nulles» (0). Les espèces sont susceptibles d'assurer une production journalière de 5 litres de lait et un gain de poids de 600 g de poids vif (catégorie 5), de 0,5 litre et de 100 g (catégorie 3), ou de faire perdre du poids et de fournir une alimentation déficitaire (catégorie 0).

son des pluies, et "médiocre" mais non "nulle" (*cf. supra*) en toute saison par ses inflorescences» (RIPPSTEIN et PEYRE DE FABRÈGUES, 1972), elle joue un rôle important comme espèce dominante des dunes et des substrats sableux.

Les ressources hydrauliques stables - sources, fleuves, lacs, mares pérennes et nappes profondes qui alimentent les puits, et, depuis quelques décennies, forages et stations de pompage - constituent les éléments permanents et l'ultime recours avant le retour des pluies.

Quant aux ressources variables, fourragères et hydrauliques, elles sont tributaires des pluies estivales qui reviennent chaque année, aussi irrégulières soient-elles. Les pâturages d'herbes annuelles dépendent étroitement de la quantité des précipitations et de leur répartition ; les pluies doivent tomber régulièrement, sans hiatus important, pour permettre aux herbes d'effectuer un cycle complet, de la germination à la floraison et à la maturation des graines.

Les ressources hydrauliques variables consistent en eaux de surface renouvelées chaque année dans les mares et en nappes de formations superficielles rechargées à chaque saison des pluies qui alimentent les puisards, souvent asséchés avant le retour des orages.

Autrement dit, les ressources variables, tant fourragères qu'hydrauliques, traduisent avec précision la nature des précédentes pluies. Après chaque été, tout est joué jusqu'au mois de juin suivant.

Les Services de l'élevage ont tenté de corriger cette variabilité qui remet en cause périodiquement la survie des troupeaux dont les effectifs peuvent difficilement être ajustés aux ressources fourragères annuelles. Cette action, cependant, n'a pu corriger qu'une seule des variables ; si les ressources en eau ont pu être augmentées et rendues permanentes grâce à des puits cuvelés et à des remontées mécaniques qui donnent accès aux nappes profondes, les ressources fourragères sont restées aléatoires comme les pluies dont elles sont tributaires. N'ayant prise que sur un seul facteur, les conditions d'exploitation des parcours furent profondément modifiées et les éleveurs qui vivent dans ces régions durent s'adapter et parfois faire face à l'arrivée de nouveaux venus attirés par les stations de pompage, ouvrages publics, offrant une eau abondante, claire comme au puits, directement disponible comme à la mare. Au Sénégal, au Niger, au Burkina Faso, des exemples montrent que des actions, qui ont provoqué des effets comparables sur le milieu, ont suscité en revanche des réactions différentes chez les éleveurs ; ceux-ci ont mis en œuvre des stratégies adaptées aux conditions locales et qui correspondent à leurs habitudes propres.

POLITIQUES D'HYDRAULIQUE PASTORALE ET PROJETS

Jusqu'à une époque récente, les Services de l'élevage s'étaient davantage intéressés aux problèmes zootechniques, en particulier à la lutte contre les épizooties, et à l'accroissement des ressources hydrauliques qu'à l'écologie pastorale et à la gestion des parcours. En effet, c'est seulement à partir de 1961 que les études de pâturages ont été lancées par l'Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux (IEMVT) pour réaliser, sur des cartes à diverses échelles, les inventaires des parcours avec leurs charges théoriques annuelles ou saisonnières.

«*Dans les premiers plans de développement de l'élevage tropical, les équipements d'hydraulique pastorale avaient une haute priorité.*» (PAGOT, 1985). Dès 1948, le plan du Fonds d'investissement pour le développement économique et social (Fides) créait un chapitre spécial qui concernait l'hydraulique pastorale ; l'objectif était d'ouvrir aux troupeaux de nouveaux pâturages dans les zones où ceux-ci ne pouvaient être exploités,

faute d'eau. Au Niger, sur ce budget, un millier de puits furent creusés et quelques forages furent réalisés, sans être ouverts d'ailleurs. Au Sénégal, les premières stations de pompage furent mises en service en 1951, dans le dessein d'équiper le Ferlo par un réseau d'ouvrages distants de 25 km les uns des autres ; entre 1951 et 1975, 49 forages furent mis en service (SERRES, 1980). Au Niger, c'est à partir de 1961 que des stations de pompage furent installées en zone pastorale et, en particulier, au nord de Tahoua, c'est-à-dire dans l'actuel arrondissement de Tchin Tabaraden. Entre 1959 et 1969, 20 stations furent successivement ouvertes en zone pastorale, mais quelques-unes durent être fermées pour diverses raisons (pannes, sabotage, etc.). Un rapport annuel (1959-60) de la Direction de l'élevage du Niger définit très clairement cette politique ; ce texte, en raison de la personnalité de son auteur, inspecteur général vétérinaire (RECEVEUR, 1960), peut être considéré comme la charte de la période qui a précédé la sécheresse.

Ce rapport estime que «*pour aménager les zones sahéliennes, il importe donc non seulement d'atteindre les nappes souterraines, mais encore d'amener l'eau à la surface et cela en quantité telle que la totalité des besoins soit satisfaite*». Pour éviter des erreurs et des gaspillages de fonds, il paraît «*indispensable d'établir une doctrine en ce domaine*». La solution envisagée est d'équiper la zone pastorale d'un réseau de puits et de stations de pompage, les premiers distants entre eux de 7 à 10 km et les seconds, de 20 à 50 km. Aux objections attendues, relatives aux coûts, aux problèmes de maintenance et surtout de surcharge des parcours, l'auteur du rapport répond que :

- il s'agit d'un investissement de base, au même titre que les routes, et qu'à terme cet investissement doit apporter un accroissement général de richesse ;
- des règles strictes concernant l'entretien et la gestion doivent permettre un fonctionnement normal des stations ;
- enfin, un équipement d'ensemble de la zone et un emplacement bien choisi des ouvrages, lié à une législation fixant les conditions d'exploitation des parcours, doivent éviter tout risque de surcharge : les craintes formulées en ce domaine sont «*en fait illusoires, le taux de chargement admissible restant toujours très au-dessus de celui exigé pour la rentabilité de l'opération*».

Au Niger, cette doctrine reçut un début d'application dans une zone pastorale parfaitement identifiée, au nord d'une limite théorique des cultures sous pluie, fixée sur la carte avec une grande précision (grossièrement l'isohyète 350 mm de l'époque*). Cette zone, dite de «modernisation pastorale», devait recevoir un maillage de points d'eau avec bon nombre de stations de pompage pour exploiter les nappes des bassins sédimentaires qui forment l'essentiel de son sous-sol.

D'autres pays, qui se trouvent sur le socle, et qui, en conséquence, ne possèdent pas de nappes profondes continues, ne purent qu'exceptionnellement être équipés de stations de pompage. C'est le cas de l'Oudalan, qui constitue l'espace pastoral sahélien du Burkina Faso ; le réseau des points d'eau est organisé autour de puits, de puisards et de mares temporaires. Aussi, lorsqu'une station fut installée, comme le «forage Christine» en 1972, pour donner accès à des pâturages inaccessibles faute d'eau, cela créa un déséquilibre, dangereux en période de crise (*cf. infra*).

Ces politiques d'hydraulique pastorale, qui avaient le mérite d'une grande cohérence, furent cependant loin d'être uniformes, en raison des capacités variables du sous-sol et des initiatives de chaque État. Elles avaient été lancées avant la grande sécheresse qui se manifesta à partir de 1969 et qui, malgré quelques atténuations, ne cessa d'accumuler

---

* Aprés les déficits pluviométriques répétés depuis 1969, l'isohyète de 350 mm se trouve décalée vers le sud.

les déficits pluviométriques, en dehors même des paroxysmes atteints certaines années (1983 et surtout 1984).

La première phase (1969-1974) de cette période sèche a brutalement provoqué une prise de conscience ; la conjonction d'un accroissement incontrôlé du bétail (troupeau bovin doublé en vingt ans au Niger) et de déficits pluviométriques prolongés est très préjudiciable à un milieu fragile. À l'échelle internationale, l'*United Nations Environment Programme* (Unep), programme spécialisé des Nations unies, organise, en 1977 à Nairobi, une conférence sur la «désertification» pour élaborer des règles de gestion de l'environnement en zone aride. À l'échelle de l'Afrique, de nombreuses études prospectives sont effectuées et plusieurs organismes inter-États*, qui concernent le Sahel, sont créés. Tous les projets** mis en place à partir de 1975 inscrivent au premier rang de leurs préoccupations le *range management*, expression venue d'Amérique, sans équivalent en français et que l'on traduit généralement par «gestion des pâturages» (BERNUS, 1982). C'est pourquoi, il n'est peut-être pas inutile de s'interroger sur les conséquences des politiques d'hydraulique pastorale qui ont précédé ces projets, et sur les stratégies des éleveurs au cours de ces périodes de crise.

LES CONSÉQUENCES

Comme première conséquence de cette politique, il faut inscrire les concentrations de bétail autour des points d'eau à fort débit, principalement des stations de pompage. Les effectifs prévus, que l'on espérait maintenir au-dessous d'un certain seuil, furent partout largement dépassés (les *maxima* envisagés en UBT*** furent souvent multipliés par 3 ou par 4, par exemple au Niger, dans l'arrondissement de Tchin-Tabaraden) ; les gouvernements se refusèrent à légiférer pour un accès sélectif à ces ouvrages publics (des textes eussent-ils d'ailleurs existé, on voit mal comment ils auraient pu être appliqués). Au Niger, on ne put que limiter le temps de fonctionnement des stations, en ouvrant le plus tard et en fermant le plus tôt possible chacune d'elle à des dates différentes, sur décisions administratives qui tenaient compte des ressources environnantes (mares encore en eau durant la saison sèche, date des premières pluies) ; dans certains cas, une station fut fermée pour mettre la végétation au repos pendant un an ou plusieurs années consécutives.

Il est inutile de s'étendre sur un sujet qui a été abordé dans de nombreuses publications (*cf.* réf. bibliogr.). On peut dire rapidement que le paysage se modifie et que parfois des auréoles concentriques se dessinent autour des forages à partir d'une plage centrale totalement dénudée. Les effets sur la végétation sont la conséquence directe du piétinement du sol, de l'accumulation des déjections animales sur l'espace proche des abreuvoirs et du déchaussement des arbres servant d'ombrage (sols ameublis, troncs ébranlés). Les modifications qualitatives sont aussi la conséquence indirecte de la concentration du bétail : transport et dissémination des graines épineuses accro-

---

* Parmi les organismes inter-États citons : le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (Cliss) / Club du Sahel, l'Institut du Sahel, etc.

** Parmi ces projets, signalons au Niger : «Projet Sud-Tamesna», «Gestion des pâturages du Niger central», «Projet élevage Centre-Est».

*** UBT = unité bovin tropical de 250 kg de poids vif. Les équivalences admises sont :
- 1 dromadaire = 1 cheval = 1 UBT ;
- 1 bovin = 0,75 UBT ;
- 1 âne = 0,5 UBT ;
- 1 ovin = 1 caprin = 0,15 UBT.

chées à leur pelage (*Cenchrus biflorus, Tribulus terrestris*) en zone nord-sahélienne, ou encore dispersion des espèces ligneuses sahéliennes (*Acacia raddiana, Balanites aegyptiaca*) disséminées par les bovins et dont les graines germent après transit intestinal (MONOD, 1974).

Bien entendu, ces effets varient en fonction de la nature des sols comme des pressions humaine et animale. Autour du forage, si des maisons, des cultures, un marché ou même une bourgade s'installent, des besoins permanents, en paille, en bois de construction et surtout en bois de feu (GRENIER, 1987) pour l'utilisation sur place et pour le commerce du charbon de bois, s'ajoutent à ceux, souvent temporaires, des éleveurs.

L'implantation de ces stations de pompage à fort débit a eu comme corollaire la désorganisation du contrôle des pâturages, qui s'exerçait à partir des points d'eau dont les propriétaires étaient bien identifiés. Des regroupements se produisirent autour des stations de pompage au détriment des usagers du puits ancien qui virent leurs pâturages envahis par des étrangers. Les Peul woDaaBe, au Niger, qui s'étaient discrètement infiltrés en pays touareg, vont désormais concentrer leurs troupeaux autour des stations de pompage, et la masse sombre de leurs vaches qui entourent les abreuvoirs comme un mur infranchissable, va apparaître comme une gêne insupportable aux bergers touareg. Les troupeaux peul, toujours encadrés, suivis ou guidés, prennent souvent la place des vaches ou des chamelles des Touareg qu'on laisse seules venir s'abreuver. Deux types de gardiennage, deux modes de gestion des troupeaux s'affrontent autour des bacs métalliques et une tension, inconnue jusque-là, va s'exprimer dans les chaudes journées d'avril ou de mai et parfois dégénérer en batailles rangées. Les autorités administratives songèrent au début à réserver 2 stations de pompage aux seuls Peul et à limiter sur chacune le nombre des utilisateurs ; cependant, à l'usage, cette discrimination et ces limitations ne purent jamais être appliquées, et les troupeaux des vaches *bororodji*, aux cornes en lyre, exploitèrent les mêmes pâturages que les vaches *azawak*, les chamelles laitières et les petits ruminants des Touareg.

Au Ferlo, dès 1955-56, DUPIRE (1956) signale comme première conséquence «*la modification des parcours de transhumance, leur raccourcissement et une relative sédentarisation*». BARRAL (1982) a fait le point sur les conséquences des forages à partir d'une analyse de la gestion antérieure des parcours. Il note un déclin des transhumances et des cultures au Walo et la présence permanente de plus en plus fréquente des troupeaux au Ferlo. Il signale aussi un émiettement de la population, c'est-à-dire un éclatement des campements et l'abandon du contrôle de l'espace ; autrement dit, chaque forage devient une aire d'influence qui remplace les unités territoriales anciennes (*houroum*). Les mares d'hivernage jouent toujours un rôle important comme pôle de peuplement dans un nomadisme de faible amplitude entre les pâturages de saison des pluies et ceux de saison sèche. «*Les forages du Ferlo auront donc finalement réalisé le paradoxe suivant : permettre le maintien du pastoralisme et par là même de la culture Peul la plus authentique, là où l'on pouvait s'attendre à une sédentarisation et à une désaffection rapide envers le genre de vie pastorale.*» (BARRAL, 1982).

En revanche, une station de pompage isolée, dans une région où elle offre durant la saison sèche les seules ressources en eau, peut devenir un piège pour les troupeaux. En 1973, dans l'Oudalan (Sahel burkinabé), le forage Christine fut ouvert, après avoir été mis en service une première fois du 1er Avril au 10 Juin 1972 : «*or, après la pluie du 10 Juin qui a donné le signal de l'arrêt du pompage* [...] *il n'est pratiquement plus tombé une goutte d'eau* [...] *Ce qui avait été bénéfique en 1972 allait provoquer un désastre l'année suivante, simplement parce qu'il n'avait pas plu dans l'intervalle et que le pâturage ne s'était pas reconstitué.*» (BARRAL, *in* BENOIT, 1984). Des troupeaux, essentiellement maliens, qui avaient provoqué le départ du bétail local, subirent de

lourdes pertes (estimation de 10 000 animaux morts). Voici donc le cas exemplaire d'un déséquilibre entre ressources hydrauliques et ressources fourragères où des troupeaux, attirés par une eau abondante, meurent de faim, faute de pouvoir quitter l'aire de desserte d'un forage, qui peut seul les abreuver.

Les conséquences, on le voit, sont variées. C'est au Ferlo que cette politique d'hydraulique pastorale a été réalisée le plus complètement. Mais, comme on pouvait s'y attendre, on constate des défaillances techniques, auxquelles «la charte de 1960» au Niger, pensait pouvoir échapper : «*pour les trois régions administratives du Nord-Sénégal, 46 % des forages existant sont, en 1982, hors-service*» (GRENIER, 1987). Ces pannes, qui n'ont épargné aucun pays, ont provoqué immédiatement une redistribution des troupeaux, avec abandon des parcours privés d'eau et concentration sur des pâturages voisins.

Pour parer à ces déséquilibres, pour rendre responsables les éleveurs des pâturages qu'ils exploitent, les projets, à partir de 1975, tentent de mettre en place des «unités pastorales», fondées sur des associations d'éleveurs qui gèrent leur espace et participent à des groupements coopératifs. On pourrait dire que ces grands projets, financés par l'aide internationale, cherchent à échapper aux programmes ponctuels d'hydraulique, en essayant de recomposer le «tissu» de la zone pastorale avec des cellules de base mieux équilibrées.

Face à toutes ces politiques, à toutes ces interventions, quelles ont été les réactions des éleveurs ? Ont-ils subi passivement ces crises, ont-ils accepté les projets proposés ou ont-ils eu des initiatives propres ?

RÉACTIONS ET INITIATIVES DES ÉLEVEURS

Des enquêtes, menées dix ans après l'installation des stations de pompage dans l'arrondissement de Tchin-Tabaraden au Niger, permettent de se rendre compte de l'impact d'une telle politique dans la vie des éleveurs (MARTY, 1972). Les réponses ne sont pas uniformes et montrent qu'il existe à la fois des partisans et des adversaires de ces nouveaux ouvrages, pour des raisons souvent très différentes. Les partisans se trouvent en majorité, à la fois chez les grands chefs ou les plus riches éleveurs et chez les plus démunis. Pour les premiers, cela permet de résoudre le problème de l'abreuvement d'innombrables troupeaux avec des effectifs de bergers en diminution (départ de la main-d'œuvre servile) ; de plus, le prestige de certains chefs leur permet parfois, en usant de leur influence, de monopoliser l'usage de certains ouvrages. Pour les plus pauvres, qui gardent eux-mêmes leurs troupeaux, la suppression de l'exhaure en saison sèche, constitue un gain d'effort et de temps inappréciable. Certains utilisateurs des stations, gênés par les encombrements, souhaitent la création de nouveaux ouvrages pour une meilleure répartition des usagers. Enfin, les réponses varient selon les régions et selon les potentialités (puits, puisards ou mares). L'enquête cependant montre clairement que ces ouvrages font déjà partie de l'organisation de l'espace et qu'il n'est plus possible de revenir en arrière.

Au cours de mes propres enquêtes, les raisons données par les adversaires provenaient souvent d'éleveurs d'un certain âge, ce qui leur donnait droit à la parole et leur permettait d'exprimer, au sujet des bergers, leurs regrets d'une conscience professionnelle perdue. Ils avaient vécu l'installation d'une station de pompage à côté du puits qu'ils exploitaient. Leurs objections (BERNUS, 1974) peuvent se regrouper en 2 catégories. Les premières concernent leurs parcours envahis : les concentrations excessives des hommes et des troupeaux provoquent la détérioration des pâturages environnants et l'obligation pour les campements de s'installer à distance des stations (jusqu'à 10 ou

15 km) : l'eau fournie à profusion se trouve de plus en plus loin des tentes. Le second faisceau d'objections porte sur «l'éthique du berger» ; les facilités offertes par ces stations incitent les bergers à relâcher leur surveillance, à ne pas rester toujours derrière leurs animaux pour les aider, dans les bousculades, à s'approcher des abreuvoirs ; enfin, conséquence de ce laisser-aller, les vols sont rendus plus aisés par ce désordre et par ces troupeaux à la cohésion perdue ; de station en station, les voleurs peuvent gagner, inaperçus dans la foule, les grands marchés du sud. Quant aux bergers eux-mêmes, ils se félicitent de cette innovation qui les libère de tâches écrasantes et leur permet, à l'occasion, de confier leur troupeau à un parent ou à un ami pour se rendre au marché ou pour visiter un campement éloigné.

Les réactions et les initiatives d'un groupe de Touareg, qui vivent à 90 km au sud-ouest d'In Gall, peuvent nous servir d'exemple. Quelques campements de ces Touareg Illabakan, nomadisant en saison sèche dans la vallée du Tadist, exploitaient un puits profond de 88 m (In Waggar), et des mares qui restaient parfois en eau jusqu'en décembre ou janvier. Jusque-là seuls usagers de ce puits, ils se virent rejoindre, après l'implantation d'une station de pompage, par des représentants de 5 «tribus» touareg et de 3 ou 4 «fractions» de Peul woDaaBe et farfarou*. En 1970, les Illabakan firent une démarche auprès des autorités pour demander la fermeture de la station ; celle-ci ne fut pas ouverte en 1971 et pendant un an, ils remirent en service le puits de 88 m et se retrouvèrent seuls maîtres des lieux comme neuf ans auparavant. La station fut ensuite constamment en fonction pendant la saison sèche, mais il ne se forma pas de centre actif autour d'elle, si ce n'est l'école qui accueillit de nombreux jeunes Illabakan ; en effet, la nouvelle route bitumée de l'uranium abandonna le tracé ancien qui passait par In Waggar.

Comme ils n'avaient pas réussi à mettre fin à l'exploitation du forage, les Illabakan creusèrent des puits aux alentours ; dès 1968, le fils du chef tenta, mais en vain, d'atteindre l'eau à 20 km au nord ; ce fut ensuite, au même endroit, un fonctionnaire allabaka qui fit appel à des spécialistes haoussa du sud, puis à des serviteurs de nomades arabes eddès voisins, pour atteindre la nappe à 54 m. Malgré le coût élevé de l'opération - prix forfaitaire ou prix fixé selon la profondeur (en unités de mesure d'un homme debout les bras levés) - des puits furent creusés à l'initiative des éleveurs eux-mêmes, les années suivantes, dans toutes les vallées environnantes. Ainsi, de nombreux campements retrouvèrent la maîtrise d'un espace grâce à ces initiatives qui n'ont cessé de se multiplier jusqu'à ce jour**. La présence d'une nappe continue et d'une roche suffisamment cohérente pour être forée par des techniques traditionnelles ont permis aux éleveurs de mettre en place un réseau de points d'eau qui complète celui qui existait déjà.

En 1972-73, si ces éleveurs n'abandonnèrent pas leurs parcours habituels, contrairement aux Peul voisins, en 1984 en revanche, ils se rendirent dans la région de Mayahi (département de Maradi) à 250 km au S-SE, dès qu'il apparut, à la fin de l'été, que les ressources fourragères étaient pratiquement inexistantes. Ils perdirent beaucoup d'animaux, mais moins d'un an après, avec l'aide de l'administration, tous étaient de retour dans la région d'In Waggar, avec des troupeaux fortement réduits. Au cours de ces 2 crises majeures, à dix ans de distance, ils eurent des stratégies opposées : la première expérience, le soutien du Préfet et les conseils de parents fonctionnaires dans le sud, eurent leur part, en 1984, dans leur rapide décision.

---

* Cinq «tribus» touareg (Tamazleleyt, Elwuliten, Isherifen, Tarkaz, Iberogan), des «fractions» peul woDaaBe (Bikorawa, Gojawa, Bingawa), et parfois farfarou.

** On trouvera une analyse de l'utilisation des stations de pompage *in* BERNUS (E.), 1991 : 142-148.

Aujourd'hui, les politiques d'hydraulique qui ont quadrillé l'espace servent de base à l'organisation d'une nouvelle gestion de la zone pastorale. Ces tentatives, cependant, qui partent d'une volonté de rationaliser l'exploitation des parcours, parviennent mal à se concrétiser et échappent à leurs promoteurs dès qu'un déficit pluviométrique s'accompagne d'une baisse générale des ressources fourragères, remettant en cause tous les schémas établis. Les efforts individuels de telle ou telle personnalité, qui tente de gérer ses propres troupeaux dans un même esprit, en pratiquant un nomadisme rationnel, aboutissent à de meilleurs résultats, dans la mesure où la conception, la mise en place et le suivi des opérations se concentrent dans les mains d'un seul maître d'œuvre, directement intéressé au succès. Ce n'est pas ici le lieu d'analyser les projets actuels d'élevage, mais nous pensons qu'il n'était pas inutile de porter un regard critique sur les politiques successives qui ont tenté de promouvoir l'élevage en zone aride sans toujours parvenir à préserver le milieu.

E. BERNUS : *géographe*, ORSTOM (MAA), 213 rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10

BIBLIOGRAPHIE

BARRAL (H.), 1982. - Le Ferlo des forages. Gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral. Dakar, DGRST/ORSTOM, 1982, Groupe de recherches interdisciplinaires sur les zones arides. Programme LAT, 85 p. *multigr.*

BENOIT (M.), 1984. - Le Séno-Mango ne doit pas mourir. Pastoralisme, vie sauvage et protection au Sahel. *Mém. ORSTOM*, Paris, n° 103, 143 p., 33 phot., 5 fig.

BERNUS (E.), 1974. - Les Illabakan (Niger), une tribu touarègue sahélienne et son aire de nomadisation. Paris, ORSTOM-Mouton ed., *Coll. Atlas des Structures agraires au sud du Sahara*, n° 10, photos, 11 fig., 14 cartes h.t., glossaire, 113 p.

BERNUS (E.), 1974. - Possibilités et limites de la politique d'hydraulique pastorale dans le sahel nigérien. *Cah. ORSTOM, sér. Sc. Hum.*, vol. XI, n° 2 : 119-126, Paris.

BERNUS (E.), 1982. - «Range-Management» traditionnel et planifié. Remarques à propos des éleveurs nigériens. Williamsburg, Virginia, USA, (Studies in third worlds societies n°17, Dept. of Anthropology) : 23-30. In Contemporary Nomadic and Pastoral Peoples : Africa and Latin America, 154 p.

BERNUS (E.), 1991. - Touaregs. Chronique de l'Azawak. Paris, Plume, 175 p.

BILLE (J.-C.), 1976. - Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n°65, 29 fig. 1 carte h.t., 82 p.

BOUDET (G.), 1975. - Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. Paris, IEMVT, min. de la Coop., 15 fig., 5 cartes, 8 planches, 21 tab., 254 p.

DUPIRE (M.), 1956. - Les forages dans l'économie peule. 8 pages dact. communiquées par l'auteur.

GRENIER (Ph.), 1987. - Les problèmes energétiques du Ferlo (Sahel sénégalais). *In* Énergie et Espace au Sénégal, Tome 1, Bordeaux, Ceget/CNRS, *Travaux et Documents de Géographie Tropicale*, n° 60, 171 p.

MARTY (A.), 1972. - Les problèmes d'abreuvement et le fonctionnement des stations de pompage vus par les éleveurs de Tchin-Tabaraden. Service de la promotion humaine. Commissariat général au développement. Présidence. 124 p. *multigr.* + annexes (73 p. questionnaires.)

MONOD (Th.), 1974. - Spectre des modes de dissémination dans l'Adrar mauritanien (Sahara occidental). Genève. *Candollea*, 29, 1974, 2 fig., 11 pl. : 401-425.

PAGOT (J.), 1985. - L'élevage en pays tropicaux. Paris, Éditions G-P. Maisonneuve et ACCT éd., «*Techniques agricoles et productions tropicales*», XXXIV, *sér. Élevage*, 526 p.

PEYRE DE FABRÈGUES (B.), 1971. - Évolution des pâturages sahéliens du Sud-Tamesna. Maisons-Alfort, IEMVT, Déc.1971. *Étude agrostologique* n° 32, 135 p.

PEYRE DE FABRÈGUES (B.) et LEBRUN (J.-P.), 1976. - Catalogue des plantes vasculaires du Niger. Maisons-Alfort, IEMVT, 6 planches (Étude botanique n° 3), 433 p. *ronéo.*

RECEVEUR (P.), 1960. - Hydraulique pastorale. Bases d'une politique de l'eau en zone sahélienne. Niamey, 8 sept. 1960. Politique de la mise en valeur de la zone sahélienne. Rapport annuel. 1959-60. Ministère de l'Économie rurale. Direction de l'élevage et des industries animales. Chap. I à IX : 129-150. Même texte que le précédent mais non signé.

RIPPSTEIN (G.) et PEYRE DE FABRÈGUES (B.), 1972. - Modernisation de la zone pastorale du Niger. Maisons-Alfort, IEMVT, Janv. 1972, *Étude agrostologique* n° 33, 306 p., 2 cartes dans encart séparé.

SERRES (H.), 1980. - Politiques d'Hydraulique Pastorale. Paris, PUF, «Techniques vivantes.» Développement en zone aride. Coll. publ. par ACCT. 118 p.

WISPELAERE (G. de), 1980. - Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais. Influence de la proximité d'un forage. *Cah. ORSTOM, sér. Sc. hum.*,vol. XVII, n °3-4 : 155-166. Paris.

Gérard MONCHALIN

Politiques de l'eau en Afrique soudano-sahélienne

INTRODUCTION

L 'eau, qui est à l'origine de la vie sur Terre, est un élément essentiel de la vie quotidienne et des activités humaines. Cette importance fondamentale de l'eau est d'autant plus ressentie que celle-ci est rare et irrégulièrement distribuée dans le temps et dans l'espace, comme c'est le cas dans les zones aride et semi-aride de l'Afrique soudano-sahélienne. Cette rareté confère un caractère prioritaire à l'ensemble des mesures qui permettent d'en organiser l'usage et que définissent les politiques de l'eau ; ceci est particulièrement vrai quand la survie même des populations dépend de cet usage pour la satisfaction de besoins alimentaires qui passent par la mise à disposition d'eau destinée aux cultures et au bétail. Les politiques de l'eau pour la maîtrise de la production agricole et de l'élevage en sont les instruments indispensables (*cf. infra*).

Une politique de l'eau s'articule autour de 3 grands ensembles de mesures concernant :

- les projets (lignes directrices de leur conception, actions prioritaires, ordres de grandeur des dépenses) ;
- les aspects financiers et économiques (principes de financement, répartition des coûts) ;
- les aspects institutionnels (répartition des tâches, organisation) et législatifs (droit de l'eau).

Parmi ces aspects, certains sont communs à l'ensemble des politiques de l'eau. Ce sont notamment :

- les instruments législatifs et réglementaires - les codes de l'eau et leurs textes d'application -, qui régissent notamment les conditions de prélèvement et de rejet des eaux. Dans quelques États seulement, il existe de tels codes dont les textes d'application ne sont parus que partiellement ; Dans quelques autres États, ils sont en préparation ;
- l'émergence d'un cadre institutionnel spécifique avec la création de ministères chargés des problèmes de l'eau et de comités nationaux de l'eau, responsables de la coordination entre les différents ministères qui interviennent dans ce secteur (celui des Finances, celui du Plan et les ministères utilisateurs).

Avant de développer les aspects particuliers de ces politiques prioritaires (*cf. infra*), il faut signaler que le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH) apporte une contribution importante à la définition de ces politiques de l'eau par ses appuis techniques aux États et par les études qu'il réalise ; parmi ces dernières, il faut citer les cartes de planification des ressources en eau souterraine de l'Afrique soudano-sahélienne, la constitution de banque de données et leur interconnexion.

POLITIQUES DE MAÎTRISE DE L'EAU POUR LA PRODUCTION AGRICOLE

Cadre général

Les éléments de telles politiques résultent des politiques agricoles, qui sont elles-mêmes l'expression des politiques socioéconomiques nationales.

Dans les zones arides et semi-arides, les objectifs fixés au développement agricole peuvent être illustrés, par exemple, par ceux adoptés au Cameroun :

- moderniser les campagnes et permettre aux populations rurales d'accéder à un niveau de vie qui décourage l'exode des éléments jeunes et dynamiques ;
- assurer l'autosuffisance alimentaire du pays et pourvoir à l'approvisionnement d'une population urbaine en rapide expansion ;
- développer les productions d'exportation, sources de devises ;
- promouvoir une large diversification des cultures et développer des spéculations qui correspondent à l'évolution de la demande ;
- promouvoir la création d'agro-industries qui permettent de créer des emplois et d'accroître la valeur ajoutée locale ;
- atténuer les conséquences des aléas climatiques, tout particulièrement les effets de la sécheresse qui affecte depuis plusieurs années le Nord du pays ;
- réduire les déséquilibres entre les différentes régions.

Pour la réalisation de ces objectifs, l'accroissement démographique prévu d'ici l'an 2000 en Afrique soudano-sahélienne exige une augmentation importante de la production agricole, amplifiée par le désir de développer les cultures de rente, sources de devises. Par ailleurs, la croissance beaucoup plus rapide des villes entraînera une modification des habitudes alimentaires et donc un changement dans la nature et dans la répartition des productions agricoles. Les ruraux, dont le nombre sera en quasi-stagnation devront nourrir beaucoup plus d'urbains : la production agricole par rural devra croître dans les mêmes proportions, d'où la nécessité de moderniser les campagnes exprimée par le premier objectif. Enfin la réduction des disparités régionales se traduira par des efforts pour les régions les plus défavorisées, c'est-à-dire les plus arides.

Ainsi, cet ensemble cohérent d'objectifs a pour conséquence une série d'obligations : accroissement de la production agricole globale, modification de sa structure, augmentation de la productivité par actif agricole, effort particulier en faveur des zones les plus arides, mise à la disposition des populations rurales de services de santé. Pour satisfaire ces obligations, la maîtrise de l'eau apparaît immédiatement comme un facteur essentiel, d'où l'importance attachée à la mise en œuvre de politiques de l'eau dans les États.

Ces axes de développement concernent en priorité la production agricole, mais aussi l'hydraulique pastorale qui sera traitée ensuite.

Méthodes de maîtrise de l'eau pour la production agricole

Tout d'abord, il faut signaler qu'en zones arides et semi-arides, la satisfaction des objectifs formulés par la seule extension des surfaces en cultures pluviales n'est pas possible, du fait des limitations en sols utilisables.

Il est indispensable d'envisager une intensification systématique de la production agricole, qui n'est pas réalisable sans une amélioration de l'alimentation en eau des cultures, en synergie avec les actions sur les autres facteurs.

Ces méthodes de maîtrise de l'eau, considérées dans un sens croissant de complexité et de coût des techniques de mobilisation de la ressource sont :

- l'intensification des cultures pluviales qui, notamment, utilisent de façon optimale les apports pluviométriques en calant les cycles culturaux sur les avertissements des stations agrométéorologiques ;
- l'accroissement de la quantité d'eau mise à disposition des cultures pluviales par l'emploi de techniques culturales qui favorisent l'infiltration et la rétention d'eau dans les sols, et qui augmentent ainsi la réserve disponible pour les plantes dans le cadre d'une intensification globale ;
- la conservation des eaux et des sols par la création de systèmes de collecte des eaux de ruissellement au niveau de la parcelle ;
- l'aménagement des bas-fonds et des talwegs, qui permet, à l'échelle d'un petit bassin, à la fois le stockage temporaire des écoulements superficiels et la lutte contre l'érosion suivant les axes d'écoulement ;
- l'épandage contrôlé des crues avec digues de protection, ouvrages de prise et de dérivation, canaux d'amenée, répartition et distribution plus ou moins élaborée sur le périmètre ;
- l'irrigation qui consiste à amener l'eau à un endroit donné, à un moment donné et en quantité donnée.

En Afrique soudano-sahélienne, toutes ces méthodes doivent être prises en considération dans la mise en œuvre des politiques de l'eau pour l'accroissement de la production agricole. En effet, la mise en œuvre des techniques les plus économiques, qui sont le plus souvent les mieux adaptées au contexte humain et social, permet de limiter les investissements des États et de ne recourir à l'irrigation que pour la partie des besoins qui ne peut être couverte par les autres méthodes. Ceci a pour effet de surmonter la contradiction qui apparaît souvent dans les études de planification entre :

- d'une part, l'importante augmentation du rythme annuel d'équipements d'irrigation nécessaires si l'on veut atteindre les objectifs par cette seule méthode ;
- d'autre part, les moyens financiers qu'on peut espérer mobiliser pour la réalisation de ces équipements.

Politiques d'intensification des cultures pluviales

Des objectifs de développement des cultures très ambitieux avaient été formulés, avant les années quatre-vingt, qui devaient permettre de doubler quasiment la production des cultures de base à la fin du siècle et de rendre les cultures pluviales moins sensibles à la sécheresse. Les principales stratégies proposées étaient les suivantes :

- la mise en culture des terres neuves ;
- l'intensification de la production des zones déjà cultivées, en accroissant simultanément la productivité du paysan et en recherchant un nouvel équilibre de l'écosystème ;
- la recherche et la diffusion de variétés végétales à cycle court, susceptibles de parvenir à maturité même lors d'une saison des pluies écourtée.

La mise en culture des terres neuves devait atténuer la pression sur les zones surexploitées et fournir une partie considérable de la production céréalière de l'an 2000. La migration vers les terres neuves devait être supervisée par les pouvoirs publics pour éviter une mauvaise gestion des ressources nouvellement accessibles.

Cette action devait s'inscrire dans un programme de développement rural intégré qui bénéficiait aussi bien aux nouveaux qu'aux anciens agriculteurs. Des mesures devaient être prises pour développer les zones de départ.

Actuellement, des exemples montrent que la mise en culture à grande échelle des terres neuves demande d'importants investissements en capital et conduit, si elle est mal contrôlée, à une destruction sans précédent de l'environnement (Sud-Ouest du Burkina Faso, Est du Sénégal). Les effets d'une migration à grande échelle sur les zones de départ n'ont pas été évalués. La baisse de pression sur l'environnement s'accompagne en revanche d'une absence d'incitation à intensifier et d'une diminution de la capacité de réhabilitation de l'environnement local (REIJ, 1989).

De ce fait, cette mesure n'est plus mentionnée dans la proposition d'une stratégie de lutte régionale contre la désertification (CILSS , 1989). D'autres organismes donateurs, comme la Banque mondiale, continuent cependant à en souligner l'importance.

L'intensification de la production pouvait être obtenue :

- en améliorant la productivité (calage optimal des cycles suivant les prévisions pluviométriques, techniques culturales qui favorisent la rétention de l'eau, variétés améliorées à cycle court, fertilisation, etc.) ;
- en organisant et en équipant les unités de production (traction animale et association agriculture-élevage) ;
- en facilitant la fourniture des facteurs de production, la commercialisation et le crédit ;
- en créant des organisations de producteurs.

Les hypothèses d'accroissement de la productivité étaient de 1 à 4 % pour les terres et de 1 % pour la main-d'œuvre. Or, la productivité des terres et des agriculteurs a stagné à un bas niveau et les importations de céréales ont augmenté constamment pour combler l'écart entre la production et la demande (REIJ, 1989). Pour sortir de cette impasse, il a été préconisé de mieux appréhender les besoins et les aspirations de la population rurale ainsi que de mettre en œuvre un ensemble de mesures cohérentes d'accompagnement (fourniture de moyens de production, accès au crédit, vulgarisation technique, formation des paysans, etc.).

Mais ce n'est qu'en 1984 que se trouve énoncé explicitement comme première démarche la conservation de l'eau du sol pour stabiliser et augmenter les rendements.

La recherche et la diffusion de variétés céréalières à cycle court n'a toujours pas fait l'objet de progrès significatifs. Des actions de recherche fondamentale et de développement sont nécessaires.

En résumé, les politiques d'extension et d'intensification des cultures pluviales n'ont pas connu le succès escompté. Des actions de recherche-développement seraient à promouvoir pour favoriser la mise en œuvre de ces politiques.

Politiques de conservation des eaux et des sols

Une politique de conservation des eaux et des sols doit permettre à la fois d'augmenter les rendements, par le ralentissement et le stockage temporaire du ruissellement superficiel, et de maintenir et même d'accroître les surfaces mises en culture par son action de lutte contre l'érosion ; elle vise ainsi à un double impact sur l'accroissement de la production.

Une importante étude sur la collecte des eaux de ruissellement en Afrique au sud du Sahara a été menée, dans le but d'assister les gouvernements subsahariens dans la conception de programmes nationaux. Les éléments principaux comprennent notamment :

- la préparation de directives techniques pour la réalisation de systèmes de collecte des eaux de ruissellement ;
- des propositions pour des programmes nationaux de formation ;

- le développement de stratégies pour l'expansion des activités dans ce domaine de collecte des eaux de ruissellement ;
- la préparation de propositions d'investissements.

Cette étude, achevée fin 1989, apporte donc une importante contribution à la définition de politiques de conservation des eaux et des sols (CIEH, 1990-1991).

De fait, depuis plus de deux décennies, d'importants programmes de travaux, de même nature que ceux proposés dans l'étude précitée, ont été mis en œuvre, notamment au Burkina Faso, au Cap-Vert, au Niger. Une évolution des techniques mises en œuvre a été constatée dans le sens :

- d'un allégement des ouvrages en passant des murets et des terrasses aux diguettes, puis aux cordons pierreux, ce qui se traduit par une diminution progressive des travaux motorisés pour aboutir à des travaux exécutés pour la plus grande partie à la main ;
- d'une participation croissante des paysans qui, dans les projets «lourds», décidés en dehors de leur communauté n'intervenaient que comme main-d'œuvre non qualifiée ; dans les projets plus récents, en général, après une phase de sensibilisation, ils prennent entièrement en charge l'exécution des travaux sous forme de groupements villageois appuyés par l'encadrement technique nécessaire.

Dans le cadre des programmes spéciaux à haute intensité de main-d'œuvre financés par le Bureau international du travail (BIT), cette prise en charge de l'exécution des travaux par les villageois présente les caractéristiques suivantes :

- l'emploi de techniques simples, facilement assimilables et appropriées au milieu ;
- l'utilisation de main-d'œuvre locale et de moyens locaux maintient dans l'économie locale une part importante des sommes distribuées par le projet ; mais des effets négatifs peuvent être engendrés sur le marché du travail ou sur la production agricole, en cas de distribution de vivres du Programme alimentaire mondial (Pam) ;
- le choix des projets après une large concertation avec les futurs bénéficiaires en fonction de leurs priorités et de leurs capacités réelles d'assurer la gestion et l'entretien des ouvrages ;
- l'obligation d'exécuter les travaux en dehors de la saison culturale pour éviter la concurrence entre les travaux agricoles et les travaux du chantier ;
- l'accès possible de tous aux travaux rémunérés, même aux femmes malgré, parfois, l'obstacle des traditions locales.

Toutefois, il faut signaler que le principe de rémunération des paysans pour des travaux qui leur sont destinés est contesté dans certaines politiques nationales. En effet, ce principe est perçu comme en contradiction avec celui qui considère comme condition nécessaire de réussite d'un aménagement l'implication dès le départ des paysans, manifestée par une participation effective à l'investissement, qui se présente en général sous forme d'une fourniture gratuite de prestations de main-d'oeuvre.

À titre d'exemple d'évolution des politiques en matière de conservation des eaux et des sols, on peut citer 2 programmes du Burkina Faso, où :

- entre 1962 et 1965, 120 000 ha de travaux antiérosifs, qui prenaient en compte non seulement l'aménagement des terres cultivées mais également celui de bassins versants entiers, ont été exécutés de novembre 1962 à décembre 1965 dans le Yatenga. Le bilan actuel est négatif sous certains aspects ; les aménagements se sont dégradés par manque d'entretien de la part de la population qui n'avait pas été sensibilisée au début de l'opération ;
- entre 1972 et 1983, le Fonds de développement rural (FDR) a aménagé 30 000 ha avec 900 groupements villageois en des blocs variant de 20 à 50 ha. Les projets ont fait l'objet d'une sensibilisation préalable des paysans. Les travaux motorisés ont été limités à l'ameublissement des emprises des diguettes ; les diguettes étaient entièrement réalisées à la main par les paysans. En 1984, des dégradations n'étaient constatées que sur

10 % de la surface aménagée environ (OUEDRAOGO et CAPO-CHICHI, 1984). Même si ce taux s'est accru depuis, les résultats sont encourageants, surtout compte tenu des difficultés d'entretien des diguettes en terre par rapport aux cordons pierreux. Les enquêtes sur des parcelles en céréales ont montré des accroissements de rendements en mil et en sorgho qui varient de 30 à 50 % en moyenne.

Des recherches sont en cours :

- dans le Yatenga, au Burkina Faso, par l'ORSTOM, pour analyser scientifiquement l'effet de cordons pierreux cloisonnés sur des champs de mil surmontés d'impluvium. L'accroissement de l'infiltration est d'environ 30 %. En année normale, l'accroissement du rendement en grain sec par rapport au témoin est de 20 % en haut de parcelle et de 40 % en bas de parcelle ;
- à Kaya, au Burkina Faso, par le CIEH en collaboration avec un projet bilatéral néerlandais, sur 2 bassins versants de 43 ha, le premier à titre de témoin, le second aménagé par les paysans avec digue d'épandage, traitement de ravines et construction de cordons pierreux.

Les objectifs de ces recherches sont :

- une meilleure connaissance du fonctionnement et des effets physiques des mesures antiérosives ;
- le développement d'une méthodologie de plans d'aménagements intégrés pour les petits bassins versants ;
- l'étude des aspects organisationnels de la construction et de la maintenance des ouvrages.

En résumé, les politiques de conservations des eaux et des sols :

- se sont déjà traduites par d'importantes réalisations sur le terrain dans certains États ;
- ont évolué, de réalisations à forte intervention motorisée et très consommatrices en capital, vers des réalisations à base de main-d'œuvre locale et de moyens locaux économes en capital ;
- ont pris en compte une participation de plus en plus étroite des paysans jusqu'à la prise en charge totale des réalisations par les communautés villageoises avec un simple encadrement technique ;
- font l'objet d'une importante étude pour le développement de programmes nationaux ainsi que de recherches pour mieux connaître leur fonctionnement et mieux définir les méthodes de réalisation ;
- permettent d'espérer dans la zone soudano-sahélienne, sur la base d'aménagements correctement exécutés, un accroissement du tiers à la moitié de la production agricole ;
- peuvent donc constituer un moyen significatif de contribution à la satisfaction des objectifs de développement agricoles énumérés en introduction.

Politiques d'aménagement des bas-fonds et des talwegs

Les cultures de bas-fonds se sont naturellement développées depuis le nord du Sahel jusqu'aux zones forestières de la Guinée, ceci du fait de l'accroissement des contraintes sur l'agriculture pluviale (sécheresse dans le Nord, érosion et manque de terres arables sous les climats plus humides). Ces bas-fonds sont les fonds plats ou concaves des parties amont des réseaux de drainage. La taille du bassin versant varie de 10 à 200 km² ; leur fonctionnement hydrologique a été précisé par ALBERGEL et CLAUDE (1988). Le développement des ressources des bas-fonds nécessite la conception d'ouvrages qui assurent le stockage, la distribution de l'eau aux cultures et la protection contre les crues.

La définition de ces éléments d'une politique d'aménagement des bas-fonds fait actuellement l'objet d'un programme de recherches, qui associe le CIEH, coordonnateur, l'ORSTOM, le Cirad, l'Institut national pour l'étude et la recherche agronomique (Inera), au Burkina, l'Institut d'économie rurale (IER), au Mali, et l'Institut sénégalais de recherches agricoles (Isra), au Sénégal, ceci dans le cadre du Réseau de recherches sur la résistance à la sécheresse au Sahel (R3S).

- la détermination des possibilités et des solutions techniques d'aménagement par rapport à une typologie des bas-fonds ;
- l'évaluation de la viabilité des aménagements par rapport à l'organisation des paysans et à leurs systèmes de production.

Ces travaux de recherche sont conduits au Burkina Faso dans la zone de la Comoé, au sud du Mali et au Sénégal dans le Siné Saloum ; l'extension du nombre de projets sur le terrain est envisagée. Commencé en 1988, la durée totale de ce programme est de quatre ans. Ses conclusions devraient permettre de dégager les éléments cohérents d'une politique d'aménagement des bas-fonds.

Une technique d'aménagement par digues filtrantes s'est développée depuis 1980 dans la région de Rissiam au Burkina Faso sous l'égide de l'Association française des volontaires du progrès (AFVP). Ce sont des digues constituées uniquement de pierres ou de blocs de latérite et construites en succession perpendiculairement à un talweg. Leur objectif est de ralentir les eaux de ruissellement par filtration à travers les digues, ce qui entraîne la formation de retenues d'eau de grandes surfaces et des dépôts d'alluvions et de matières organiques à l'amont des ouvrages tout en stoppant et comblant l'érosion en ravines. Du fait de l'efficacité quasi immédiate de ces digues et de la bonne acceptation de leur construction collective par l'organisation villageoise, 103 ouvrages étaient déjà édifiés, au début de 1987, et les 13 villages de la région de Rissiam demandaient l'exécution d'un programme supplémentaire de 400 digues en deux ans qui correspondait à 400 ha de cultures.

Avant de développer cette technique à grande échelle, le CIEH et l'AFVP ont entrepris une étude sur les conditions de fonctionnement de ces ouvrages et sur leurs caractéristiques socio-économiques (évolution des rendements, responsabilité de l'entretien, participation de tous les villageois aux bénéfices des travaux). La publication de synthèse des résultats, débutée en 1990 sera achevée en 1991. On peut déjà indiquer que les rendements, en moyenne, sont multipliés par un facteur compris entre 2 et 3. Cette technique pourrait donc aussi apporter une contribution significative à la satisfaction des objectifs de développement de la production agricole.

En résumé, les politiques d'aménagement de bas-fonds :

- demandent à être précisées quant à leur contenu technique, c'est le but de la recherche coordonnée par le CIEH au Burkina Faso, au Mali et au Sénégal ;
- peuvent constituer un moyen d'accroissement de la production agricole en étendant les aménagements grâce à la diffusion des techniques éprouvées.

Ces politiques doivent de plus être menées dans de bonnes conditions économiques compte tenu de coûts d'investissement modérés et avec le souci d'une association possible avec des travaux de conservation des eaux et des sols sur les versants, en conduisant ainsi à des aménagements villageois intégrés.

Politiques d'irrigation

L'importance du développement des cultures irriguées

Les politiques dans le domaine du développement rural dans les états sahéliens du CILSS sont caractérisées par la prépondérance donnée à 4 objectifs (1989) :

- la diversification des cultures ;
- l'amélioration des systèmes de production ;
- le développement des cultures irriguées ;
- la constitution de stocks pour la sécurité alimentaire, ceci dans le but d'atteindre l'autosuffisance alimentaire.

Comme l'irrigation est également un moyen privilégié de diversification, ceci montre l'importance des politiques d'irrigation dans les pays sahéliens.

Une forte extension des surfaces effectivement irriguées devrait être la conséquence de ces politiques. Partant des 230 000 ha irrigués en 1976, 600 000 ha supplémentaires (dont 100 000 ha de casiers rizicoles en submersion) étaient envisagés pour l'an 2000 en plus des projets fondés sur la réhabilitation et sur une meilleure exploitation des périmètres existants. Or, ceci ne paraît pas compatible avec les rythmes constatés, qui sont en moyenne trop lents ces dernières années : de l'ordre de 500 à 1 000 $ha.an^{-1}$, alors qu'ils devraient être plusieurs fois supérieurs.

Les mesures nécessaires à un accroissement significatif de ces rythmes devraient logiquement se traduire dans les politiques d'irrigation.

CONSÉQUENCE DE LA RECHERCHE DE L'AUTOSUFFISANCE ALIMENTAIRE

Le développement des cultures irriguées concernera donc en priorité celles destinées à l'alimentation et notamment les céréales qui sont la nourriture de base des populations rurales : toutefois, certaines céréales à coût de production élevé (riz, blé) sont dépendantes de la demande des marchés urbains et doivent être protégées par une limitation des importations.

Les produits alimentaires de haut rapport, mais aussi à coûts de production élevés, tels que les fruits et légumes ne peuvent se développer que s'il existe à proximité des marchés solvables et dans la limite de leurs capacités d'écoulement.

Compte tenu de cet objectif d'autosuffisance, d'une part, et des cours mondiaux très défavorables, d'autre part, les cultures d'exportation, à l'origine du développement de l'irrigation en Afrique, ne devraient occuper qu'une place très limitée dans l'extension des surfaces mises à l'irrigation. Ces cultures ne peuvent se justifier qu'en cas de débouchés suffisants à des prix rémunérateurs, compte tenu de coûts de production élevés qu'il faut tenter de stabiliser ou de réduire.

PROBLÈMES DU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE IRRIGUÉE

Les rythmes annuels de mise à l'irrigation de nouvelles surfaces sont beaucoup trop lents pour atteindre le but recherché (*cf. supra*), alors que les ressources en eau et en sol existent. De plus, quand de nouvelles surfaces sont aménagées chaque année, d'autres, déjà équipées, sont abandonnées ou sous-exploitées. Ceci se traduit par une croissance de la production inférieure à celle du rythme d'équipement, c'est-à-dire très faible quand ce n'est pas une quasi-stagnation. Il est indispensable de remédier à ces problèmes pour mettre en œuvre des politiques efficaces d'irrigation. Pour cela, il faut d'abord en analyser les causes qui sont de divers ordres.

Les problèmes d'ordre sociologique

Ce sont :

- la prise de décision en dehors de la participation paysanne et en dehors de la logique des exploitants agricoles, que ce soit pour la conception de l'aménagement, le

choix des cultures, le mode de gestion ; c'est un facteur majeur des carences constatées dans la maintenance ;

- des techniques de culture et des parcellaires inadaptés aux systèmes de production et à la main d'œuvre disponible (problème de concurrence avec les cultures pluviales) ;
- la méconnaissance des habitudes alimentaires (préférence du mil au riz par exemple), des obligations créées par les coutumes et la religion (jours non travaillés, interdits de certaines pratiques) ;
- le non-respect du droit foncier coutumier en appliquant les législations foncières modernes ; une attribution égalitaire entraîne des conflits latents entre propriétaires et attributaires ; elle peut provoquer une redistribution occulte du parcellaire selon les forces ethniques ou sociales ;
- la superposition de structures collectives de type coopératif aux structures sociales traditionnelles ;
- la nécessité d'apprendre des méthodes de travail et d'organisation entièrement nouvelles (difficultés de mise en place d'un tour d'eau).

Les problèmes d'ordre économique

Ce sont :

- les coûts d'investissement souvent trop élevés pour permettre une participation des utilisateurs à leur prise en charge et donc une réelle appropriation des équipements ;
- les coûts de fonctionnement (notamment en cas de pompage), de réparations et de renouvellement des équipements, élevés, auxquels une intensification insuffisante des productions irriguées ne permet pas de faire face, ce qui se traduit par des difficultés de gestion et de maintenance ;
- les carences d'approvisionnement en intrants (énergie, engrais, etc.) ;
- l'absence de politique des prix avec une garantie d'achat et donc du niveau des revenus pour permettre de couvrir les charges d'exploitation, dont le coût de l'irrigation ;
- l'absence d'organisations nationale et locale de circuits de commercialisation. À cela s'ajoute que l'écoulement des productions se trouve soumis aux fluctuations dues au taux de réussite des cultures pluviales (concurrence riz-mil par exemple) et aux disparités éventuelles de prix en régions frontalières ;
- l'absence de systèmes de crédits qui permettent de financer les systèmes de cultures, ce qui est un obstacle à l'intensification car le crédit traditionnel est à taux excessifs.

Les problèmes d'ordre technique

Ce sont :

- la conception et/ou la réalisation défectueuses des aménagements qui les rendent impropres à une irrigation bien conduite, ou encore qui entraînent une réduction des surfaces aménagées, ce qui conduit à un accroissement des coûts ;
- l'imprécision de l'estimation des contraintes et des coûts d'entretien et de maintenance dans les projets ; la sous-estimation des coûts d'investissement ;
- l'absence de voies de communication de viabilité permanente entre périmètres et zones d'approvisionnement et d'échanges ;
- l'insuffisance de moyens institutionnels pour développer la recherche, diriger et contrôler les études et les travaux d'aménagement ainsi que pour encadrer les paysans dans la mise en valeur.

Nous examinerons maintenant les différentes mesures expérimentées ou proposées pour remédier à ces difficultés.

LA PARTICIPATION DES POPULATIONS

C'est l'un des 3 axes sur lesquels s'appuie le développement rural dans les États membres du CILSS. Les difficultés d'ordre sociologique étant considérées comme un obstacle majeur à la réalisation de périmètres irrigués productifs, rendre effectives l'implication et la responsabilisation des populations est un facteur essentiel de réussite des politiques d'irrigation. Plusieurs mécanismes peuvent contribuer à une telle réussite.

La modification des méthodes de planification

Il s'agit de tenir davantage compte des ménages agricoles considérés comme les futurs bénéficiaires des projets. Pour qu'ils puissent adhérer à l'irrigation et en tirer tout le profit possible, il faut comprendre leurs besoins et leurs aspirations. La planification doit donc concilier les besoins locaux (approche du bas vers le haut) et les objectifs nationaux (approche du haut vers le bas). Ainsi, au Niger a été mise en place une politique de «consultation-concertation-décision», dont les structures de la base au sommet comprennent :

- les conseils de développement villageois ;
- les conseils sous-régionaux (d'arrondissements) ;
- les conseils régionaux (de départements) ;
- le conseil national de la Société nationale de développement agricole.

À chaque échelon territorial, les conseils rencontrent les niveaux correspondants des services de l'État (Génie rural, Onaha). Les échanges réciproques des villages vers la Société nationale de développement agricole et de celle-ci vers les villages permettent une planification concertée conforme aux besoins du monde rural.

L'émergence d'organisations paysannes et professionnelles responsables et autonomes

On dénombre actuellement 15 000 groupements de toutes origines dans les États sahéliens. Le champ d'action de ces groupements va de l'aspect économique à l'aspect social et englobe des projets de tous genres. Toutefois, la participation est beaucoup plus motivée pour des projets qui font face aux préoccupations des paysans tels que l'irrigation, l'aménagement des bas-fonds ou la conservation des eaux et des sols. Ces organisations doivent prendre en charge, au niveau local, la gestion agronomique ainsi que l'exploitation et l'entretien des périmètres et, au niveau régional, ou départemental, l'appui aux organisations de base en concertation avec les services de l'État.

Le désengagement des États

Dans le cadre des grands projets, les sociétés de caractère parapublic prenaient en charge toutes les fonctions (conception, réalisation, gestion des périmètres, mise en valeur agricole, commercialisation), ce qui conduisait à des charges de structures et d'encadrement très lourdes, supportées en partie par les États. Désormais, les nouvelles politiques agricoles visent à un désengagement progressif de ces sociétés d'aménagement dans le processus de production agricole et à une responsabilisation croissante des paysans, ce qui conduit à un appui décentralisé d'encadrement et de conseil aux organisations paysannes autonomes.

La prise en compte des contraintes sociologiques dans le cadre des projets

L'intervention dès le départ des sociologues en collaboration avec les spécialistes des disciplines plus classiques (hydraulique, pédologie, agronomie, etc.) est un fait relativement nouveau qui est déterminant pour l'adhésion des paysans à ces projets.

L'étude sociologique permet d'analyser les transformations provoquées par l'introduction de techniques d'irrigation exogènes et les problèmes sociaux et organisationnels liés à l'introduction et au soutien de l'agriculture irriguée. La conception du projet peut ainsi être orientée de façon à le rendre compatible avec les contraintes sociologiques et à obtenir l'adhésion des paysans.

La promotion des groupes faibles

L'accès des femmes et des jeunes à l'irrigation permet d'accroître le degré de participation paysanne aux aménagements. La constitution de groupements féminins est un moyen d'accès des femmes à la terre et leur procure des revenus collectifs ou individuels si la surface le permet. Les femmes qui possèdent des parcelles individuelles dans le périmètre peuvent aussi faire partie du groupement en y apportant leur expérience. C'est le cas dans un projet en cours au Burkina Faso où le nombre de groupements féminins est passé en un an de 12 à 40. Les installations mixtes (hommes pour les travaux de force, femmes pour les petits travaux suivant la tradition) ainsi que les installations de jeunes (éléments dynamiques) sont aussi à encourager.

L'appui aux initiatives locales

Le développement spontané de l'irrigation à partir de petites unités de production familiales ou de groupements d'intérêt économique, comme au Sénégal, est susceptible d'avoir un impact important sur les productions nationales, car il pourrait concerner des surfaces importantes par effet cumulatif.

La conception des aménagements

Grands périmètres et petits périmètres

Taille et mode de gestion sont souvent confondus dans ce classement, «grand» étant synonyme de gestion centralisée et «petit» de gestion locale ; en fait, une gestion décentralisée peut être mise en œuvre sur un grand périmètre. Ainsi la Société d'aménagement et d'exploitation des terres du delta du fleuve Sénégal (Saed), dans la vallée du Sénégal, expérimente une grappe de périmètres (dits périmètres intermédiaires) gérés chacun par les habitants d'un même village, en vue de combiner les économies d'échelle des grands périmètres et les acquis de l'irrigation villageoise. En fait, il apparaît que les problèmes de gestion d'un périmètre ne sont pas une conséquence de sa taille, mais qu'ils sont liés au degré d'insertion des composantes locales dans sa conception (Diemer *et al.*, 1987).

De même, un petit périmètre irrigué villageois (PIV) ne sera pas forcément un succès, bien que la formule connaisse une réussite relative ; ainsi une analyse de PIV aménagés dans la vallée du Sénégal a montré que (Réseau recherche-développement, 1988/1989) :

- le facteur eau était le premier facteur limitant de la productivité rizicole des PIV (seulement 60 à 90 % des besoins en eau sont satisfaits), ceci du fait de la flexibilité du tour d'eau et de la mauvaise estimation des besoins réels en eau ;
- les rendements étaient médiocres sur certains PIV ; dans ce cas, la qualité défectueuse du réseau hydraulique et les pannes des groupes motopompes expliquaient 80 % de ces rendements médiocres et masquaient les effets des engrais sur la productivité ;
- le phénomène migratoire affecte 60 à 80 % des exploitations impliquées dans les PIV alors qu'un objectif de l'irrigation est de le limiter.

En résumé, dans la mise en œuvre d'une politique d'irrigation, ce n'est pas tant la taille des périmètres que l'implication des populations, la qualité technique des aménagements et un environnement économique favorable qui seront un gage de réussite.

La conception intégrée des aménagements

Le terroir villageois est traité dans son ensemble et l'intégration se fait à 3 niveaux :

- celui de l'unité de production agricole ; l'irrigation est conçue en prenant en compte le système de production, qui comprend l'ensemble des travaux qu'une unité effectue pour subvenir à ses besoins ;
- celui du terroir agricole ; les terres de la communauté en cultures pluviales sont aménagées dans le sens d'une intensification (par exemple travaux de conservation des eaux et des sols) en même temps qu'est réalisé le périmètre d'irrigation. Un tel projet global de mise en valeur du terroir permet d'ailleurs de concilier le droit foncier coutumier et la législation foncière moderne en donnant la possibilité de compensations discutées avec l'ensemble de la communauté villageoise ;
- celui de l'ensemble des besoins ressentis par les villageois tels que l'alimentation en eau potable, l'assainissement, les équipements sociaux, etc.

La réalisation de périmètres de recherche-développement

Ces périmètres sont indispensables pour bien connaître le milieu et mettre au point le modèle d'aménagement adapté à ce milieu (conception de l'aménagement, mode de gestion, type d'exploitation, plan cultural, variétés, fertilisants, techniques culturales, etc.). De tels périmètres permettent d'éviter ces échecs que ce soit :

- dans le lancement d'un programme de PIV ;
- dans l'aménagement de grands périmètres ;
- dans le transfert des responsabilités des sociétés d'aménagement aux organisations paysannes sur les grands périmètres déjà aménagés.

De telles actions de recherche-développement sont prévues dans le programme que l'IIMI a élaboré en collaboration avec le CIEH.

La réhabilitation et l'amélioration des performances des périmètres existants

Une priorité est souvent donnée à cette action dans la conception des programmes. En effet, quand on considère toutes les difficultés rencontrées sur les périmètres irrigués (*cf. supra*), il paraît opportun de consacrer les faibles moyens techniques et financiers disponibles à ces réhabilitation et amélioration des performances, d'autant plus que les périmètres existants offrent des conditions favorables :

- les sites les plus commodes et les plus faciles à équiper ont normalement été mis en valeur en priorité ;
- les agriculteurs sont déjà familiarisés avec les techniques d'irrigation et avec l'organisation sociale qui en découle ;
- l'infrastructure nécessaire existe déjà.

Une telle priorité a été retenue par le Niger dans le but de généraliser au niveau du pays le modèle d'autogestion paysanne, basé sur le système coopératif avec l'appui technique des organismes d'État responsables du développement. Toutefois, il est essentiel que cette réhabilitation soit avant tout fondée sur l'implantation de méthodes efficaces de gestion et de maintenance : une simple reconstruction d'ouvrages dégradés ne résoudrait rien.

LES MESURES DE POLITIQUE ÉCONOMIQUE

La politique des prix

La promotion des cultures irriguées en milieu paysan exige une garantie d'achat des productions et la fixation de prix planchers qui permettent de couvrir à la fois les frais

de production (coût de l'eau inclus) et une rémunération minimale du travail fourni. Or, dans le contexte actuel des prix pratiqués sur le marché mondial pour les produits agricoles, les prix de revient des cultures irriguées en production intensive au Sahel seront certainement supérieurs au cours mondial actuel. La fixation de prix planchers doit donc être accompagnée de mesures de protection contre les importations, telles que la perception d'une taxe douanière et la limitation des quantités.

Mais les populations urbaines à faible revenu n'ont pas la capacité d'acheter aux prix réels de production locale. Si le prix de vente est fixé par l'État en fonction de ce niveau, le coût du soutien de la production est transféré à ces populations, ce qui risque d'être socialement insupportable. Sinon, une subvention de l'État est nécessaire pour que le prix de vente puisse être fixé à un niveau compatible avec les revenus locaux. La capacité financière des États à une telle pratique, ainsi d'ailleurs qu'à l'abandon de taxes à l'importation s'est considérablement réduite ces dernières années : le désengagement de l'État est économiquement nécessaire, mais il ne peut être que raisonné et progressif.

Dans ce dessein, il est indispensable de connaître avec précision les différentes composantes des prix de revient des productions locales, dont un élément important est la décomposition théorique de ce prix entre part payée en devises et part payée en monnaie locale. Un tel diagnostic de la situation est envisagé pour le riz dans une étude lancée par le CILSS, qui devrait aboutir à une harmonisation des politiques rizicoles nationales.

Enfin, le système des prix doit être cohérent : des soutiens financiers aux cultures irriguées ne doivent pas créer une situation de rente par rapport aux cultures vivrières pluviales sous peine de déséquilibres économiques et sociaux ; la fixation à un niveau élevé de prix planchers des céréales irriguées ne doit pas décourager les productions irriguées d'exportation qui sont placées dans une situation de concurrence internationale.

En résumé, la fixation d'un système transparent et cohérent de prix rémunérateurs est une nécessité pour le développement de l'irrigation ; c'est une mesure fondamentale qui doit faire l'objet d'une concertation régionale et qui a fait l'objet d'une recommandation du 14e Conseil des ministres du CIEH en février 1988.

La mise en place de circuits de commercialisation

L'écoulement de la production des céréales irriguées dépend à la fois :

- de la revente locale, donc du degré de réussite des cultures pluviales traditionnelles (concurrence mil-riz par exemple) ;
- des quantités nécessaires pour l'approvisionnement des populations urbaines. Pour les fruits et légumes, la production est essentiellement absorbée par les centres urbains.

L'organisation de circuits de commercialisation locaux et nationaux est donc une mesure indispensable au développement de l'irrigation. Elle doit prendre en compte non seulement l'écoulement de la production, mais aussi l'approvisionnement en intrants. Elle doit concerner à la fois la création des structures nécessaires et la mise en place des moyens (transports, voies de communication notamment). Elle conditionne en particulier la réussite des cultures maraîchères, dont l'intérêt est primordial pour la rentabilité de l'irrigation, qui ne peut être assurée, en général, qu'avec une double culture annuelle. Les circuits locaux doivent s'appuyer sur la structure commerciale coutumière.

La mise en place d'un système de crédits

Il a été indiqué plus haut que le système de crédit traditionnel, informel et très souple, pratique des taux d'intérêt très élevés. Sur les périmètres gérés par des sociétés

d'aménagement, des systèmes de crédit particuliers à taux faibles, voire nuls, ont été pratiqués, mais le désengagement de l'État conduira à leur disparition. Il est parfois prévu dans l'investissement un fonds qui correspond aux besoins en crédit de la première année. En fait, l'institution d'un crédit rural décentralisé à taux modéré est indispensable pour le financement des campagnes de culture. Un problème se pose à propos des garanties demandées pour consentir les prêts car les organisations de producteurs ne sont pas en mesure, en général, d'apporter de telles garanties. La collecte d'une épargne rurale par l'institution pourrait être un moyen de résoudre cette difficulté. En fait, le développement de l'épargne rurale semble devoir passer par la création de fonds villageois.

Une expérience est en cours dans un projet de sensibilisation-formation des paysans autour des barrages au Burkina Faso. Cette expérience concerne 48 périmètres autour de 33 barrages. Des crédits de campagne sont accordés aux groupements et remboursés en moins d'un an jusqu'ici par 80 % des groupements. Il est prévu, pour les groupements qui ont remboursé, de transformer l'avance en une subvention unique qui constituerait un fonds de roulement reconstitué chaque année pour assurer le financement de la campagne. Dans la mesure où les groupements ont été habitués à rembourser l'avance et où ils assurent directement leur gestion financière en tenant les documents comptables nécessaires, on peut espérer que le fonds de roulement sera maintenu d'une année sur l'autre.

La mise en place des moyens nécessaires aux aménagements et à la mise en valeur

Les investissements sont importants, car les périmètres irrigués sont coûteux, même si la fourchette des coûts est très large (de 1 à 10 millions FCFA.an^{-1} dans l'étude conjointe du CIEH et du Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et forêts [Cemagref] sur les périmètres soudano-sahéliens). Le montant des crédits mobilisés doit être compatible avec le rythme d'aménagement prévu. De plus, ce rythme doit être cohérent avec la capacité d'exécution des États, qui dépend notamment des moyens humains et budgétaires des services et des organismes chargés des aménagements et de la mise en valeur ; là aussi les crédits nécessaires doivent être prévus.

LA QUALITÉ TECHNIQUE DES AMÉNAGEMENTS

La mise à disposition de moyens fiables d'évaluation et d'utilisation de la ressource

Leur fondement est constitué par des données climatologiques, hydrologiques et hydrogéologiques sûres. Une évaluation des lacunes actuelles en ce domaine sur l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique centrale est en cours avec l'appui du CIEH. Des méthodes d'estimation des débits disponibles à partir de ces données sont aussi en voie de développement au CIEH. En effet, une exacte appréciation de la ressource disponible est indispensable à la fiabilité d'un aménagement.

Le respect de normes techniques minimales

Les ouvrages et les équipements qui garantissent l'alimentation en eau (réservoirs, pompages, canaux) et ceux qui sécurisent la mise en valeur (digues) sont essentiels car ils répondent au souci de sécurité des paysans. En aucun cas, la recherche d'économies à l'investissement ne doit conduire au non-respect des règles essentielles de bonne exécution des travaux sous peine de reporter sur la maintenance des charges

supérieures aux économies d'investissement et de mettre ainsi en péril l'existence du périmètre. La méconnaissance de cette règle est une cause importante des échecs constatés sur les petits périmètres. En particulier, l'adoption parfaitement justifiée d'équipements qui peuvent être exploités avec une technicité locale et entretenus par des moyens locaux ne doit pas conduire à s'affranchir de ces normes techniques minimales. La mise au point d'un recueil de normes pratiques et de cahiers des charges types est en cours au CIEH.

Synthèse

Les politiques en matière d'irrigation :

- sont considérées comme des instruments essentiels pour atteindre l'autosuffisance alimentaire qui est un but commun aux États sahéliens ;
- nécessitent la mobilisation de crédits très importants, car les aménagements de périmètres irrigués sont coûteux ;
- n'ont pas donné jusqu'ici les résultats escomptés pour différentes raisons d'ordre sociologique, économique et technique.

Ceci se traduit notamment par une carence dans la maintenance des ouvrages et des équipements et par des échecs dans la mise en valeur qui n'entraînent qu'un accroissement très faible de la production irriguée par rapport au but recherché de l'autosuffisance alimentaire.

Ce constat a conduit à reconsidérer la formulation de ces politiques en prévoyant :

- un désengagement progressif des États ;
- une participation et une responsabilisation des paysans associés dès l'origine et qui prennent en charge la gestion et l'exploitation des aménagements ;
- une prise en compte de la dimension sociologique à tous les stades du processus d'aménagement, celle-ci étant considérée comme un facteur majeur de réussite ;
- des innovations dans la conception telles que les aménagements intégrés et les périmètres de recherche ;
- un équilibre entre les grands et les petits périmètres ainsi qu'une priorité à la réhabilitation et à l'amélioration des performances des périmètres existants ;
- la mise en œuvre d'une politique des prix, d'organisation des circuits de commercialisation et de mise en place d'un système de crédits ;
- les mesures pour assurer les moyens nécessaires à l'exécution des programmes et garantir la qualité technique des aménagements.

POLITIQUES D'HYDRAULIQUE PASTORALE

Les difficultés des systèmes pastoraux de production

Les sécheresses ont entraîné une baisse de productivité des pâturages. Leur surexploitation a conduit à la détérioration des systèmes pastoraux de production. Mais cette détérioration est aussi la conséquence de politiques de développement inadaptées au contexte agropastoral sahélien : la gestion des ressources fourragères n'est pas considérée, en général, comme un axe privilégié des programmes en faveur de l'élevage. De plus, la croissance démographique et l'extension progressive de l'espace agricole, qui empiète de plus en plus sur l'espace pastoral, accentuent encore la diminution de la capacité de charge des pâturages. Ces contraintes conduisent à adopter comme fondements des politiques :

- une meilleure gestion des ressources fourragères (programme de régénération des bourgoutières du Mali, programmes d'aménagements sylvopastoraux du Sénégal) qui concerne les politiques d'hydraulique pastorale ;
- une intégration agriculture-élevage, elle-même dépendante d'une intensification de l'agriculture, donc des politiques de l'eau en faveur de la production agricole.

Cette détérioration des systèmes de production pastoraux résulte de l'absence de véritables politiques d'hydraulique pastorale et elle a été la cause des hécatombes de sécheresse ; les rares pâturages qui subsistaient étaient très éloignés des quelques points d'eau permanents ; le bétail restait parfois trois ou quatre jours sans s'abreuver et un ou deux jours sans pâturage ; beaucoup d'animaux ont péri par épuisement en allant d'un point à un autre, plus que par manque d'eau ou de nourriture uniquement.

Les bases de politiques d'hydraulique pastorale

Pour remédier à ces difficultés, il importe de satisfaire les besoins des animaux.

LES BESOINS EN EAU DE BONNE QUALITÉ

Les points d'eau doivent permettre d'éviter de longues attentes, donc présenter de forts débits (puits de grand diamètre, forages équipés de pompes motorisées) ; les besoins variant de 5 à 50 $l.j^{-1}.tête^{-1}$ suivant les espèces. Le débit doit toutefois être adapté au potentiel de charge des pâturages environnants, pour ne pas conduire au surpâturage, c'est-à-dire à la destruction des pâturages par une concentration excessive de bétail, favorisée par des conditions d'abreuvement très favorables.

Une solution de remplacement des puits et des forages, intéressante sur le plan des coûts et de la maintenance mais moins avantageuse du point de vue de la qualité de l'eau, consiste en un surcreusement des petites mares temporaires d'environ 1,50 m, ce qui correspond à la lame d'eau évaporée entre décembre-janvier et avril-mai. Des précautions sont à prendre : prévoir un évacuateur de crues, un contrôle d'accès du bétail, un point d'eau pour l'alimentation humaine. Des mares artificielles avec aménagement d'impluvium peuvent aussi être envisagées (CHEVALLIER et CLAUDE, 1989).

Ces points d'eau doivent être implantés à proximité des pâturages et le long des pistes de transhumance. Les capacités de déplacements journaliers étant de l'ordre de 6 km pour le gros bétail et de 3 km pour les petits ruminants ; les points d'eau devraient théoriquement être espacés de 6 à 12 km ; en fait, pour des contraintes de financement, les distances programmées sont en général de l'ordre de 20 km, ce qui correspond à un abreuvement tous les deux jours. En revanche, dans certains secteurs, se rencontrent des points d'eau beaucoup plus rapprochés que ne l'exigeraient les distances de parcours journaliers, pour des raisons sociologiques, en fonction des droits fonciers des notables coutumiers.

La maintenance de ces points d'eau doit aussi être assurée ; ce problème délicat commence à trouver une solution en hydraulique villageoise en se fondant sur la participation des populations ; c'est beaucoup plus difficile en hydraulique pastorale, notamment pour les forages motorisés, dans la mesure où :

- les éleveurs en transhumance sont beaucoup plus préoccupés de la recherche des meilleurs pâturages que de la prise en charge d'un point d'eau ;
- l'ensemble des pasteurs qui utilisent des pâturages en général communs ne sont pas organisés en collectivités.

Puisque l'entretien par l'État ne paraît pas une solution viable si on se réfère à l'exemple de l'hydraulique villageoise, seule la création de groupements pastoraux peut permettre de trouver une solution.

Les besoins en pâturages de bonne qualité

Il s'agit d'abord de préserver les pâturages de la dégradation due au surpâturage, c'est-à-dire de créer des points d'eau en nombre suffisant pour limiter les distances de parcours journaliers. L'espacement entre points d'eau ne doit pas être :

- trop élevé, pour les raisons d'épuisement des animaux (*cf. supra*) mais aussi pour ne pas provoquer d'accumulation de bétail autour de ces points d'eau en période de sécheresse ;
- trop rapproché, pour ne pas entraîner sur la zone la présence permanente d'une trop forte densité de cheptel par quasi-sédentarisation de troupeaux.

En bref, il faut que les possibilités de satisfaction des besoins en eau et en nourriture soient homogènes. Dans les zones surpâturées, des projets de régénération et d'aménagement de pâturages doivent être mis en œuvre.

Les conflits entre éleveurs et agriculteurs

De fait, il ne suffit pas de satisfaire les besoins des animaux, il faut aussi éviter les conflits qui peuvent naître entre éleveurs et agriculteurs :

- soit de l'utilisation des points d'eau en saison sèche, parce que ces points d'eau sont insuffisants et mal répartis ;
- soit de l'utilisation des espaces, pâturages pour les uns, champs pour les autres.

Pour concilier les intérêts des éleveurs et ceux des agriculteurs, il est souhaitable :

- de créer des points d'eau dans les villages et les quartiers d'une part, dans les zones de pâturages et sur les parcours de transhumance d'autre part, c'est-à-dire de coordonner les politiques d'hydrauliques pastorale et villageoise ;
- de faire délimiter par une commission, composée en majorité d'éleveurs et d'agriculteurs, les zones de pâturage, les zones de culture et les circuits de transhumance.

En résumé

Les politiques d'hydraulique pastorale doivent mettre en oeuvre les moyens nécessaires pour satisfaire les besoins des animaux. Il s'agit essentiellement de créer un réseau de points d'eau, adapté à la distribution des pâturages, à leur capacité de charge en bétail ainsi qu'aux parcours de transhumance, et dont la maintenance serait assurée, ce qui devrait éviter la dégradation due au surpâturage. Le suivi possible par télédétection satellitaire de l'évolution des ressources pastorales en quantité et en qualité, serait de nature à apporter une contribution importante dans le cadre de la définition de telles politiques.

Il ne paraît cependant pas possible d'atteindre uniquement par l'élevage transhumant un objectif de doublement des troupeaux en moins de vingt ans conjugué avec une augmentation de 50 % de la productivité, ce qui serait nécessaire en l'an 2000 pour les pays du CILSS. Une telle croissance aboutirait rapidement au surpâturage et à la dégradation des sols. Il paraît donc indispensable de prévoir également des programmes d'intégration agriculture-élevage, basés sur l'intensification de l'agriculture et

liés aux politiques de maîtrise de l'eau pour la production agricole (*cf.* cet ouvrage, BERNUS : 555-563). Des exemples existent : cultures de fourrages en pluvial au sud du Burkina Faso, pâturages irrigués, repiquage de bourgou au Mali.

CONCLUSION

Les politiques de maîtrise de l'eau en Afrique soudano-sahélienne visent en priorité à satisfaire un besoin fondamental des populations en garantissant leur autosuffisance alimentaire. Les aspects essentiels de ces politiques concernent donc la production agricole et l'élevage.

Au cours de la dernière décennie, ces politiques ont évolué vers un schéma commun dont les principales caractéristiques sont :

- le désengagement progressif des États. D'une prise en charge totale des projets, on tend vers un transfert aux bénéficiaires de l'exploitation, de l'entretien et parfois même du renouvellement. De même une participation à l'investissement est de plus en plus demandée aux bénéficiaires, ce qui constitue également une assurance de leur engagement dans le projet ;
- la perception de redevances pour les services rendus aux bénéficiaires, qui est le corollaire du transfert de charges évoqué ci-dessus, car il faut se procurer les recettes qui permettent d'y faire face ;
- la participation effective des populations dans l'identification des projets, dans leur conception, leur réalisation et leur gestion, participation favorisée notamment par des actions d'animation-sensibilisation, de formation et par des méthodes de planification décentralisée ;
- la prise en compte, dans tout le processus, du contexte humain et social, en associant les sociologues aux hydrauliciens, aux agronomes, etc. ;
- le développement de structures d'autogestion des projets et la mise en place d'opérateurs privés (approvisionnement, commercialisation) sous le contrôle permanent et avec l'appui des administrations qui doivent se doter des moyens nécessaires de supervision-suivi-évaluation ;
- la conception intégrée des aménagements concrétisée par le vocable d'aménagement du terroir villageois c'est-à-dire la prise en compte de tous les besoins des populations, non seulement ceux relatifs à l'eau mais aussi les autres aspects, et ceci dans le contexte d'une planification globale décentralisée des projets ;
- l'élaboration progressive de codes de l'eau et de textes d'application qui permettent de donner le cadre législatif et réglementaire indispensable à l'expression de ces politiques ;
- la création de ministères chargés spécifiquement des problèmes de l'eau et de comités nationaux de l'eau, responsables de la coordination entre tous les ministères impliqués dans les politiques de l'eau.

Cet ensemble de lignes directrices étroitement complémentaires et dépendantes constitue ainsi le cadre cohérent dans lequel s'inscrivent les nouvelles politiques de l'eau.

G. MONCHALIN : *ingénieur en chef du Génie rural des eaux et forêts*, CIEH, BP 369, Ouagadougou, Burkina Faso

Bibliographie

ALBERGEL (J.), et CLAUDE (J.), 1988. - Fonctionnement hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Isra-Cirad-ORSTOM.

CEFIGRE, 1983-84. - La planification des eaux en zones arides et semi-arides.

CHEVALLIER (P.) et CLAUDE (J.), 1989. - Exploitation de points d'eau de surface temporaires pour l'amélioration de la gestion des pâturages sahéliens. Communication ORSTOM au séminaire Unesco «Etat de l'Art en hydrologie», Ouagadougou, *multigr.*

CIEH, 1990-1991. - Aménagements de conservation des eaux et des sols digues filtrantes, expérimentations dans la région de Rissiam au Burkina Faso (1986-1989). T.1 (1990) : Aspects techniques et agronomiques (J. C. Vlaar et A. J. Wesselink). T.2 (1991) : Aspects socio-économiques (M. Brasser et J. C. Vlaar).

CIEH/CEMAGREF, 1986. - Aménagements hydroagricoles en zone soudano-sahélienne, leurs coûts, leurs résultats.

CIEH/Géohydraulique, 1987. - Études d'accompagnement du programme d'hydraulique villageoise du conseil de l'Entente, 2e phase (1987).

CILSS, 1989. - Approche des politiques des états sahéliens en matière de développement rural intégré et de lutte contre la désertification.

CILSS. s. d. - Note sur l'étude sur la problématique de la politique rizicole en région sahélienne.

DIEMER (G.), FALL (B.) et HUIBERS (F.), 1987. - Vers une nouvelle conception de l'irrigation, ADRAO. Université agronomique de Wageningen.

DI LUCA (C.), 1989. - Expériences de maintenance de pompes en Afrique de l'Ouest. Séminaire Guinée-Bissau, Avril 1989, Conférence CIEH.

DUGUE (P.), DE FRAMOND et PIATON (H.), 1988. - Économie et valorisation agricole de l'eau : compte rendu d'expérimentations CIEH-CTFT-Inera-Irat.

FAO, 1986. - Politiques de développement de l'irrigation. Consultation sur l'irrigation en Afrique, Lomé, 21-25 Avril.

IIMI, 1988. - Programmes de recherche - développement sur le management de l'irrigation au Burkina Faso, au Niger, au Sénégal.

MONCHALIN (G.), 1988. - Maintenance des pompes en hydraulique villageoise. Session CEFIGRE à Lomé, 13 Octobre 1988, Conférence CIEH.

OUEDRAOGO (N. A.) et CAPO-CHICHI (J. Y.), 1984. - La lutte contre l'érosion des sols en Haute Volta, l'expérience du Fonds de Développement Rural (FDR, Juin 1984).

REIJ (C.), 1989. - Rapport sur l'évolution des stratégies de lutte contre la sécheresse et la désertification des principaux organismes coordinateurs dans le Sahel. Janvier 1989, Club du Sahel, Université libre d'Amsterdam.

Réseau recherche-développement, 1988/1989. - Groupe réhabilitation des périmètres irrigués : Ateliers débats sur les périmètres de Matam au Sénégal (13 Février 1988), sur les réhabilitations de l'Onaha au Niger (20 Mars 1989), sur l'office du Niger au Mamo (17 Avril 1989).

UNESCO. - Rapport sur les aspects socioéconomiques et politiques de la gestion des ressources en eau en Afrique (Addis Abbeba, 2-7 Juin 1986).

Conclusion

La tradition des travaux de recherches écologiques en zones arides est presque aussi longue que celle de l'écologie elle-même ; pour cela, cet ouvrage est l'image de leurs travaux renvoyée aux chercheurs.

S'il ne s'adresse pas exclusivement aux chercheurs, cet ouvrage cependant les concerne en premier lieu. La demande de travaux de recherches écologiques finalisés est grande (c'est-à-dire de travaux qui prennent en compte de près ou de loin, des critères relatifs aux besoins socio-économiques et qui s'inscrivent dans un souci de préservation à long terme de l'environnement). Il reste cependant beaucoup d'obstacles à surmonter pour que tous ces travaux soient directement interprétables et leurs résultats transférables au développement. Ainsi, l'objectif des telles études scientifiques n'est pas exclusivement d'accroître le savoir mais bien de créer une information qui, pour les divers niveaux de perception, d'organisation, d'espace et de temps, présente les qualités de pertinence, de fiabilité, de validité et de généralisation. Il apparaît que les travaux présentés ici peuvent être considérés comme réunissant la majorité de ces qualités ; Il reste cependant beaucoup à faire dans le domaine de la généralisation et ceci pose de nombreux et sérieux problèmes. En effet, sans pousser à l'extinction de l'initiative ou de la curiosité, pour que les études puissent être qualifiées de comparatives sur les mêmes thèmes et aux mêmes niveaux de perception, il importe qu'elles soient établies sur quelques principes, lesquels, s'ils sont aisés à évoquer, sont toujours délicats à faire adopter. Il s'agit tout d'abord de la comparabilité des problématiques et de compatibilité puis, ensuite, de la comparabilité des méthodes. Les études comparatives sont rares dans cet ouvrage ; elles sont parfois délicates à effectuer pour certaines disciplines ; il est à souhaiter que cet ouvrage, en contribuant au dialogue entre chercheurs, conduira aussi à la reconnaissance de la nécessité de ces comparaisons.

La sécheresse est un maître qui incite à apprendre ; face à une saturation des espaces (par l'homme et ses activités) qui, suite aux sécheresses, a entraîné une détérioration parfois irréversible des espaces et des ressources, il est souhaitable que les hommes et les institutions se persuadent enfin qu'en zones arides une meilleure sécurisation des productions passe par une meilleure prise en compte de la rareté et de la variabilité des ressources, surtout hydriques. C'est en zones arides que les problèmes liés à l'usage des ressources présentent les caractères les plus aigus et créent une menace pour la pérennité de l'agriculture.

En toute hypothèse, le développement nécessite que soient confrontés et rendus compatibles les souhaits et les besoins des populations, les possibilités réelles offertes par les milieux, compte tenu éventuellement des acquis techniques ou des pratiques traditionnelles des populations (potentialités, contraintes, efficacité des pratiques, etc.) et les contraintes liées aux institutions.

Les recherches rapportées dans cet ouvrage concernent soit le diagnostic des milieux, soit, par exemple, les processus de la production biologique (interactions des facteurs du milieu), soit encore les stratégies développées par les utilisateurs de ces espaces.

Si ces travaux concernent le développement, il ne constituent cependant pas des recherches en développement qui, en intégrant de nombreuses autres données, sont, de fait, de nature différente. Les sociologues, les socio-économistes se trouvent cependant contraints de prendre en compte de manière forte un certain nombre des travaux présentés, dans la mesure où ces derniers anticipent une demande sociale réelle ou potentielle. De telles études prédictives (par exemple : influence de la pression humaine sur le niveau et sur l'évolution de ressources...) peuvent alors aisément être utilisées pour élaborer des scénarios et aider ainsi à la prise de décision.

Les recherches en ces zones arides peuvent faire l'objet de nombreuses autres œuvres collectives sur des thèmes tels que, par exemple, l'herbivorie, l'érosion, ou sur des thèmes plus axés sur la recherche-développement : relations ressources-usages, relations écologie-économie, gestion des ressources. Cet ouvrage, espérons-le, n'est que le premier d'une série relative à ce défi que constitue le développement durable.

Abstracts

Aridity : a constraint for development
Characterisation, biological responses, strategies of societies

Part one: Climatic aridity, edaphic aridity on different scales of time and space

J.-P. CARBONEL and P. HUBERT, RAINFALL IN SUDANO-SAHELIAN WEST AFRICA. QUESTIONING THE STATIONARY NATURE OF RECORDS.

An in-depth, original (segmentation procedure) statistical study shows that rainfall records have not remained stationary in West Africa as a whole. Synchronous regional climatic phases corresponding to "climatic changes" are defined in 1923-24, 1932-33, 1950-51 and 1968-69. These sequences are alternatively "wet" and "dry", with the overall trend being towards increased aridity. The same sequences can be seen in the flows of the main rivers in the region. The change from a relatively dry to a relatively wet phase affects the evolution of the main parameters used to describe the rainy seasons; annual amount of rainfall, the number of days of rainfall, the rainfall fractions (mainly in the rainfall events greater than 40 mm), the distribution of rainfall during the season and length of the rainy periods during the season. This general, synchronous climatic evolution throughout Sudano-Sahelian West Africa should be compared with the evolution of atmospheric dynamics which affects a much larger area than the zone examined; this is the overall evolution of climates at global scale. The regional anthropic causes of this evolution (deforestation, population pressure, etc.) thus seem of secondary importance in comparison with a widespread phenomenon on a much larger spatial scale.

KEY WORDS: West Africa, rainfall, climatic change, statistics.

J. SIRCOULON, SURFACE WATER RESOURCE CHARACTERISTICS IN ARID ZONES IN WEST AFRICA. VARIABILITY AND PRESENT EVOLUTION.

Surface water resources in arid zones of West Africa vary considerably in space and time because of rainfall and runoff variability, soil and vegetation behaviour and climatic variations in these areas. There are numerous problems in reliable appraisal of runoff: rare flows, rapid rise of floods, difficult access to stream-gauges. Moreover, hydrographic deterioration makes it difficult to apply the results to other catchments. Nevertheless, the studies performed by ORSTOM from the boundary of the desert to the southern edge of the Sahel (representative basins, extensive studies) and the data from the few general network stations make it possible to picture the runoff characteristics of the area. The considerable decrease in rainfall and runoff over the past twenty years and the rapid population growth is giving rise to acute water resource problems.

KEY WORDS: West Africa, runoff characteristics, water resources, drought.

G. BOUTEYRE and J.-Y. LOYER, SALINE SOILS AND BRACKISH WATER IN TROPICAL AND MEDITERRANEAN ARID REGIONS: PRINCIPAL FACIES, CONSEQUENCES FOR AGRICULTURE.

The soil and water salinisation phenomenon is most rapid and serious in arid regions. When water reaches the concentration and evaporation zones close to the surface of the soil it acquires salinity facies which are marked by the initial chemical composition of the water and by the contamination or loss of salts which may precipitate as they are conveyed. The soils are salinised in contact with water with different salt compositions and acquire similar chemical facies with the same sulphated, chlorinated, carbonated, sodic, magnesian and calcic poles. Sodium has a particularly harmful alkalinising effect on soils. Irrigation reproduces these phenomena and in the absence of drainage extends them to soils which are not affected under natural conditions. The quality of irrigation water should therefore be assessed in the light of the nature of the soils and climatic aridity.

KEY WORDS: soil facies, salinisation, alkalisation, tropical arid regions, Mediterranean arid regions, irrigation.

B. SEGUIN, APPROACH TO EVAPOTRANSPIRATION USING REMOTE SENSING: USE OF THE METEOROLOGICAL SATELLITES METEOSAT AND NOAA IN THE SAHEL REGION IN AFRICA.

Evapotranspiration is a significant component in the water balance for agro-meteorological studies in Sahel regions. Although determination of potential evapotranspiration (PET) may be considered as sufficiently accurate today, calculation of actual evapotranspiration (ET) from water balance models is feasible. These models enable estimated ET to be drawn from meteorological data, but they are inadequate for describing spatial variations resulting from highly variable rainfall and soil properties. For this, the use of satellite data would appear to be a possible solution. A research programme carried out in the Sahel and, in particular, in Senegal has demonstrated the potential for estimating ET provided by the existence of meteorological satellites (Meteosat, NOAA-AVHRR). The complementarity of Thermal, IR and vegetation data - as demonstrated by experimental results - is emphasised.

KEY WORDS: evapotranspiration, remote sensing, satellites, agro-meteorology, Sahel.

M.-F. COUREL, ALBEDO AND RAINFALL IN THE SAHEL.

Variations in surface albedo in the Sahel are - as elsewhere - determined by standing vegetation and, more particularly, by annual and inter-annual variations in herbaceous plant cover. The establishment and growth of this cover in the Sahel depends more on regular rainfall distribution than on total precipitation for a given year or season. A direct correlation can therefore be drown between total rainfall and standing biomass and, to a lesser extent, between total rainfall and albedo.

KEY WORDS: albedo, rainfall distribution, grass cover, Sahel.

R. ESCAFADAL, REMOTE SENSING OF ARID LANDS. CONCEPT AND APPLICATIONS.

Soil surface plays an important role in arid environments, affecting in particular water cycles and plant growth. An overall approach is proposed to describe this soil-atmosphere interface. Modelling its interaction with solar radiation provides a solid base for interpreting satellite data. The colour, mineralogical composition and roughness of soil surfaces were characterised by processing Landsat images (MSS and TM) in soil resources mapping operation in southern Tunisia. Other applications of remote sensing of the soil surface are promising, as well, especially the estimation of infiltration capacity for hydrological models and the monitoring of desertification.

KEY WORDS: surface condition; remote sensing, soil-atmosphere relationship; desertification, infiltration capacity.

J. ALBERGEL, A. CASENAVE, P. RIBSTEIN and C. VALENTIN, CLIMATIC ARIDITY, EDAPHIC ARIDITY: STUDY OF INFILTRATION CONDITIONS IN AFRICA.

A study of infiltration factors was performed in Burkina Faso. Rainfall simulation was used in 50 trial plots (1 m²) and the results extended to 8 catchments (9.7 to 67.8 km²). Infiltration was strongly dependent on grass cover, soil fauna activity and the behaviour of the surface horizon. Comparison of catchment behaviour during a wet period (1956-1963) and a dry period (1980-1985) indicated a significant decrease in soil infiltration capacity during the present drought and hence an increase in climatic aridity effects. Sahel and Sudan type landscapes have thus become more arid in recent years.

KEY WORDS: aridity, soil infiltration capacity, surface state, mesofauna, plant cover.

J.-C. LEPRUN and C. O. DA SILVEIRA, ANALOGIES AND FEATURES OF SOILS AND WATER IN TWO SEMI-ARID REGIONS: THE SAHEL IN WEST AFRICA AND THE NORDESTE REGION OF BRAZIL.

Although there are numerous common features (Pre-Cambrian crystalline bedrock, contrasted hot, dry climate with considerable variations in rainfall and intermittent catastrophic droughts, xerophytie tree and low shrub vegetation, poor rural population, subsistence agriculture subject to climatic variations, temporary streams and scarcity of water for much of the year), - comparison of these dry regions in Africa and Brazil reveals instructive differences. These are sought and analysed with regard to pedogenetic factors, soil, water and their interrelations. The information used was pedological and hydrological data gathered during ten years of prospection and research in the Sahel-Sudan fringe of West Africa and those gathered by the Brazilian organisations Sudene and Embrapa since 1980. The comparisons concern 1) pedogenetic data and factors including geographical location, parent rock, geological history and tectonics, relief, climate, vegetation and human occupation; 2) classes, areas, morphology, physico-chemical characteristics, natural fertility, behaviour of soils; 3) dynamics (runoff, infiltration) and quality of surface water, soil water and deep ground water. The main results show soil features and analogies between the two regions and discuss differences in the type and hydrodynamic behaviour of the soils and the acquisition of physico-chemical characteristics by surface water in the two regions.

KEY WORDS: soil-forming factors, soils, water dynamics, Sahel, Nordeste, Brasil.

Part two: Interactions between environmental factors and biological response to aridity

J.- C. BILLE, PLANT REFLECTANCE. VARIATIONS AND ANNUAL EVOLUTION.

The vegetation index, obtained from a combination of plant reflectance in the visible light and near-infrared band, is extensively used to describe plant growth and productivity. However, the annual evolution of this index often shows anomalies which cannot be explained by biological factors. The use of a radiometer on board an aeroplane at low altitudes provides new insight into the elaboration of the vegetation index: reflectance is more or less affected by the atmospheric thickness and the distortion is time and space dependent. The establishment of correlations between the index and vegetation characteristics is of little use, if no proper corrections can be applied to the recorded values. Considerations on the analysis of multi-temporal data can help to improve the selection of acceptable records.

KEY WORDS: vegetation index, remote sensing, aerial data collection, annual evolution, transmissivity.

J.- C. BILLE, COMPARATIVE EVOLUTIONARY TRENDS IN RANGELANDS IN WEST AFRICA AND EAST AFRICA.

The trends observed in African rangelands result from the combined influence of man and the climate. The rainfall regime is bimodal and monomodal respectively in Kenya and Senegal, the

two countries selected for the analysis. Droughts have varying impact and human pressure also differs because of specific pastoral strategies. The character of vegetation is an expression of the climate as better rainfall distribution favours perennial plants. In Senegal, annual grasses are extremely sensitive to low rainfall and the rehabilitation of grass cover can take place very rapidly. Perennial grasses are more resistant to over-grazing but elimination is lasting. The woody strata are an important component of the savannas. A decrease in the number of trees in the western arid zones leads to desertification, whereas large areas of land in East Africa have been abandoned because of bush encroachment. Recent changes in pastoral systems show how pastoralists are adapting to their new environment and its evolution: their reactions may result in further damage to rangeland, especially when the livestock composition is modified to include a higher percentage of goats and camels.

KEY WORDS: rainfall regime, pastoral strategy, character and dynamics of vegetation.

H.-N. LE HOUÉROU, RELATIONS BETWEEN PRECIPITATION VARIABILITY AND THAT OF PRIMARY AND SECONDARY PRODUCTION IN ARID ZONES.

Analysis of 1 000 pairs of data sets on annual rainfall and annual primary production in the arid zones of the world (P<600 mm) shows that the variability of annual rainfall is generally related to the long term average, with a number of exceptions. However, the variability of a given average depends on the type of climate and sometimes on nuances or geographical patterns within general climatic types. Thus, variability is greater in the Mediterranean arid zone than in the Sahel, and higher in North Africa than in the Near East. It is distinctly greater in the northern Sahara (Mediterranean) than in the south (tropical). There is about 50% greater variability in primary production than in annual rainfall on a world basis. Production variability may be enhanced or reduced by other factors such as soil condition and the dynamic status of the ecosystem in question. Soil and ecosystem depletion reduce productivity and increase variability in both crops and native vegetation. Rainfall variability also affects the composition, structure and distribution of native vegetation and patterns of crop type and distribution. Unlike primary production, secondary production appears to be less variable than rainfall because of the various adaptation strategies of animals and/or appropriate management practices such as transhumance, nomadism, buffer feed reserves, supplementary feed and numerous range and catchment management techniques. For example, the main consequence of rainfall variability on small ruminants under free range, non-supplemented conditions is weight change followed by reproductive performance and hence productivity, sensitivity to disease and parasites and finally the number of adult animals. There is also a time lag of 1 to 2 years between rainfall variation and that of head of livestock. A one-year drought is therefore generally of minor importance as it is fairly well taken up by the production systems. Droughts of two years or more have serious consequences.

KEY WORDS: rainfall, variability, arid zone, bioclimatology, primary production, secondary production.

J.-C. LEPRUN, STUDY OF CERTAIN SAHELIAN "STRIPED BUSH": STRUCTURE, DYNAMICS, ECOLOGY.

Study of the soils and vegetation of seven toposequences in various "striped bush" formations in Gourma in Mali and Oudalan in Burkina Faso revealed the processes involved in their formation, evolution and dynamics. They are the result of a combination of many factors, including the sedimentary substratum, the flat or gentle relief and the resulting shallow, undeveloped soils, the prevailing endorheic drainage in the area and erosion by water and wind direction. These factors result in a structure with three successive strips: sandy with tall grass, a barren clayey intermediate strip and a sandy-clayey or silty strip with poor woody vegetation. The soil/vegetation combination of the three strips is driven dynamically and moves a few tens of centimeters a year in the direction of dry season winds. When the climatic and edaphic conditions are no longer present, the formation disappears in the north or turns into stable "brousse ponctuée" ("leopard bush") in the south. "Striped bush" forms moist, fragile ecological niches in semi-arid zones well north of their usual area.

Key words: vegetation structure, ground condition, sensitivity.

A. CORNET, RELATIONS BETWEEN THE SPATIAL STRUCTURE OF PLANT POPULATIONS AND THE SOIL WATER BALANCE IN SEVERAL PHYTOCOENOSES IN ARID ZONES.

Heterogeneous distribution of vegetation related to water redistribution appears to be an almost constant feature of arid zones. Variations in water availability depend in turn on soil cover, the state of the surface of the ground and runoff redistribution of water on slopes. The soil water balance and the structure and dynamics of the vegetation were studied in two toposequences in striped bush in northern Mexico and in former dunes in the Ferlo region of Senegal. Data on the spatial variability of water distribution combined with those on the spatial structure of the vegetation revealed functional relationships and local dynamic equilibria between the heterogeneity of the vegetation and the redistribution of rainfall on slopes. The heterogeneous plant cover and the variety of functioning in patches affected phytocoenosis ecology as regards the maintenance of diversity, primary growth, water uptake and vegetation dynamics.

KEY WORDS: plant cover, spatial structure, plant cover dynamics, water balance.

M. GROUZIS, GERMINATION AND ESTABLISHMENT OF ANNUAL PLANTS IN THE SAHEL.

Annuals were grown from seed in the arid Sahel. The vegetation stages are placed in their climatic context and a growth model presented. The various mechanisms controlling the inter-annual dynamics of herbaceous vegetation in the Sahel are considered. Seed banks vary considerably according to the type of soil, the nature of edaphic substrata and the uniformity of the vegetation. Reserves at the start of the dry season vary from 10^4 to 10^5 seeds. m^2. The seeds can usually survive for more than one year and are characterised by inhibition and dormancy phenomena. These can be overcome under experimental conditions by a variety of pretreatments and under natural conditions by intense heat, heavy rainfall or alternate moist and dry periods. Depending on soil structure, 10 to 25 mm rainfall is sufficient to cause emergence, but about 20% of annual precipitation is needed for the establishment of the plants. A high loss rate resulting from severe selection may be observed during the establishment phase; this is further characterised by successive waves of germination. It is finally shown that seed reserves are largely in excess of what is needed to insure satisfactory coverage. The various adaptations to the unpredictability of the Sahel environment are stressed.

KEY WORDS: therophytes, life cycle, seed banks, germination, establishment, inhibition, dormancy, pretreatment, post-maturation, heteroblastic development, emergence, adaptation, arid zone, Sahel.

J. POISSONET, F. CHAMBRIS et I. TOURE, BALANCE AND IMBALANCE IN HERBACEOUS PHYTOCENOSES IN THE SAHEL. INFLUENCE OF ANNUAL RAINFALL AND THE PROXIMITY OF WATER POINTS.

The quadratic points method can show the importance of each species of a given vegetation type, expressing total cover by observing the hit frequencies under points. The relation between number of taxons and specific frequencies (absolute or centesimal) distinguishes between balanced and unbalanced vegetation. Thus, if the relation between number and frequency does not differ significantly from a log-normal distribution, the community can be considered as balanced. Otherwise, it has been shown that modification of one of the environmental factors causes structural imbalance expressed by the combination of two or more log-normal curves between number and frequencies; these number curves tend to separate from each other. When the disturbing effect of environmental factors is stronger, the observed difference tends to decrease with time and a fresh equilibrium gradually becomes established.

KEY WORDS: Sahel, rangeland, species frequency, imbalance, rainfall, over-grazing.

F. ACHARD, PLANT BIOMASS IN NORTHERN SUDANIAN SAVANNA IN CAMPÉLA, OUAGADOUGOU REGION, BURKINA FASO.

Aerial grass biomass was measured in Campéla from 1984 to 1987. Annual plant biomass was investigated in 1986, when rainfall depth was the greatest of the series (708.5 mm). The plant biomass production period is short: 135 days for perennial grasses and 100 days for annual grasses. Growth of the latter started late (beginning of July) and was slow: the biomass observed only totalled about 400 kg DW ha^{-1}. Rainfall-biomass relations were plotted from 1984 to 1987. Maximum biomass varied from 2,272 to 4,230 kg DW ha^{-1} for a vegetation with annual grasses and from 3,272 to 6,714 kg DW ha^{-1} one with perennial grasses. Coefficients of rain use efficiency for annual and perennial grasses were therefore 5.2 and 8.3 kg DW ha^{-1}yr^{-1}mm^{-1} respectively.

KEY WORDS: aerial plant biomass, northern Sudanian savanna, Burkina Faso.

B. SICARD, INFLUENCE OF ARIDITY ON THE BIOLOGY OF SUDANO-SAHELIAN RODENTS.

Although the criteria for defining an arid climate are well established, the criteria for defining edaphic aridity depend on the size and biological system of the animal species in question. For rodents, this means the food reserves (insects, grasses and seeds) and the hardness and surface composition of the soil. Biological adaptation of rodents to aridity are quantitative and qualitative. Quantitatively, the limiting effects of precipitation increase with aridity (decreased trophic resources) leading to increased competition (in the Sahel zone) and increased inter-specific competition (in deserts). The increase of mobility with aridity results from metabolic and behavioural adaptations and makes it possible to re-establish genetic mixing during annual periods of high monospecific concentrations of rodents (in the Sahel zone) to counter-balance the increase in interspecific competition (in deserts). Qualitatively, the biological adaptation of rodents to arid climates demonstrates the essential role played by the variability of climatic factors (especially water). Throughout the arid climate belt, the synchronising effect of rainfall periodicity on biological functions decreases while the synchronising effect of thermo-photoperiodicity increases. For example, aridity selects photo-dependent reproductive species, i.e. early reproductive species in the Sahel zone and opportunist reproductive species in deserts.

KEY WORDS: climatic aridity, edaphic aridity, Sahel rodents, reproduction cycles, water metabolism.

M.-Y. MOREL et G. J. MOREL, CLIMATIC INSTABILITY AND BIRD POPULATIONS IN A SEMI-ARID REGION IN WEST AFRICA: SHRUB STEPPE IN NORTHERN SENEGAL.

The region has a long dry season and a short (3-month) rainy season with fixed dates, although annual rainfall varies considerably. Birds (e.g. Eremopterix*) react to these contrasting but partially predictable seasons by local movements to find more favourable conditions. Breeding periods (short or long, dry or rainy season) illustrate the variety of strategies. The marked climatic variations strongly influence population density and the variety of species. A nest count in a sample plot varied from one in a whole year to many in a single month. Several granivorous species whose breeding habits, population dynamics and behaviour exhibit specific adaptation to the climate are also discussed (*Quelea quelea, Streptopelia roseogrisea, Pterocles exustus, Lagonosticta senegala*). Special mention is made of* Quelea quelea, *a granivorous pest in cereals, which fell victim to the dry years and has been replaced by* Passer luteus, *a more drought-resistant species. In the difficult question of competition dynamics of bird populations in the western Sahel, the features and strategies observed do not differ appreciably from those of the bird population of semi-arid zones in Australia and East and southern Africa.*

KEY WORDS: semi-arid tropics, Sahel, bird populations, annual cycle, granivorous birds, *Streptopelia roseogrisea, Pterocles exustus, Eremopterix* spp., *Quelea quelea, Passer luteus, Lagonosticta senegala.*

S. I. GHABBOUR, M. A. RIZK et W. Z. A. MIKHAIL, THE WATER BALANCE OF SEVERAL UNDERGROUND INVERTEBRATES IN THE MARIOUT REGION (EGYPT). THE CASE OF THE SAND COCKROACH *HETEROGAMIA SYRIACA* SAUSS.

The Mariout region in Egypt runs for over 100 km west of Alexandria and is part of the north-western Mediterranean coastal desert, going as far as Salloum. Rainfall is modest (110-150 mm/yr^{1}) and generally occurs from November to March. Relative humidity is fairly high, ranging from an average of 61% in autumn to 71% in the summer in spite of the summer drought. RH often exceeds 80% in August. Soils are sandy calcareous with some silica intrusions. The topography consists of a series of ridges enclosing depressions running parallel to the coast. Investigations were performed at Gharbaniat on the coastal sand dune and in the non-saline depression between the third and fourth Ridges in the Omayed Biosphere Reserve. The sand cockroach Heterogamia syriaca *Sauss (Polyphagidae, Dictyoptera) is the dominant soil mesofauna species. The results of studies on the water balance of the species are described to elucidate its adaptation for survival and the maintaining of its water balance. Fluctuations in the population density and biomass of* H. syriaca *were not synchronous at the two sites; they appeared to be closely related to soil moisture at a depth of 50 cm where the relative humidity of the "porosphere" is 100% most of the time (1975-1977). Laboratory experiments were performed to investigate body water loss and gain in atmospheres with constant relative humidity, after transfer from low to high RH and vice versa, absorption of water vapour by dead specimens and the critical temperature. The results reveal a remarkable set of adaptations to maintain the water balance as long as the "porosphere" is sufficiently humid, the usual case in coastal deserts.*

KEY WORDS: Mariout, *Heterogamia syriaca*, relative humidity, critical temperature, porosphere.

H.-N. LE HOUÉROU, EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE TOLERANCE OF BARBARY SHEEP TO STARVATION AND LIMITED FEED; RELATIONS BETWEEN ENERGY USE AND WEIGHT VARIATION.

An experiment is discribed in the arid part of Libya to examine the relationship between energy consumption and variation in body weight in young Barbary ewes. The animals were subjected to different diets: fasting, limited feed, maintenance, over-feeding, free compensatory growth diet. The overall conclusions are as follows. Fasting: young ewes can lose over 40% of "normal" body weight in about 60 days and recover at almost the same rate; this underlines the well known high tolerance of Barbary sheep to feed restriction. The conversion rate of each weight unit gained or lost is approximately the same in the limited and over-feeding diets. There was high inter-individual variability in conversion rates in the population tested, suggesting considerable scope for breeding based on this criterion. Conversion rates during the compensatory growth period were very high and similar to those of 3-6 month old lambs of the same breed under near optimum feeding conditions. The reproductive performance does not seem to be affected if body weight is normal at mating. This is of considerable economic importance. Given the speed of compensatory growth, it would not seem to be desirable to maintain body weight constant at close to optimum levels, especially during the annual summer feed shortage.

KEY WORDS: sheep, energy, performance, adaptation to drought.

A. M'TIMET, SAHARAN LOESS AND IMPROVEMENT OF ITS GEOTECHNICAL PROPERTIES (THE CASE OF THE MATMATA AND THEIR EDGES, TUNISIA).

The Matmata range and its edges in south-eastern Tunisia run from the south of the Gabes region into Libya. It is the most spectacular loess deposit in southern Tunisia. It is quaternary material (upper Pleistocene and Holocene) deposited by the effect of wind during different climatic phases. Despite its crust surface and particularly striking depth, the physical and geotechnical characteristics of the material - rich in fine sand and carbonates - enhances water erosion. Traditional hydraulic development in this permanently arid area uses runoff, especially for orchard

crops. Study of the material combined with a hydrodynamic study gave better definition of the various constraints for the small hydraulic developments. Use of olive waste improves the physical and geotechnical properties and it is used in control of desertification and soil degradation.

KEY WORDS: southern Tunisia, Matmata, loess, quaternary period, *jessour*, soil physics, ground condition, rainfall simulation, runoff, desertification.

G. BOUTEYRE, A CALAMITY FOR ARID ZONE AGRICULTURE; THE SALINISATION OF IRRIGATED LAND (LOWER EUPHRATES VALLEY, SYRIAN ARAB REPUBLIC).

Salinisation of land is one of the main causes of the decrease in cultivated areas and agricultural production in arid regions. Consequently, a large proportion of the clayey-loamy alluvial land in the Lower Euphrates Valley put under irrigation in Syria in the 1950s has had to be abandoned because of salinisation which developed over a 20 to 30-year period or in certain places in a period of only a few years . The phenomenon is the result of poor attention to two basic points in water management: 1) there have been considerable water losses from a basic earth canal network built quickly with no precautions taken, and 2) inadequate natural drainage not combined with artificial drainage to eliminate excess water. The neutral nature of the salinity, the fairly satisfactory results of tests and the urgent need for land in the region have led to the proposal and implementation of considerable works to provide a solution for farming in the Lower Valley. The two-layer structure of the soils made it possible to consider the use of vertical drainage instead of a conventional agricultural drain system with buried drains, which would have been difficult to operate. Two stages of drainage are planned: the first to lower the groundwater level to a critical depth to prevent the salinisation of the upper soil layer under present irrigation conditions, and the second to accompany the modern irrigation installations as they are completed for cultivated and abandoned land.

KEY WORDS: salinisation, irrigation, vertical drainage, Lower Euphrates Valley, Syria.

G. SERPANTIÉ, L. TEZENAS DU MONTCEL and C. VALENTIN, DYNAMICS OF SURFACE STATES IN A SUDANO-SAHELIAN AGRO-PASTORAL AREA. CONSEQUENCES AND PROPOSALS.

An analysis is presented of environmental degradation mechanisms in a Sudano-Sahelian zone undergoing aridification (Bidi village, Yatenga District, Burkina Faso). Photographic records and eye-witness accounts of the process, geomorphological studies of toposequences and micro-regional analysis of agro-pastoral practices were used to develop hypotheses on the causes of the degradation (vegetation dynamics and influence of the dominant soil type). Possible technical solutions are proposed and, in particular, modified water management policies. Over the past 30 years, 25% of the arable land around Bidi has lost most or all standing vegetation and surface erosion has virtually prohibited farming. Such rapid degradation can be attributed to excessive agro-pastoral exploitation combined with persistent, recurrent droughts. The regulatory effect of traditional migration patterns has been outweighed by enlarged sedentary populations since the 1950s and the accompanying flow of economic resources to the resulting villages. Several landscape units are discussed; each has undergone a distinct evolution process according to its inherent self-regulation properties and its relative resistance or vulnerability to agro-pastoral activities and prolonged drought. Various methods of diagnosis and technical solutions are discussed in the light of current land management goals.

KEY WORDS: ground surface state, degradation, aridification, diagnosis, agro-pastoral activities.

C. FLORET, E. LE FLOC'H and R. PONTANIER, ANTHROPIC DISTURBANCE AND ARIDIFICATION IN THE PRE-SAHARAN ZONE.

The study zone is in the pre-Saharan zone in Tunisia where there has been considerable recent increase in cultivation and over-grazing. Areas with different ecological systems were evaluated

at different dates from 1948 to 1985 by interpretation of the aerial photographs available. Knowledge of the hydrodynamic characteristics of different ecological systems makes it possible to assess water resource trends in time (average soil water available in the region, regional loss of storage capacity, etc.) and biological production in a rainy year (forage plants, barley). The study shows the need to improve water management practices to control severe soil erosion and halt the aridification trend.

KEY WORDS: arid zone, regional water regime, land use, water control.

Part three: Strategies developed by human societies in the face of the constraint

J.-O. JOB, THE FIRST HYDRO-AGRICULTURAL DEVELOPMENTS IN MESOPOTAMIA AND THE PROBLEM OF SALTS

As early as the middle of the third millenium BC, irragation was a common practice in Mesopotamia, unfortunately associated with a serious salinisation of the soils. The historical consequences of the degradation of soils are described in the publications of archeologists and compared to the present situation. There is a striking similitude between the effects of soil salinisation today and four thousand years ago.

KEY WORDS: irrigation, salinisation.

E. ROOSE, DIVERSITY OF TRADITIONAL AND MODERN STRATEGIES OF SOIL AND WATER CONSERVATION. INFLUENCE OF THE PHYSICAL AND HUMAN ENVIRONMENT IN THE SUDANO-SAHELIAN REGION IN WEST AFRICA.

Erosion control methods vary considerably according to ecological and socio-economic conditions. Traditional strategies, which are generally well-suited to the physical environment, are now obsolete because of population growth. More modern rural equipment procedures have also failed because of lack of agreement among the population concerned. An "upward" rural development strategy (water and soil fertility conservation) is described, based on the requirements, traditions and economic capability of farmers. This is followed by analysis of erosion control methods in the Sudano-Sahelian region in West Africa. It is shown that the environment is fragile, even if erosion is modest (0.5 to 30 $t.ha^{-1}.y^{-1}$); erosion is selective and nutrient and water losses through runoff (KR 5 to 40%) from these cultivated pediments are unacceptable in a semi-arid zone. Distinction is made between four zones as follows according to environmental diversity (water conservation and ethnic groups): 1) Southern Sudanian zone (rainfall 1000 mm): drained rainfed crops. The Senoufos use large ridges and ensure that surplus water is drained. 2) Northern Sudanian zone (rainfall 700 to 1000 mm): strictly rainfed crops. The Miniankas discharge runoff from the hills but attempt to ensure that all rainfall infiltrates in the fields (tied ridging and embankments). 3) Southern Sahel zone (rainfall 400 to 700 mm): rainfed crops. The Yatenga Mossi try to conserve all runoff (stone bunds, cisterns, mulching, etc.). 4) Northern Sahel zone (rainfall less than 400 mm). Crops are grown in the valleys and the slopes are used for grazing: development efforts are concentrated on the intensification of valley crops. Erosion control structures alone are incapable of solving the serious problems of runoff in cultivated areas but are essential for the development of agro-sylvo-pastoral systems with better management of biomass, nutrients and the state of the surface of the ground.

KEY WORDS: Sudano-Sahelian zone, erosion control strategies, diversity of traditional methods, variability of water saving.

J. BONVALLOT, IN DEFENCE OF *JESSOUR*. SOUTHERN TUNISIA.

A brief geographical description of the Medenin area in southern Tunisia is followed by examination and description of minor hydraulic works in the region. Distinction is made between those in the mountain area, which result from centuries of experience, and recent works on the

pediment and cones of the Jeffara. True protection of this pediment from floods and erosion will only be possible if the small hydraulic works in the mountains are maintained and restored. They are also useful in controlling soil aridity.

KEY WORDS: arid zone, surface hydraulics, erosion control, rainless agriculture.

M. LESOURD, CONTROL AND USE OF WATER IN THE CAPE VERDE ISLANDS. CHALLENGING OF TOUGH NATURAL CONDITIONS BY A STATE AND ITS FARMERS.

The Republic of Cape Verde, a small archipelago off the coast of Senegal and Mauritania, only gained independence in 1975. Sustainable rural development is being attempted by hydro-agricultural control under particularly difficult natural conditions. The main aspects are prospection, collection and storage together with slope protection and reforestation in a large scheme started in 1976. Water use in state and private small-scale irrigated areas is based on vegetables, cassava and bananas rather than sugar cane. The cost of water is high because of technical problems. Moreover, organisation of agro-economic and horticultural back-up services is inadequate and reduces overall productivity of operations. The limited national market has led to marketing difficulties. There are few outlets on the international market. Overall, increasing the production of irrigated farming cannot solve the problem of food supplies in Cape Verde.

KEY WORDS: Cape Verde Islands, Sahel, rural development, irrigated perimeter, dry season crops.

P. MILLEVILLE, SAHEL CONDITIONS AND HERD MOVEMENTS (OUDALAN, BURKINA FASO).

In their management of cattle movements, Sahelian herders must cope with highly fluctuating and unpredictable climatic conditions which play a critical role in determining the temporal and spatial distribution of forage resources in the Sahel. Traditional pastoralism in this region relies to a great extent on mobility to allow herds optimum access to this ephemeral and unpredictable resource. Herd movements are determined, on both seasonal and daily time scales, by the availability of forage resources at given any moment.

In the Oudalan region in the South Sahelian zone of Burkina Faso, details of herd movements are determined by spatial heterogeneity of water points and forage resources, human settlements, and the highly variable role played by animal husbandry in forming systems. In the context of the increasing human presence and pressure on this region undergoing progressive degradation, traditional practices based on large scale herd movements are tending to disappear. The majority of livestock herds are increasingly confined to smaller and smaller areas, while husbandry systems are becoming ever more fragile and vulnerable to environmental disturbance.

KEY WORDS: livestock movements, desertification, climatic variations, Sahel.

E. BERNUS, PASTORAL WATER DEVELOPMENT AND RANGELAND MANAGEMENT.

In the Sahel, current water policies tend to divide rangelands into discrete zones or stations, each grouped around deep wells equipped with motor pumps. The development projects responsible for these wells vary in accordance with soil conditions on the one hand and the objectives of the host country on the other. Both Senegal and Niger have been the sites of numerous such projects and the consequences of water projects in both countries are discussed. Excessive concentration of livestock, degradation of standing vegetation, and the desertification of the surrounding rangeland are examined, as well as the behaviour of animal herders.

KEY WORDS: water development, rangeland, livestock, Sahel, desertification.

C. MONCHALIN, WATER POLICIES IN SUDANO-SAHELIAN AFRICA.

Water is a scarce resource in the arid and semi-arid regions of the Sudano-Sahelian zone of Africa and rational use is therefore a high priority. Political policies for the use of water for agriculture is a prime requirement. These policies should govern the initiation and financing of agricultural projects and determine the institutional organisation and legislation for water use in agriculture. Two principal areas of concern are (1) water policy for agriculture and (2) pumping policy for water for grazing livestock. Many development alternatives are possible for the first point; needs are considerable and include the intensification of rainfed crops, improved soil and water conservation, sustained rational use of surface water in natural depressions (marshland) and thalwegs and improved use of water in irrigated agriculture. There are also numerous problems and requirements for livestock (point 2). Recent increased demand for water related to population growth and progressive expansion of production areas have led to greater integration of crop and farming and animal husbandry. The establishment of wells and watering points in traditional pastoral areas is a delicate problem and must take into account fluctuations in the availability of grazing resources as well as the capacity of specific land. In short, there is an urgent need for the creation of a coherent political plan to integrate the various water requirements in the Sudano-Sahelian region and to formulate precise rules for water use in each individual case.

KEY WORDS: Water management, aridity, water legislation, agricultural water development.

Ouvrage réalisé en PAO
Flashage : Flash Espace - *Montpellier*
Photogravure : Atelier 6 - *Montpellier*

IMPRIMEUR - 70000 Vesoul - FRANCE
84 96 75 00

Achevé d'imprimer en mars 1992
Dépôt légal n° 3912

L'ARIDITÉ

UNE CONTRAINTE AU DÉVELOPPEMENT

CARACTÉRISATION
RÉPONSES BIOLOGIQUES
STRATÉGIES DES SOCIÉTÉS

ARIDITY
a developpement constraint

Characterisation
biological responses
strategies of societies

Cet ouvrage collectif, rédigé à l'initiative du réseau zone aride, regroupe des résultats de travaux de recherche relatifs aux zones arides et entrepris dans des situations géographiques variées par diverses disciplines scientifiques. Les quarante-quatre auteurs relèvent, en France ou dans les pays en voie de développement, d'une douzaine d'organismes de recherche, d'universités ou de services plus proches du développement.

Cet ouvrage s'adresse à la communauté scientifique élargie (chercheurs, formateurs et décideurs en matière de développement). Les objectifs qui lui ont été assignés étaient de montrer la diversité des zones arides, de caractériser l'aridité, ses manifestations et ses conséquences pour le développement et enfin de mettre en relief les solutions adoptées par les populations et les États pour tenter de contourner cette contrainte.

L'ouvrage est subdivisé en trois parties, chacune d'entre elles étant introduite par une brève synthèse des articles qu'elle contient et du thème abordé. Ces trois parties sont dans l'ordre : aridité climatique, aridité édaphique à différentes échelles de temps et d'espace ; interactions des facteurs du milieu et réponses biologiques à l'aridité ; stratégies des sociétés et des États.

Les zones géographiques étudiées se situent au Moyen-Orient, dans le nord, l'est et l'ouest de l'Afrique, en Amérique latine et du Nord.

This multi-author work written at the initiative of the réseau zone aride assembles the results of research on arid zones performed at a variety of sites in a range of scientific disciplines. The 44 authors are from a dozen research institutes, universities or development-relative organisations in France and in developing countries.

It is intended for the scientific community in the broad sense (researchers, teachers and decision-makers in development). The objectives assigned to it were to show the diversity of arid zones, to describe aridity, its features and the consequences for development and finally to highlight the solutions adopted by populations and states to attempt to overcome the problem.

The book is in three parts, each introduced by a short synthesis of the articles that it contains and the subject covered. The three parts are: climatic aridity and edaphic aridity on different scales of time and space; interactions between environmental factors and biological responses to aridity; strategies developed by societies and states.

The geographical areas discussed are in the Middle East, North, East and West Africa, Latin America and North America.

ISSN 1142-2580

ISBN 2-7099-1068-3

ORSTOM,
213 rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10
Éditions, diffusion : 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex

Avec la participation du COMITÉ FRANÇAIS DU MaB

DIDACTIQUES

Qui vise à instruire. Qui appartient à la langue des sciences et des techniques