



SOLS ET EAUX
ACQUIS ET PERSPECTIVES
DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE FRANÇAISE
EN ZONE INTERTROPICALE

A 26238 -
A 26262
EX 3

mai 1986

SOLS ET EAUX

ACQUIS ET PERSPECTIVES

DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE FRANÇAISE

EN ZONE INTERTROPICALE

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : F.24238-4-3

Cpte : A

ACTES DU SÉMINAIRE
TENU A LA BANQUE MONDIALE
LES 15 ET 16 MAI 1986

LES TRAVAUX PÉDOLOGIQUES
ET LES ÉTUDES DES
MILIEUX PHYSIQUES RÉALISÉS PAR LES
ORGANISMES FRANÇAIS DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
DANS LES RÉGIONS CHAUDES

PEDOLOGIC WORK AND STUDIES
OF PHYSICAL ENVIRONMENTS
CARRIED OUT BY FRENCH RESEARCH ORGANIZATIONS
FOR THE DEVELOPMENT OF TROPICAL REGIONS

GEORGES PÉDRO
INRA-ORSTOM

JEAN KILIAN
CIRAD

•
P. 5

FERTILITÉ DES SOLS ET FERTILISATION
DES CULTURES TROPICALES
L'EXPRÉRIENCE DU CIRAD ET DE L'ORSTOM

SOIL FERTILITY AND FERTILIZATION
OF TROPICAL CROPS
THE EXPERIENCE OF CIRAD AND ORSTOM

CHRISTIAN PIERI
CIRAD

ROLAND MOREAU
ORSTOM

•
P. 67

L'ÉVALUATION ET L'UTILISATION
DES RESSOURCES EN EAU
DES RÉGIONS SEMI-ARIDES
ET INTERTROPICALES

ASSESSMENT AND UTILIZATION OF
WATER RESOURCES IN SEMI-ARID
AND INTERTROPICAL AREAS

P. DUBREUIL
ORSTOM-CIRAD

•
P. 93

MÉTHODES, ACQUIS ET PERSPECTIVES
DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE FRANÇAISE
EN ZONE INTERTROPICALE
DANS LE DOMAINE DE L'UTILISATION AGRICOLE
DE L'EAU

METHODS, ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS
OF FRENCH AGRICULTURAL RESEARCH IN
INTERTROPICAL ZONES: THE AGRICULTURAL
USE OF WATER

J.C. LE GOUPIL
CIRAD

M. ELDIN
ORSTOM

•
P. 155

© ORSTOM 1987
ISBN 2-7099 0856-5

ÉDITÉ AVEC LE CONCOURS DU
MINISTÈRE FRANÇAIS DE LA COOPÉRATION

La traduction anglaise de ce document a été assurée par les services de la Banque Mondiale.

Parmi les pays industriels du nord, la France occupe une position unique par le système complexe de recherches orientées vers le développement des régions chaudes du globe dont elle dispose. Au total, 6 organismes, dont 2 à vocation spécifique, le CIRAD et l'ORSTOM, et 5 000 chercheurs, techniciens et administratifs participent à ces programmes.

Au niveau international, un système comparable existe pour la recherche agricole sous le parrainage de la Banque Mondiale, de l'OAA et du PNUD. C'est le système des Centres Internationaux de Recherche Agricole (CIRA) orientés essentiellement vers les productions vivrières.

Le système français a principalement travaillé en Afrique depuis le début du xx^e siècle. C'est sur ce continent que les problèmes de développement des productions agricoles sont aujourd'hui les plus pressants.

Il était donc logique que la Banque Mondiale, prenant d'importantes initiatives pour aider au renforcement des structures nationales africaines de recherche agronomique et la France se concertent.

Une première réunion de concertation, qui s'est tenue en juillet 1985 à Paris, décide d'établir des relations plus étroites entre les CIRA et le système français. En effet, le système français de recherches, dont l'originalité réside entre autres dans une forte spécialisation dans le vaste domaine des sciences de l'environnement, croise et complète harmonieusement les dispositifs classiques de recherches agricoles par productions.

C'est ainsi qu'une seconde réunion de concertation s'est tenue en mai 1986 à la Banque Mondiale à Washington. Le thème principal en était l'exposé des compétences françaises en matière d'évaluation des connaissances et d'utilisation des ressources en eaux et en sols.

C'est exposé a permis au CIRAD et à l'ORSTOM de présenter pour la première fois depuis plus de 40 ans et de manière synthétique et condensée les connaissances acquises dans ces deux domaines des eaux et des sols ainsi que les méthodes d'évaluation des ressources et leurs techniques d'utilisation assurant une nécessaire conservation des milieux, garantie d'une stabilité à long terme des productions agricoles.

A cette volonté de concertation et de mise en œuvre de synergies internationales correspond un effort français dans le domaine de l'Information Scientifique et Technique. La présente publication, qui rassemble les quatre documents constituant les actes du séminaire qui s'est tenu à Washington, en est une illustration au moment où les pays du nord et du sud collaborent plus étroitement au développement des régions les plus déshéritées. Mettre l'accent sur la diffusion de l'information et la communication des connaissances accroît l'efficacité des apports de la recherche au développement.

Les quatre documents présentés ici éclairent particulièrement les décideurs et les aménagistes sur les outils d'analyse que la recherche française a élaborés tant sur le plan général des ressources et de l'environnement que sur celui de l'aide à la production agricole.

Des bibliographies particulièrement sélectionnées et des annexes illustrées complètent ces documents de synthèse. Elles en font des instruments de travail et de réflexion pour tous ceux qui ont en charge le développement des régions chaudes du globe.

LES TRAVAUX PÉDOLOGIQUES
ET LES ÉTUDES DES
MILIEUX PHYSIQUES RÉALISÉS PAR LES
ORGANISMES FRANÇAIS DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
DANS LES RÉGIONS CHAUDES

GEORGES PÉDRO
INRA-ORSTOM

JEAN KILIAN
CIRAD

P. 7 ■ INTRODUCTION ■ P. 9 ■ MÉTHODES D'ÉTUDES PÉDOLOGIQUES - NATURE ET ÉVOLUTION / INVENTAIRE TYPOLOGIQUE ET ZONAGE GÉOGRAPHIQUE / INVENTAIRE PÉDOLOGIQUE ET CARTOGRAPHIQUE / ÉTUDE DES SYSTÈMES PÉDOLOGIQUES / APPROCHES PAR LA DYNAMIQUE ACTUELLE / INTRODUCTION DE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE ■ P. 19 ■ PRINCIPAUX APPORTS • CARTOGRAPHIE / ÉCHELLE CONTINENTALE / ÉCHELLE RÉGIONALE / ÉCHELLE PAYSAGIQUE ET PARCELLAIRE • AUTRES TRAVAUX PÉDOLOGIQUES / ÉTUDES HYDROPÉDOLOGIQUES-DÉGRADATION ET CONSERVATION DES SOLS / ÉTUDES DE MILIEUX PARTICULIERS : BAS-FONDS - MILIEUX FLUVIOMARINS - SOLS SALÉS / TÉLÉDÉTECTION SPATIALE ■ P. 28 ■ PERSPECTIVES ET ORIENTATIONS DES RECHERCHES / MÉTHODES À UTILISER ET À DÉVELOPPER / MILIEUX À ÉTUDIER / PROGRAMMES À POURSUIVRE ET À INITIER ■ P. 29 ■ RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES / POTENTIELS DES PÉDOLOGUES FRANÇAIS INTERVENANT DANS LES RÉGIONS CHAUDES / ACTION DE FORMATION EN PÉDOLOGIE RÉALISÉE EN FRANCE DEPUIS 1950 / DOCUMENTATION DISPONIBLE DANS LES ORGANISMES FRANÇAIS ■ P. 32 ■ CONCLUSIONS ■ P. 34 ■ BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE ■ P. 37 ■ ANNEXES

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : F. 24239
Cpte : ~~1000~~ 3

Seminar on french agronomic research in the tropics

PEDOLOGIC WORK AND STUDIES

OF PHYSICAL ENVIRONMENTS

CARRIED OUT BY FRENCH RESEARCH ORGANIZATIONS

FOR THE DEVELOPMENT OF TROPICAL REGIONS

GEORGES PÉDRO
INRA-ORSTOM

JEAN KILIAN
CIRAD

P. 7 ■ INTRODUCTION ■ P. 9 ■ PEDOLOGIC RESEARCH METHODS / TYPOLOGIC SOIL INVENTORY AND GEOGRAPHIC ZONING / CARTOGRAPHIC INVENTORY / STUDIES OF PEDOLOGIC SYSTEMS AT LOCALIZED SITES / PRESENT-DAY (HYDRO)DYNAMICS STUDIES / REMOTE SENSING AND KNOWLEDGE OF AGRICULTURAL AREAS ■ P. 19 ■ MAIN CONTRIBUTIONS / CARTOGRAPHY / OTHER PEDOLOGICAL STUDIES ■ P. 28 ■ RESEARCH ORIENTATIONS AND PERSPECTIVES / RESEARCH METHODS / RESEARCH ENVIRONMENTS / PRIORITY PROGRAMS ■ P. 30 ■ SUPPLEMENTARY INFORMATION / POTENTIAL FOR FRENCH PEDOLOGISTS / PEDOLOGY TRAINING OF FOREIGN PEDOLOGISTS IN FRANCE SINCE 1950 / DOCUMENTATION ON SOILS ■ P. 32 ■ CONCLUSIONS ■ P. 34 ■ GENERAL BIBLIOGRAPHY ■ P. 37 ■ APPENDIXES

World bank Washington • 15/16 may 1986

Introduction

Le sol étant l'*interface* privilégié entre l'homme et la planète, sa connaissance importe au premier chef l'humanité, principalement pour tout ce qui touche aux problèmes d'alimentation. N'oublions pas ce que disait le grand agronome français de la fin du XVI^e siècle, Olivier de Serres, dans son livre « Théâtre de l'Agriculture et Mesnage des champs » : « le fondement de l'agriculture est la connaissance du naturel des terroirs que nous voulons cultiver ». Or, ceci est vrai partout, non seulement pour les pays connus et développés des latitudes moyennes, mais aussi pour les pays peu connus et en développement des régions chaudes (climats tropicaux et subtropicaux-méditerranéens) qui nous concernent plus spécialement ici.

C'est ce qui a conduit les responsables français de la recherche et du développement à promouvoir, dès la fin de la dernière guerre, des études sur les sols dans ces régions. Elles ont été réalisées dans le cadre de l'ORS-TOM (1) créé spécialement en 1944 à cette intention (et sous la direction de G. Aubert), des Instituts Techniques regroupés maintenant au sein du CIRAD (2) et aussi, pour une petite partie, par l'INRA (3) dont la mission essentielle concerne le territoire métropolitain mais qui a une antenne aux Antilles-Guyane.

Le déroulement des travaux s'est fait grosso modo en 3 étapes :

- avant 1960, il s'est agi essentiellement de travaux exploratoires à base, soit de reconnaissances à grand rayon d'action, soit au contraire d'études très ponctuelles ; ils étaient réservés essentiellement aux pays francophones d'Afrique méditerranéenne, Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale, Madagascar, Antilles-Guyane et enfin Pacifique (Nouvelle Calédonie, Polynésie...);
- après 1960 et jusque vers 1975, l'indépendance des anciennes colonies a conduit à une extraordinaire intensification des recherches françaises pour le développement dans le secteur pédologique : la connaissance de la distribution des sols devenant en effet le facteur *clé* en vue d'opérations accélérées d'aménagement et de mise en valeur de pays, somme toute, encore peu connus sur le plan des potentialités naturelles. Cela a correspondu à l'époque des « conventions » qui, quoique contraignantes par certains aspects, ont permis toutefois de faire *en même temps* de la science et du développement, sans aucune entrave qu'elle soit d'ordre politique ou financière ;

(1) INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION 213, RUE LA FAYETTE 75480 PARIS CEDEX 10

(2) CENTRE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT 42, RUE SCHEFFER 75016 PARIS

(3) INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 145 RUE DE L'UNIVERSITÉ, 75007 PARIS

Introduction

Soils represent the *interface* between man and his planet; they are of fundamental importance in that they are his principal source of food. In his book "Théâtre de l'Agriculture et Mesnage des Champs", Olivier de Serres, the famous 16th century French agronomist said: "... the foundation of agriculture is a knowledge of the soils which we wish to cultivate". This statement is universally true, not only in the developed countries of the middle latitudes, but also in the lesser-known developing countries of the tropical and Mediterranean subtropical regions which are particularly concerned by this article.

Since 1945 this has been the motivation behind the studies carried out in these regions by French research institutes and development organizations: the ORS-TOM (1), specially created in 1944 for this purpose under the direction of G. Aubert, the various technical institutes of the CIRAD (2) and, to a lesser extent, the INRA (3), whose principal region of activity is continental France and also French Guyana and the French West Indies.

The history of this post-war work includes three principal phases:

- Before 1960: exploratory work involving either localized studies or the reconnaissance of large areas. This work essentially involved the French-speaking countries of North, West and Central Africa, Madagascar, Guyana, the French West Indies and also the French Pacific islands (New Caledonia, Polynesia, etc).
- 1960 to 1975: the independence of the French colonies stimulated great intensification of pedologic research, since a knowledge of the spatial distribution of the soils became a *key* factor in the development of these countries whose natural resources were little known. This was the period of "cooperation agreements" (projects) which, although sometimes limited in their scope, allowed both basic scientific research and development work to proceed *simultaneously* without financial or political constraint.
- 1975 onwards: the creation of local pedologic services in the old colonies led to a decrease in demand for French participation, which in turn led to a redeployment of French research workers: some teams remained in the former colonial territories, carrying out basic research or adopting a training role in the national research organizations; others extended their activities to other tropical regions such as Latin America, Asia and non-French Africa.

Figure 1 shows the countries in which French pedologists (of all the French research organizations) have worked, either in permanent missions or intervening at least once a year; the list of countries and territories (64 in all) is as follows:

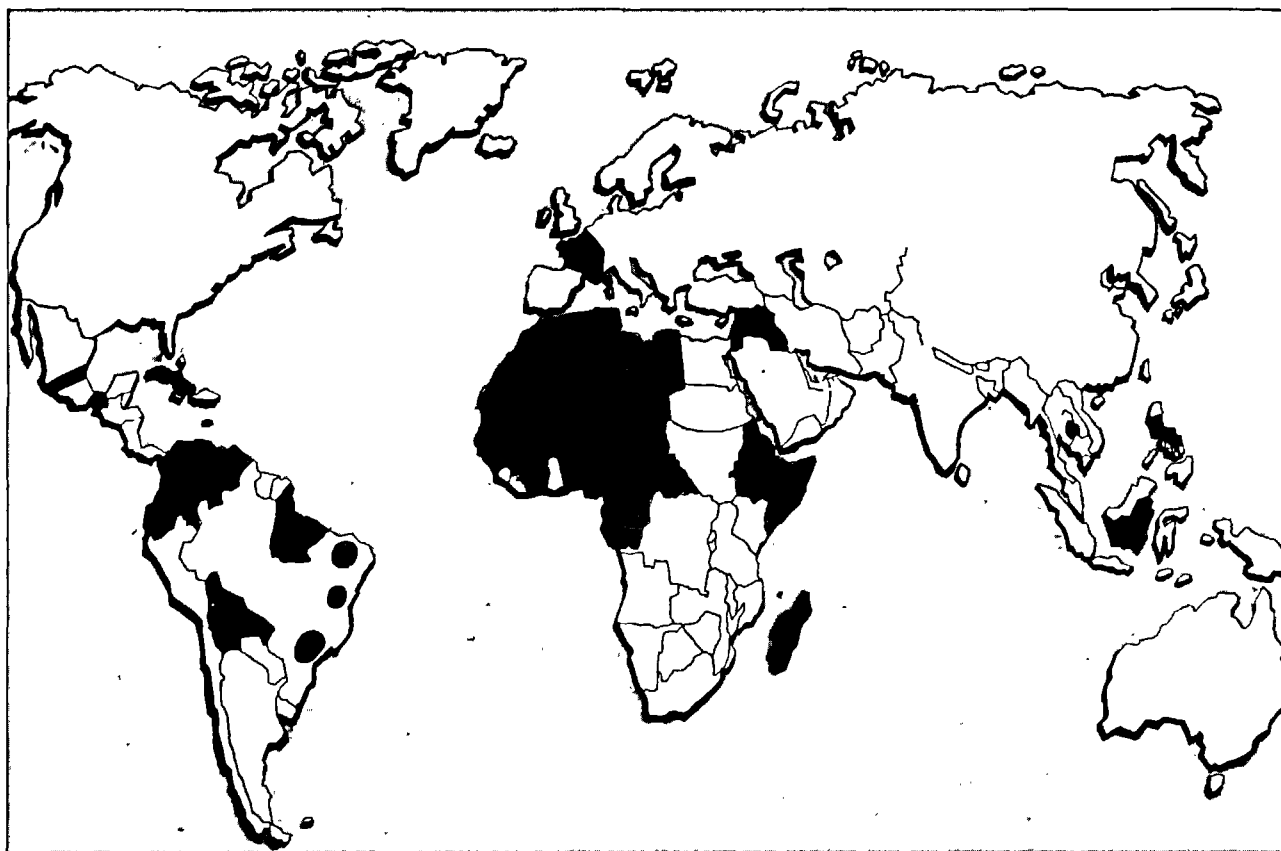


Fig. 1. Zones d'intervention pédologique (1934-1984)
Pedological areas of operation (1934-1984)

• à partir des années 1975, la mise en place dans les divers pays des Services pédologiques nationaux a abouti à une diminution progressive de la demande vis-à-vis des opérateurs français. Ceux-ci ont donc été amenés à un redéploiement de leur effectif qui s'est traduit de la manière suivante :

– maintien d'une partie des équipes au sein des anciens territoires conduisant essentiellement des travaux de recherches et des opérations de formation sur les fonds propres des Organismes ;

– ouverture vers beaucoup d'autres pays de la zone chaude : Afrique non francophone, mais aussi Amérique Latine et Asie.

La carte jointe (fig. 1) donne une idée des zones d'intervention des pédologues français sur les divers lieux de la planète.

La liste des pays (64) ou des territoires ayant donné lieu à des études pédologiques, tous organismes confondus, soit sous forme d'affectations permanentes, soit sous forme d'interventions au moins annuelles, est la suivante :

Méditerranée : Algérie, Tunisie, Maroc, Libye, Egypte, Liban.

Afrique : Mauritanie, Sénégal, Mali, Niger, Burkina Faso, Tchad, Guinée, Côte d'Ivoire, Togo, Bénin, Cameroun, Centre Afrique, Gabon, Congo, Zaïre, Rwanda, Madagascar et Comores, Maurice et Réunion, Djibouti, Ethiopie, Somalie, Soudan, Angola, Nigéria, Kenya, Malawi, Zambie, Ghana, Sierra Leone, Liberia.

Mediterranean: Algeria, Tunisia, Morocco, Libya, Egypt, Lebanon.

Africa: Mauritania, Senegal, Mali, Niger, Burkina Faso, Chad, Guinea, Ivory Coast, Togo, Benin, Cameroon, Central African Republic, Gabon, Congo, Zaire, Rwanda, Madagascar and Comores, Maurice and Reunion, Djibouti, Ethiopia, Somalia, Angola, Nigeria, Kenya, Malawi, Zambia, Ghana, Sierra Leone, Liberia, Sudan.

Middle east: Syria, Irak, Iran, Saudi Arabia.

Asia: Indonesia (Kalimatan), Thailand, Laos, Cambodia, Vietnam, India (Pondichery).

Pacific: New Caledonia, Polynesia, Vanuatu (New Hebrides), Fiji.

Caribbean: Martinique, Guadeloupe, Grenada, Saint Lucia, Haiti, Cuba.

Latin America: Guyana, Brazil, Bolivia, Peru, Ecuador, Venezuela, Panama, Nicaragua, Mexico.

A very large number of studies have been carried out. However, it is not easy to provide a complete list because the work is spread over a period of 40 years during which our knowledge of the regions studied and of the science of pedology itself has undergone major evolution.

Also, the countries involved display enormous diversity, even though they all have warm climates: there is little in common between the characteristic pedogenesis of the African and Brazilian shields and that which develops over limestone formations in the Mediterranean, or in the vol-

Moyen Orient : Syrie, Irak, Iran, Arabie Saoudite.
Asie : Indonésie (Kalimatan), Thaïlande, Laos, Cambodge, Vietnam, Inde (Pondichery).
Pacifique : Nouvelle-Calédonie, Polynésie, Vanuatu (Nouvelles-Hébrides), Fidji.
Caraïbes : Martinique, Guadeloupe, Grenade, Sainte-Lucie, Haïti, Cuba.
Amérique Latine : Guyane, Brésil, Bolivie, Pérou, Equateur, Venezuela, Nicaragua, Panama, Mexique.

Au total, un grand nombre de travaux ont été effectués. Toutefois, le bilan n'est pas aisé à réaliser. Ceci résulte du fait :

- d'abord qu'ils s'étalent sur une quarantaine d'années au cours desquelles nos connaissances sur les milieux étudiés et sur la science pédologique ont beaucoup évolué ;
- en second lieu qu'ils concernent des pays qui peuvent être très différents bien qu'appartenant pratiquement tous à la zone chaude ; il n'y a en effet rien de commun entre les pédogenèses caractéristiques des boucliers africain et brésilien, et celles développées :
 - soit sur calcaire dans les régions méditerranéennes,
 - soit dans les zones volcaniques des Caraïbes, Andes et Pacifique,
 - soit au sein des milieux marginolittoraux des Tropiques.

Dans ces conditions, et en raison aussi du faible volume assigné à ce Rapport, il apparaît difficile d'être exhaustif. Il sera donc présenté une sorte de panorama mettant essentiellement en exergue les méthodes, idées et résultats concernant l'étude des sols réalisée par les Organismes français dans les régions chaudes du Globe (Les exemples seront reportés dans une série d'Annexes). Il sera fait état ensuite des perspectives actuelles, des potentialités, des axes prioritaires, ainsi qu'un certain nombre de données portant sur la formation d'ingénieurs et techniciens en pédologie tropicale, et sur la documentation disponible relative aux travaux réalisés par les Organismes français dans ces régions du Monde.

Méthodes d'études pédologiques - nature et évolution

Les données pédologiques dont il va être question ici concernent les régions chaudes du Globe, et en particulier celles de l'Afrique tropicale. Le choix de ce Continent ne résulte pas toutefois du fait qu'il a été plus spécialement étudié par les chercheurs français ; il tient surtout à des raisons scientifiques. En effet, sur les socles cristallins intertropicaux, la caractérisation pédologique a impliqué la mise en œuvre d'approches très spécifiques qu'il a fallu forger au fur et à mesure des prospections. Il ne s'agissait donc pas d'appliquer la science pédologique conçue en zone tempérée pour décrire et comprendre le milieu superficiel ; il fallait en quelque sorte créer celle-ci à tous les niveaux d'investigation, que ce soit l'inventaire des objets, l'étude de leur répartition dans l'espace, la détermination des processus mis en jeu, le décryptage des mécanismes... Les opérations réalisées dans ce contexte ont été de ce fait, *toutes et toujours*, des opérations de *recherche* au sens strict du terme. Dans le même temps, il fallait aussi aborder la cartographie du milieu physique en vue de l'identification des problèmes que pose son *utilisation agricole*, de façon à être en mesure de résoudre ces problèmes dans le cadre de systèmes de culture et d'aménagement des terres.

canic regions of the Andes, Caribbean or Pacific, or in the littoral areas of the tropics.

For these reasons and owing to the limits of space in the present document, it is not possible to be exhaustive. Therefore, we shall present a panoramic description of methods, ideas and results of soil studies made by French organizations in the warm areas of the globe; examples are included in a series of appendixes.

We shall also discuss current research orientations, their potentials and their priorities. Finally, we shall mention the available literature on French pedological work and also the training program for tropical pedologists.

Pedologic research methods

The pedologic studies which are the subject of this document concern the warm regions of the globe, tropical Africa in particular. The choice of the latter is for sound scientific reasons and not simply because it has been the principal region studied by French researchers. The characterization of soils on the intertropical crystalline basements in Africa has required the continuous development of specific techniques: it was not possible simply to apply pedologic methods use to describe land surface environment in temperate regions. At all levels of research, new methods had to be conceived whether for inventorial work, studies of spatial distributions, identification of processes at work or the explanation of their mechanisms. Consequently, in tropical Africa, all projects involve very basic research.

At the same time, cartographic studies were necessary in order to identify problems arising from agricultural use of land and to propose methods of improving and conserving soils.

The benefits of this work were obtained through five main types of activity, characterized by their particular methods and hypotheses. The list below shows these activities in approximate chronological order of their development; any of them may still be used today in a particular region or for a particular problem:

1. Typologic soil inventory and geographic zoning.
2. Cartographic inventory.
3. Studies of pedologic systems at localized sites.
4. Studies of present-day (hydro)dynamics.
5. Remote sensing and studies of agricultural environments.

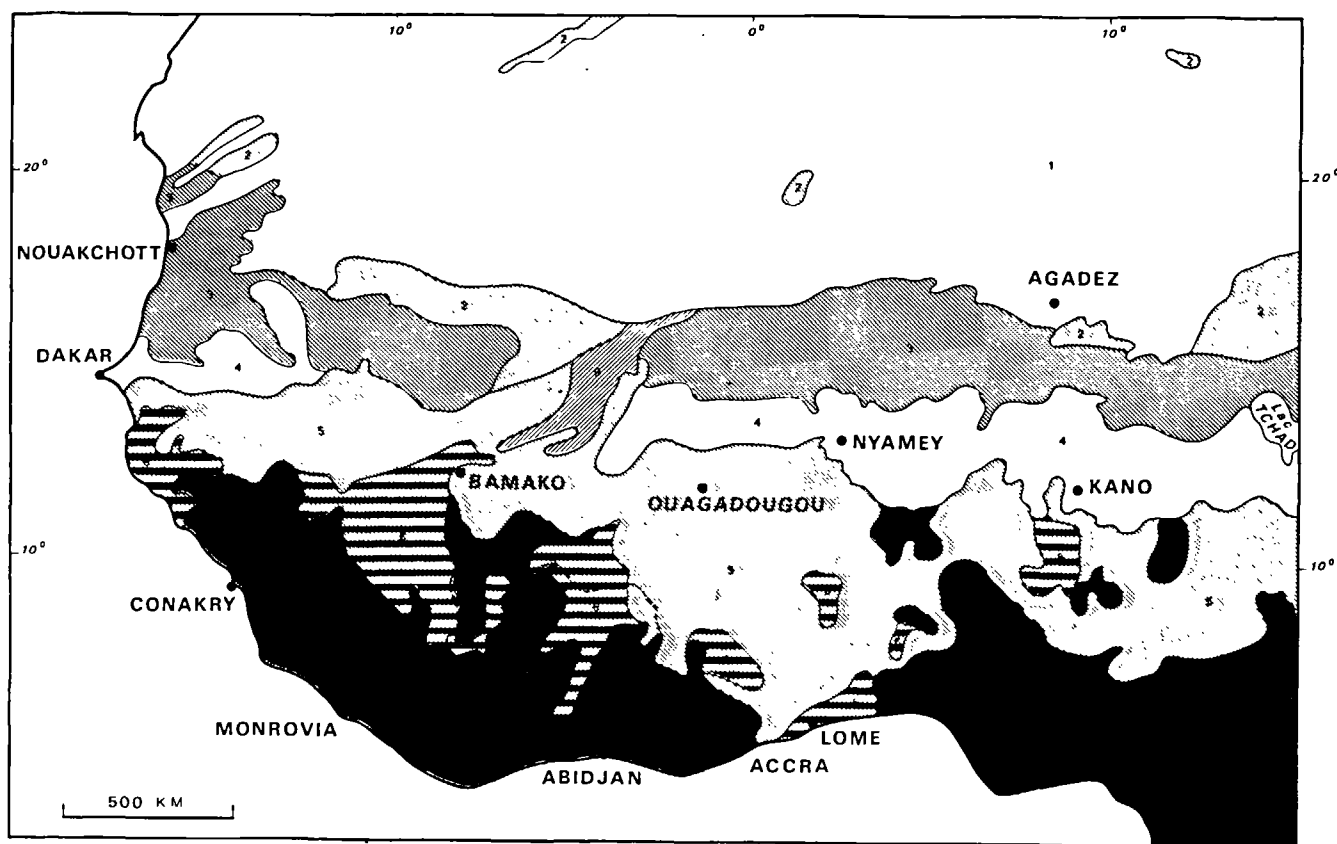


Fig. 2. Carte générale des sols de l'Afrique de l'Ouest
 General map of soils of west africa

LEGENDE

- 1 Soils minéraux bruts des déserts
- 2 Soils peu évolués subdésertiques
- 3 Soils isohumiques (soils bruns subarides ; soils brun-rouge subarides)
- 4 Soils ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés
- 5 Soils ferrugineux tropicaux lessivés
- Association de soils ferrugineux tropicaux lessivés et de soils ferrallitiques
- Soils ferrallitiques faiblement et moyennement désaturés
- Soils ferrallitiques fortement désaturés
- Soils hydromorphes

En partant de ces éléments et en simplifiant les choses, l'apport pédologique a été le fruit de cinq grandes étapes caractérisées chacune par des méthodes et des hypothèses de travail particulières. Grosso modo l'ordre retenu sera chronologique, étant bien entendu qu'à l'heure actuelle et *mutatis mutandi* les diverses approches peuvent encore être utilisées suivant le problème qui se pose ou encore la région à étudier.

1. Inventaire typologique et zonage géographique.
2. Inventaire pédologique et cartographie.
3. Étude des systèmes pédologiques.
4. Approche par la dynamique actuelle.
5. Introduction de la télédétection spatiale et connaissance des milieux agricoles.

Inventaire typologique et zonage géographique

Ces investigations résultent de reconnaissances *extensives* effectuées en s'appuyant sur les notions classiques de la pédologie de Dokouchaev :

- l'existence de la notion de *type de sol* en accord avec les conditions du milieu et en particulier les facteurs *externes*, bioclimatiques notamment ;
- la *répartition latitudinale* des sols, ce qui est l'essence même de la *loi de la zonalité*.

A partir de là, en s'appuyant sur des considérations génétiques et sur une classification typologique (taxonomie) toutes deux en gestation, on a tenté de rechercher quels étaient les sols caractéristiques, de dresser ensuite un *catalogue* des grands types de sols tropicaux et de proposer enfin un *zonage* de ces sols en fonction des conditions bioclimatiques (depuis la forêt dense au désert par exemple).

Cette méthodologie s'appuie donc sur une lecture *stricte* de la pédologie et aboutit à dresser un canevas géographique de la distribution des sols-types.

La carte des sols de l'Afrique de l'Ouest, telle qu'elle a été réalisée par les pédologues français pour l'Atlas international de cette région, est une application de cette méthodologie (fig. 2).

Inventaire pédologique et cartographie

Lorsque l'on quitte le domaine purement géographique pour aborder l'aspect *spatial* des problèmes pédologiques, c'est-à-dire la répartition des sols (de *tous* les sols) dans le paysage, la méthodologie précédente devient tout à fait insuffisante. Très vite en effet, en Afrique, devant la complexité du milieu et la durée des phénomènes pédologiques, on a été amené à faire intervenir des paramètres géomorphologiques et à proner une lecture plus *large* des problèmes pédologiques. Par ailleurs, en vue d'une cartographie visant à la connaissance du milieu physique et débouchant sur des propositions pour la mise en valeur et l'aménagement des terres, la Pédologie envisagée avant tout sous l'angle typologique ne pouvait prétendre répondre, seule, à toutes ces questions ; la résolution de ces problèmes nécessitant une approche interdisciplinaire essentiellement basée sur l'étude des interactions, des interdépendances procurant au milieu physique sa dynamique d'évolution. La priorité a été axée sur les liaisons Géomorphologie-Pédologie-Expérimentation Agricole. Il s'agit alors des *cartes morphopédologiques* mises au point par J. Kilian et J. Tricart, et par d'autres V. Eschenbren-

Typologic soil inventory and geographic zoning

This work involved extensive reconnaissance based on Dokouchaev's classic concepts of pedology:

- the existence of *soil types* determined by the environmental conditions, in particular external (principally bioclimatic) factors ;
- the *latitudinal distribution of soils*, which is the central idea of the *law of zonality*.

Using these ideas, and taking into account genetic considerations and using a typologic classification system (taxonomy), both of which were evolving, a *catalog* of major tropical soil types was drawn up together with a zoning of these soils as a function of bioclimatic conditions – from the dense forest to the desert.

In other words, the methodology used is based on strictly pedologic observations and yields a general geographic description of soil distribution.

The soil map of West Africa prepared by French pedologists for the International Atlas of this region was one product of this method (fig. 2).

Cartographic inventory

The methodology previously described is adequate for purely geographical work but quite unsuitable for the study of soil distribution within the landscape. In Africa, owing to the age and complexity of pedologic phenomena, it soon became clear that geomorphologic parameters need to be taken into account and that a broader interpretation of pedology was necessary. Furthermore, it was realized that pedology alone would be incapable of providing the detailed soil maps needed for the land use and management of soils: an interdisciplinary approach was needed based on the study of the interactions and interdependencies influencing the evolution of soils. Priority was given to the related areas of geomorphology, pedology and experimental agriculture. This led to the publication of the *morphopedologic maps* of Kilian and Tricart and of Eschenbrenner, Chatelin and Beaudou, etc. The need to identify the distribution of soil types both in space and time means that traditional pedology, which generally provides only a genetic classification of soils, becomes totally inadequate. Although typologic pedologic continues to provide a general indication of the type of cover, the use of pedologic taxonomy as a source of soil maps has now been abandoned completely by French researchers in the tropics.

Given a better understanding of the spatial distribution of the physical environment and of the processes which shape it, agronomic experiments can be performed in soils which are known to be representative of specific soil types. In addition, a finer knowledge of the environment allows the identification of factors likely to limit the exploitation of the land. Agronomic research programs can then be specialized to particular "types" of environment. The concept of representativity is extended by that of the

ner, Y. Chatelin et A.G. Beaudou... Dans cette optique, les sols devant être positionnés *à la fois dans l'espace et dans le temps*, les règles de la pédologie classique, dont l'expression la plus courante se fait sous la forme de classification génétique, deviennent totalement inadéquates. Si la typologie pédologique reste une référence indicatrice de l'état pédologique de la couverture observée, la taxonomie pédologique comme forme d'expression cartographique ne répond pas au but recherché et tend aujourd'hui à être abandonnée par les chercheurs français du monde tropical.

Grâce à cette approche, le milieu physique et les mécanismes qui le façonnent étant mieux perçus et délimités spatialement, l'expérimentation agronomique peut être convenablement implantée sur des terres caractéristiques : la représentativité est de la sorte mieux évaluée et mesurée. En outre, la connaissance du milieu physique débouche sur la mise en lumière des contraintes majeures qui limitent les possibilités d'aménagement. Il devient possible de définir les thèmes de recherches agronomiques adaptés à un « type de milieu » donné : la notion de représentativité se prolonge par celle d'adaptation des thèmes qui doit elle-même déboucher sur l'aménagement proprement dit.

En Afrique, à l'échelle continentale, on a pu ainsi montrer que les formations pédologiques pouvaient être d'âge *différent*. En partant des niveaux les plus âgés et en même temps les plus élevés, on distingue :

- les formations cuirassées, ferrugineuses et aluminoferrugineuses,
- les surfaces d'aplanissement correspondant aux modèles fonctionnels,
- les accumulations éoliennes récentes (ergs fixés) et même subactuelles (dunes actuelles).

D'un autre côté, si l'on se place à une échelle plus régionale et en particulier au sein d'une unité déterminée (par exemple sur les surfaces d'aplanissement où la pédogenèse est la mieux exprimée), on a été amené au cours de l'inventaire cartographique à constater deux choses :

- il pouvait exister des types de sols *autres* que les grands types « zonaux » décrits au cours des grandes reconnaissances : par exemple sols bruns eutrophes tropicaux, planosols, solonetz, vertisols... ;
- dans un contexte paysagique donné, la distribution des sols suivant la pente d'une séquence topographique (toposéquence) était toujours la même. Ainsi sur les glacis de la zone soudanosahélienne, on trouve invariablement la succession ordonnée : sol ferrugineux tropical, sol lessivé hydromorphe, sol planosolique, solonetz solodisé et vertisol (fig. 3).

C'est ce qui a conduit à l'étude détaillée de ces systèmes pédologiques en des sites bien localisés.

Étude des systèmes pédologiques en sites détaillés

Le point de départ de cette phase a été le suivant : à partir du moment où dans un paysage donné situé dans une zone morphologiquement stable, on trouve régulièrement les *mêmes* sols associés de la même manière, c'est que cette disposition résulte d'un déterminisme typiquement pédologique. Le propre des études a été alors d'établir ce déterminisme et d'établir les règles de la répartition pédologique latérale (pédogenèse amont et pédogenèse aval). G. Bocquier (1971) en a été l'initiateur

adaptation of topics which in turn leads to land use in the strict sense.

In Africa, at a continental scale, it has been shown that pedologic formations can be of *different* age: from the higher levels, where the oldest formations are found, to the lower levels we find:

- ferruginous and aluminoferruginous duricrusts;
- denudation surfaces corresponding to functional relief;
- recent eolian accumulations (fixed ergs) or even subrecent dunes.

On the other hand, at a regional scale and within a specific lithologic unit (for example, the denudation surfaces where the pedogenesis is most marked), the following observations have been made during cartographic work:

- types of soil *other than* the main "zonal" categories of the continental surveys may also exist: for example, sol-brun eutrophe tropical, Planosols, Solonetz, Vertisols, etc;
- in a given landscape, the succession of soils down the slope of a topographic sequence (toposequence) is always the same. For example, in the glacis of the sub-Saharan region, the same succession is invariably found: tropical ferruginous soil, hydromorphic soil, planosolic soil, solodized Solonetz and Vertisol (fig. 3).

These observations were the justification for detailed studies of pedologic systems at localized sites.

Studies of pedologic systems at localized sites

When the same soil sequences are regularly found in a given landscape, this results from a specific pedologic process. The purpose of the studies was therefore to identify the mechanisms involved and to establish the rules governing the upstream and downstream soil distribution. Bocquier (1971) started this work in the Chad basin where he showed that at a point in a toposequence the soil has passed or is in the process of passing from the leached state to Planosol, Solonetz and finally to Vertisol by upward spreading of the subjacent B horizon (fig. 3). In these conditions, the spatial distribution – both pedologic and geomorphologic – depends on the duration of the *internal* mechanisms.

The results is that the measured pedologic evolution derives above all from the hydric transfers within the soil (from the surface to the alteration layers), the volume, hydraulic head and direction each being significant.

Two general cases may arise: first, if the constitution and structure of the soil is *in phase* with the present-day hydric regime (determined by the climatic, topographic and edaphic conditions), the system is stable. The pedologic evolution may accelerate but without changing direction.

If however the soil and the prevailing hydric balance are not in phase, the pedologic regime becomes unstable and will be modified inevitably, first in its structure, then in its constitution. This will result in new soils whose characteristics will not stem from the application of the data of classical pedology.

Thus the study of pedologic systems at localized sites leads to the following conclusions:

- the type of soil is stable only when the pedogenetic processes and the pedohydric conditions are in correlation ;
- on the old African basement, where pedogenetic activity has existed for several hundred thousand years in the presence of multiple climatic changes, many soils are not

dans le bassin tchadien où il a montré qu'en un point d'une toposéquence, le sol est ainsi passé ou passera du stade lessivé au stade pansol, solonetz, puis vertisol par invasion remontante de l'horizon B (fig. 3). Dans ces conditions, la vision spatiale obtenue, à la fois pédologique et géomorphologique, dépend de la durée du fonctionnement interne du système.

D'une manière très générale, il résulte de ces éléments que, si toute évolution pédologique découle avant tout des transferts hydriques internes au sol (depuis la surface jusqu'aux horizons d'altération), et ce à différents points de vue : volume, charge et direction, deux cas en réalité se présentent :

- si le sol en place (constitution et organisation) est *en phase* avec le fonctionnement hydrique actuel (dû aux conditions climatiques, topographiques, édaphiques...), le système pédologique est stable. L'évolution pédologique peut s'intensifier sans modification de sens ;
- si, en revanche, le sol en place ne se trouve pas en phase avec les conditions hydriques imposées actuellement au système, il devient pédologiquement *instable* et va se transformer inéluctablement, dans son organisation d'abord, puis dans sa constitution ensuite. On aboutit ainsi

stable and continue to be transformed today. This is true as soon as the climate becomes more humid and is even more striking in conditions where aridification is increasing. *Man*, through his activities which modify the pedoclimate, may also influence soil evolution.

From the point of view of soil characterization, we may conclude that, for soils in equilibrium, profiles retain a certain relation to the pedologic typology. However, when soil formations are not in equilibrium, even the notions of the profile (pedon) and of pedologic types lose their meaning. The only way to visualize the soil cover is to consider it to be a "continuum" which may be divided into a finite number of distinct volumes or horizons side-by-side or overlapping (fig. 4). This decomposition is the basis of the method known as *structural analysis*, which constitutes today a new approach to soil study.

Clearly, these observations complicate the situation. Nevertheless, they are fundamental to the pedologic characterization of a site and to the study of the dynamics of its evolution — either in the natural state or following modification by man (which usually accelerates the evolution). For this reason, a number of such studies are currently in progress.

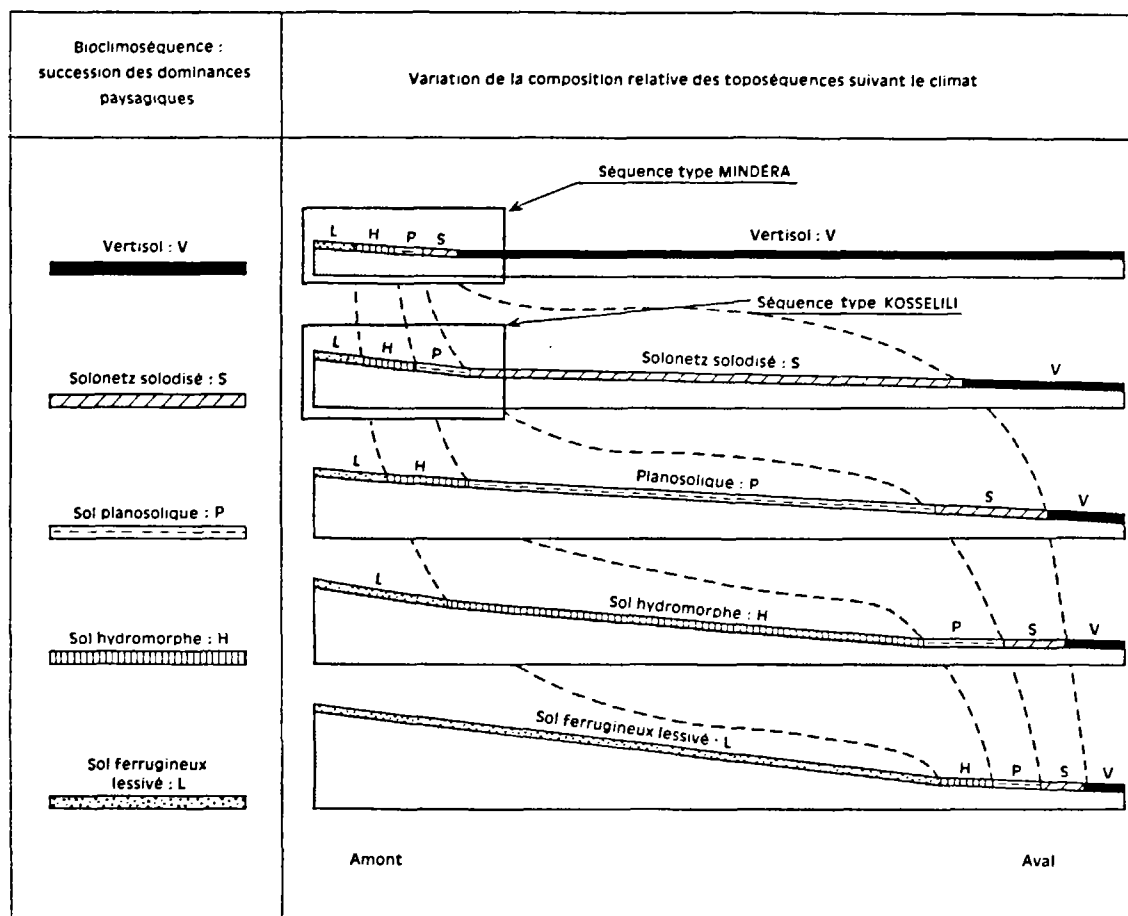


Fig. 3. Variation de la composition des toposéquences en fonction de la durée de l'évolution (de bas en haut)
Variation in the composition of the toposéquence in terms of the duration of evolution (from bottom to top)

à de nouveaux « corps pédologiques » dont l'individualisation ne résulte pas alors de la mise en œuvre des données de la pédologie classique.

Ainsi, l'étude des systèmes-sols en sites détaillés a conduit à montrer :

- qu'un type de sol n'est stable pédologiquement que s'il y a adéquation entre les caractéristiques pédogénétiques et les conditions pédohydrauliques ;
- que sur le vieux socle africain, où les phénomènes pédologiques interviennent depuis des centaines de milliers d'années accompagnées de multiples variations climatiques, beaucoup de sols ne sont pas stables et se transforment dans les conditions actuelles, généralement par voie *interne* et avec propagation *latérale* ; d'où la juxtaposition de domaines pédologiques « initiaux » en régression et de « systèmes transformants » (suivant l'expression de E. Fritsch) en extension. Ceci est vrai dès que le climat devient plus humide ; mais cela est encore plus frappant lorsqu'on se trouve dans des conditions d'aridification croissante. L'action transformante de l'homme, qui est susceptible de modifier le pédoclimat, se place naturellement dans cette éventualité.

Sur le plan de la caractérisation pédologique, les conséquences de ces recherches sont les suivantes :

- tant qu'on a affaire à des sols en équilibre, la considération de profils et leur rattachement à une typologie gardent une certaine validité ;

• En revanche, dès qu'on se trouve en présence de formations pédologiques en déséquilibre, la notion même de profil (pedon) et de type pédologique perd sa signification. La seule façon d'appréhender la couverture pédologique est de la considérer comme un « continuum » et de la réduire en un nombre fini de volumes (horizons), ces derniers se regroupant dans le paysage en ensembles distincts ordonnés par emboîtements et juxtapositions (fig. 4). C'est ce qui constitue la base même de ce qu'on appelle aujourd'hui l'analyse structurale, qui est à l'origine d'une nouvelle « stratégie » d'étude des sols, particulièrement efficace dans les marges pédologiquement très « actives ».

Il est évident que tout ceci complique la situation, mais est très important quant à la caractérisation pédologique d'un milieu et à la connaissance de sa *dynamique évolutive, naturelle ou encore consécutive à des opérations de mise en valeur* (avec accélération la plupart du temps). C'est la raison de l'apparition et du développement d'un certain nombre d'études de dynamique actuelle.

Approches par la dynamique actuelle

Ces travaux sont réalisés en vue de la détermination des transferts *hydriques* et de leurs conséquences sur la stabilité des systèmes pédologiques dans un secteur donné ; ils englobent donc les différents problèmes de dégradation, d'érosion et de conservation des sols.

Ils sont de trois types :

- observations contrôlées en conditions naturelles,
 - expérimentations en conditions naturelles,
 - expérimentations en conditions provoquées.
- Les observations contrôlées en conditions naturelles reposent essentiellement sur le suivi des données tensiométriques et piézométriques. Elles ont été effectuées généralement sur des sites étudiés précédemment, en particulier au Burkina Faso, Tchad, Nord Cameroun, Côte d'Ivoire, Sénégal, Guyane...

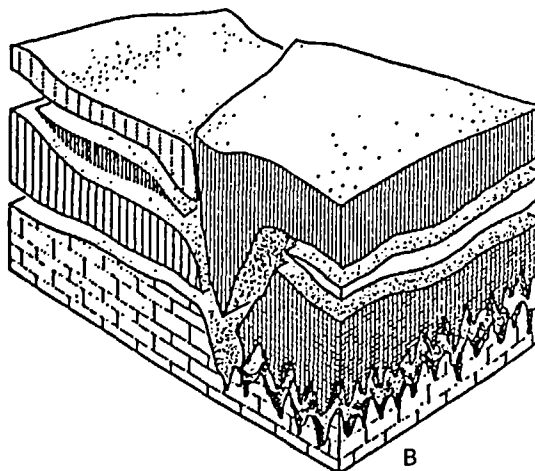
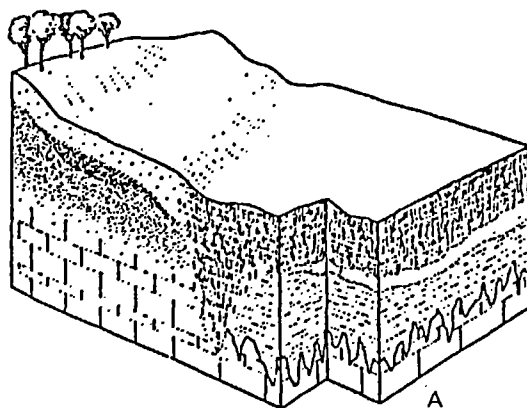


Fig. 4. La couverture pédologique
A : Décomposée.

B : En compartiments.

Pedological time cover split into compartments

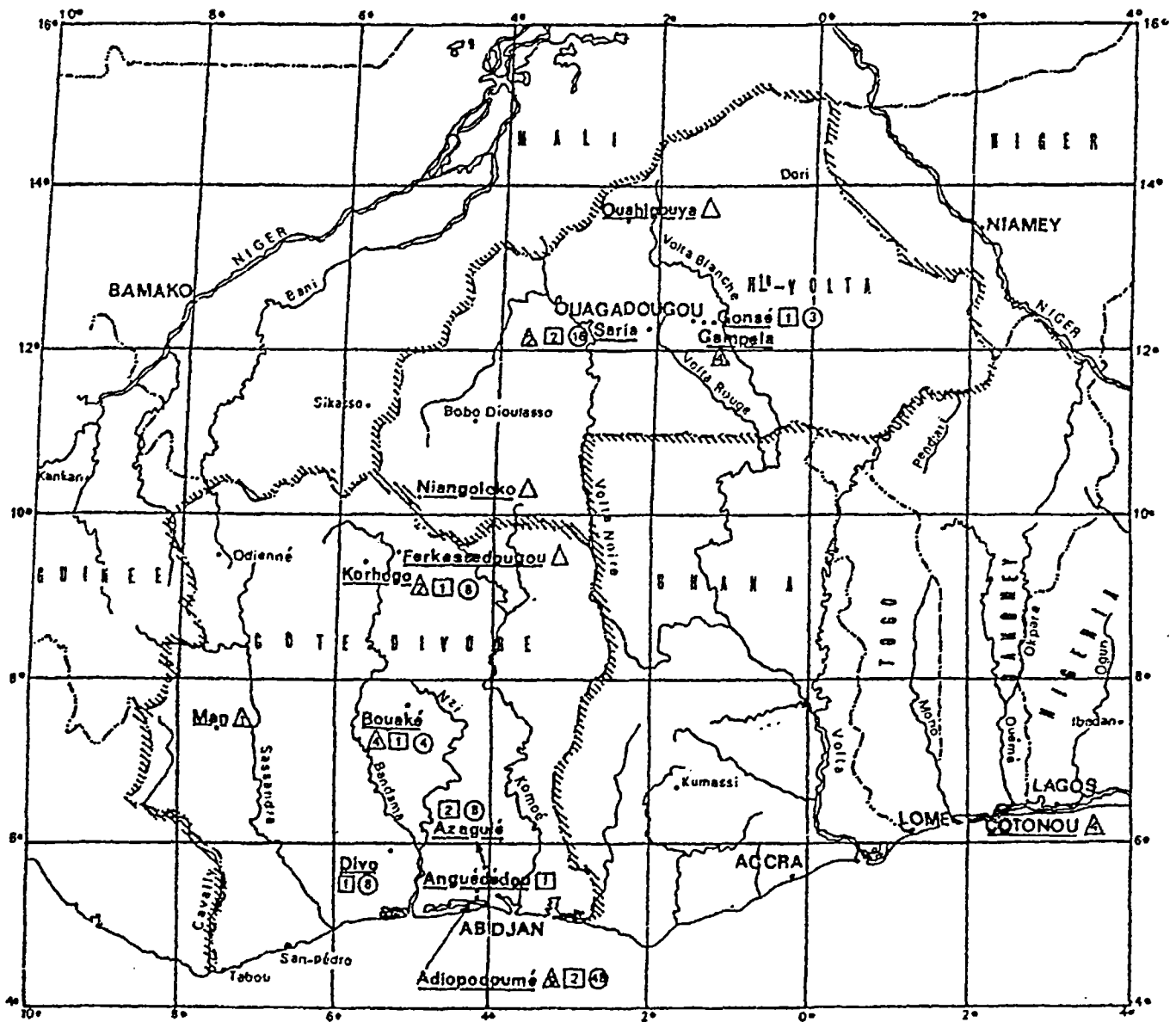


Fig. 5. Carte de situation des stations de mesure de l'érosion et du drainage en Afrique de l'ouest
 Map of location of station for the measurement of erosion and drainage in west africa

Ouahigouya : (GERES)

Gonsé : ORSTOM-CTFT

Gampala : CTFT-ORSTOM-IRAT

Sarla : ORSTOM-IRAT

Niangoloko : (IRHO)

Ferkessedougou : (IRAT-ORSTOM)

Korhogo : ORSTOM

Bouaké : IRAT-ORSTOM

Divo : ORSTOM-IFCC

Man : IRAT-(ORSTOM)

Anguédédou : ORSTOM-IRAT

Adiopodoumé : ORSTOM

COTONOU : ORSTOM

△ Case érosion

□ Case ERLO

○ Case DV

E. ROOSE (1981).

Il s'agit d'opérations longues, étant donné que la connaissance précise des flux hydriques implique des mesures en continu sur plusieurs années consécutives. L'opération multidisciplinaire ECEREX en Guyane est exemplaire de ce point de vue.

- *Les expérimentations en conditions naturelles* ont trait essentiellement aux mesures sur l'érosion et le ruissellement effectuées en *cases* ou en *parcelles expérimentales*. Elle se sont poursuivies pendant plus d'une dizaine d'années en différents sites de l'Afrique de l'Ouest (sous végétation naturelle et sous culture) (fig. 5) ; la coordination et la synthèse des résultats ayant été assurées par E. Roose (1981).

- *Les expérimentations en conditions provoquées* résultent de l'utilisation de *simulateurs de pluie*, ce qui permet d'avoir des données plus rapides quant à l'évolution d'un milieu donné et d'évaluer les possibilités d'adéquation entre la couverture pédologique et le fonctionnement pédohydrique.

Deux types d'appareil ont été mis en œuvre :

- *le grand simulateur de pluie* qui a été utilisé en différentes campagnes entre 1975 et 1980 et sur six stations étalées suivant un transect climatique entre la latitude Nord 5° 20' et la latitude Nord 14° 57' (Mare d'Oursi) (fig. 6). Les résultats sont en voie de dépouillement sous la responsabilité de J. Collinet.

- *le minisimulateur de pluie* mis au point ultérieurement qui, plus maniable, a fait l'objet de nombreuses campagnes à des fins hydropédologiques dans les différents milieux bioclimatiques de l'Afrique de l'Ouest : forêt tropicale, savane humide, savane sèche, steppe sahélienne, région prédésertique (fig. 7). Il a permis d'appréhender le ruissellement dans les divers secteurs et en même temps de mettre au point dans les régions sèches une caractérisation des organisations pelliculaires superficielles (cf. C. Valentin, 1985).

Introduction de la télédétection spatiale et connaissance des milieux agricoles

Depuis quelques années déjà, des recherches sont conduites pour la mise au point de méthodes d'interprétation des données satellitaires, afin d'élargir les possibilités de connaissance cartographique du milieu naturel (J. Kilian et al., M. Pouget et R. Escadafal, B. Mougenot...).

Ces mises au point méthodologiques concernent l'interprétation visuelle et les traitements numériques des données satellitaires.

Ces mises au point méthodologiques ont concerné plusieurs axes de recherche.

- *Connaissance des Milieux agricoles*, qui constitue l'ensemble des éléments permettant de juger d'une activité agricole et d'en définir les caractéristiques (Typologie). Tout ce qui est visible à la surface de la terre : type de parcelle, nature, qualité des cultures, dégradations des terres, circuit des eaux dans le paysage, parcours d'élevage sont autant d'éléments indispensables pour son évaluation et son suivi dans le temps. Ces milieux agricoles peuvent être appréhendés au travers de « l'État de Surface », qui constitue l'ensemble des caractères propres à la surface de la Terre et susceptibles d'être détectés par un satellite ou un avion (1). Après missions de terrain et traitements

(1) CET « ÉTAT DE SURFACE » N'A RIEN A VOIR AVEC LES ÉTATS DE SURFACE (ORGANISATIONS PELLICULAIRES SUPERFICIELLES) DONT IL A ÉTÉ QUESTION CI-DESSUS

Present-day (hydro)dynamic studies

The purpose of this work is to identify hydric transfers and to determine their impact on pedologic stability in a given context; it naturally includes the diverse problems of soil erosion, degradation and conservation.

This research comprises three types of activity:

- controlled observations in natural conditions;
- experiments in natural conditions;
- experiments under simulated conditions.

- *Controlled observations in natural conditions*

These are essentially tensiometric and piezometric measurements, generally taken in sites which have already been studied (in particular, Burkina Faso, Chad, North Cameroon, Ivory Coast and Senegal).

The campaigns are long: precise measurements of hydric transfers require continuous monitoring over a period of several years.

- *Experiments in natural conditions*

These consist essentially of measurements of erosion and run-off within experimental plots. Experiments have been in progress for more than a decade at various sites in West Africa, both in areas of natural vegetation and on agricultural land (fig. 5); coordination of this work and the collation of results is the responsibility of Roose (1981).

- *Experiments under stimulated conditions*

The use of *rain simulators* permits accelerated study of surface evolution and the evaluation of the potential equilibrium between the pedologic cover and the pedohydric regime.

Two types of equipment have been used:

- *large rain simulators*, used in several projects between 1975 and 1980 at six sites along a climatic transect running from 5° 20' N to 14° 57' N (Mare d'Oursi). The results are being analysed by Collinet;

- *mini rain simulators*, developed later and more easily handled, used in many hydropedologic studies in the various bioclimates of West Africa: tropical forest, humid and dry savanna, Sahelian steppes, and semidesert (fig. 7). They have been used to study run-off at diverse sites and to define characteristic surface soil conditions in arid regions, ie. soil surface crusting (Valentin, 1985).

Remote sensing and knowledge of agricultural areas

Methods of analysing satellite data have been under development for several years, the purpose being to widen the scope of soil maps. These methods include both visual interpretation of satellite photographs and numerical analysis of data.

The principal areas of application of these methods are:

- *Knowledge of the agricultural environment*: the objective is to quantify all the parameters concerning agricultural activity (typology), in other words, everything which is visible at the surface: type of land unit, quality of the culture, land degradation, surface drainage, livestock

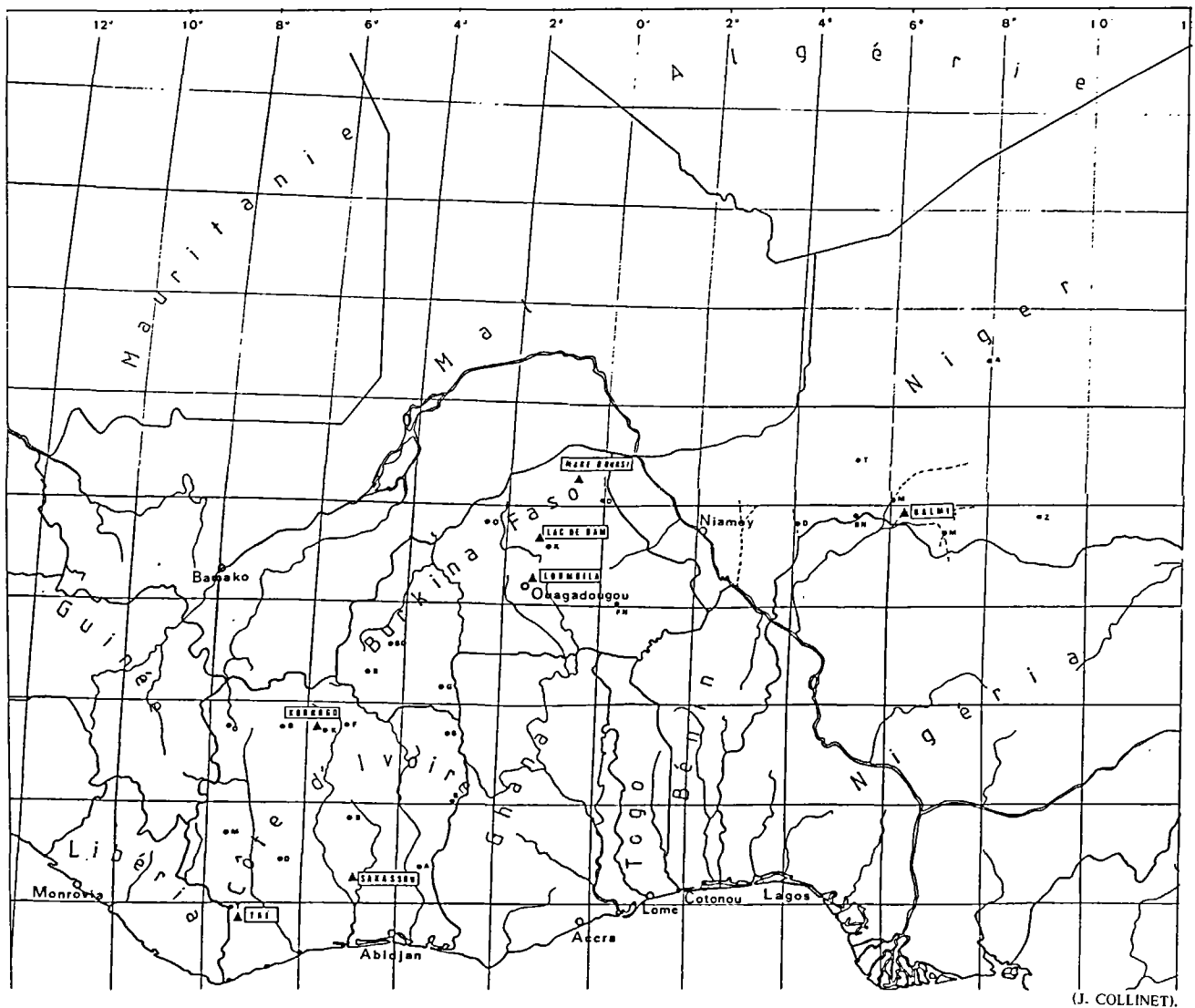


Fig. 6. Carte de localisation des campagnes effectuées avec le grand simulateur de pluie en Afrique de l'ouest
 Map of the location of tests performed with the large rain simulator in west africa

numériques interactifs, il a été établi des Cartes d'États de Surface ; lorsque ces cartes sont réalisées à plusieurs périodes de l'année ou à d'autres périodes séparées de plusieurs années, on a pu établir des Cartes d'Évolution de composantes du milieu naturel fort intéressantes pour le développement rural : cartes des variations saisonnières d'humidité superficielles, cartes d'évolution des surfaces agricoles, de la forêt, etc.

De même des traitements ont été mis au point (IGN-IBM) pour la mise en évidence de combinaisons pertinentes d'États de surface : des cartes de Paysages Agro-écologiques ont pu ainsi être dressées figurant des combinaisons privilégiées entre les systèmes agraires et le milieu physique qui les supporte.

tracks, etc., all these factors being indispensable for the evaluation and monitoring of the land. These agricultural areas may be studied by means of the "surface state" — the set of surface characteristics detectable by satellite or aeroplane. Data obtained undergo interactive numerical processing and are used to produce Surface State Maps; by producing such maps for the different seasons of the year or at intervals of a few years it has been possible to draw up Evolution Maps for the various environmental parameters, which are of great practical use in rural development planning. These maps include the evolution of agricultural areas and forests, seasonal variations of surface water, etc.

Similarly, techniques have been developed (IGN-IBN) to

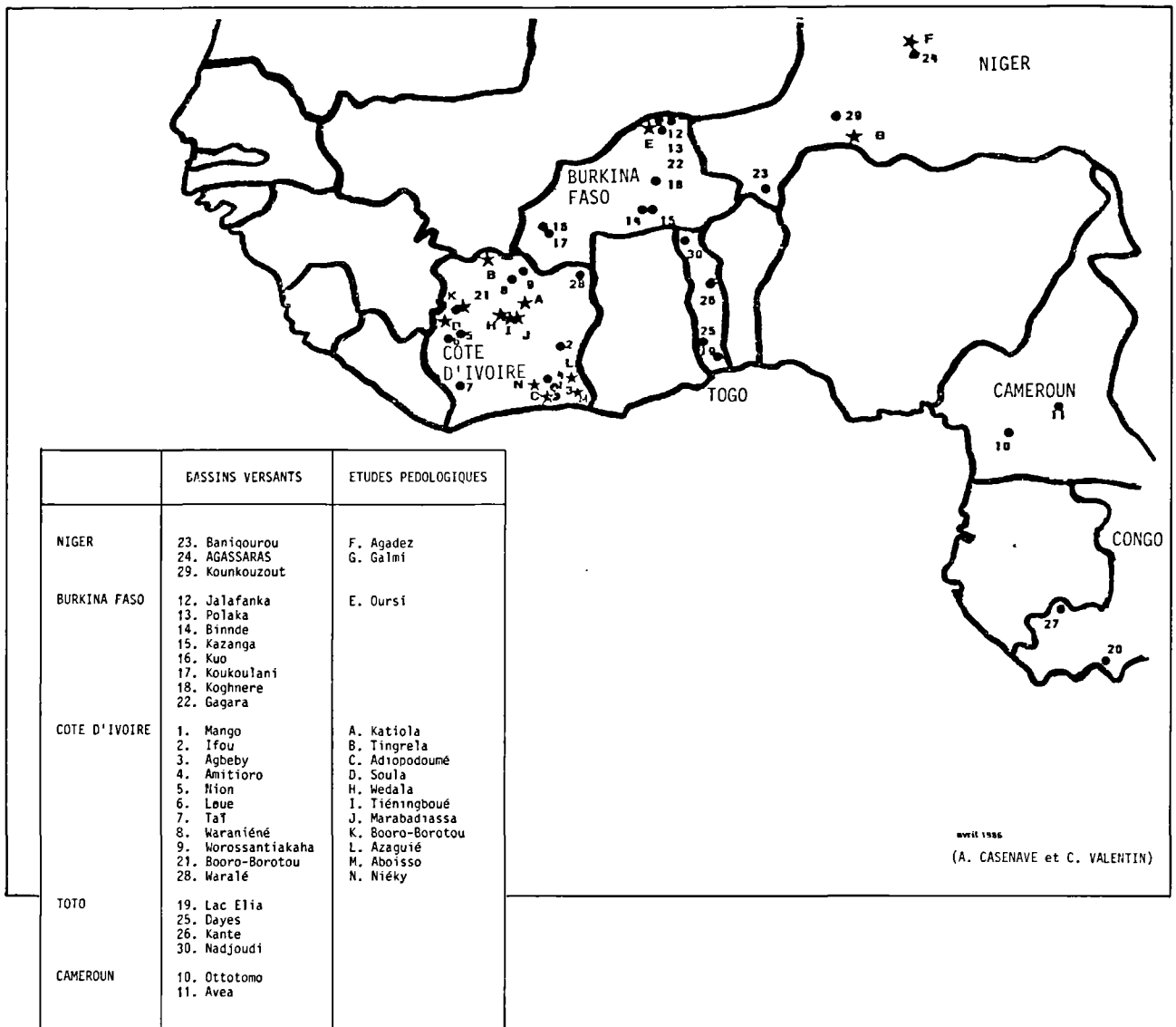


Fig. 7. Carte de localisation des sites d'expériences pour le petit simulateur de pluie
 Map of the location of experimental sites for the small rain simulator

- *Suivi du Bilan hydrique régional* avec pour objectif l'utilisation des données satellitaires (NOAA, Météosat) pour prévoir, à partir des températures de surface, l'évapotranspiration réelle de la couverture végétale à l'échelle régionale. Une méthodologie est en cours d'élaboration pour aboutir au suivi du Bilan hydrique régional.
- *Évaluation cartographique de la Biomasse* : qui consiste en l'élaboration d'une méthode d'exploitation de l'information satellitaire en relation avec des observations de terrain (traditionnelles et télédétection rapprochée) pour l'évaluation cartographique des ressources fourragères de la zone sahélienne. De telles études sont menées, par exemple en zones tropicales humides, pour les inventaires forestiers.

highlight exploitable surface states: agro-ecological landscapes have been produced showing advantageous combinations of crops and their supporting environment.

- *Regional hydric evaluation.* The objective is to use satellite data (NOAA, METEOSAT) to predict and monitor the vegetal transpiration losses at a regional scale as a function of surface temperature. A methodology is under development.
- *Cartographic evaluation of the biomass.* This involves the development of a method of using satellite data together with field measurements and close telemonitoring observations to provide maps of forage areas in the Sahelian zone. Such studies have been used, for example, for forest inventories in humid tropical areas.

Principaux apports

Il ne s'agit pas du tout d'être exhaustif, mais de retenir simplement ici un certain nombre d'exemples ou de résultats découlant des opérations précédentes et qui sont particulièrement significatifs. Ils auront trait d'abord aux trois grandes échelles spatiales :

- échelle continentale,
- échelle régionale,
- échelles paysagique et parcellaire ;

puis, dans une seconde partie, seront envisagés les données relatives aux fonctionnements hydriques et physico-chimiques des sols, les résultats obtenus lors des études de certains milieux particuliers, ainsi que ceux concernant les problèmes de télédétection spatiale.

Au demeurant, dans tous les cas, l'apport essentiel des investigations réalisées par les chercheurs français dans le domaine tropical, et en particulier dans le milieu africain, tient dans le fait que la caractérisation des sols doit déborder le cadre strict de la pédologie classique (et en particulier de celle pronée dans les latitudes moyennes) pour s'insérer dans un cadre plus *large* faisant intervenir à la fois l'espace et le temps, impliquant une analyse multidisciplinaire du milieu naturel, et s'appuyant ainsi sur des données de la géomorphologie, de la géologie de surface et de la paléoclimatologie. Avec comme corollaire inéluctable que la prise en compte des sols et la caractérisation des couvertures pédologiques dans un milieu donné sont une des meilleures manières d'appréhender le milieu superficiel *dans son ensemble et dans sa globalité*. Le sol se trouvant à l'interface de la lithosphère et de l'atmosphère-biosphère, implique *nécessairement* de se référer à ces deux enveloppes qui, à l'opposé, peuvent être étudiées indépendamment et séparément (géologie, climatologie, météorologie...).

■ Cartographie (prospection directe)

Échelle continentale

Les résultats obtenus se situent au niveau de la *géographie des sols* (cf. Annexe O). Outre les conditions bioclimatiques actuelles, la caractérisation des couvertures pédologiques se doit de prendre en compte :

- les grandes structures géologiques du substratum et pour ce qui concerne les socles précambriens, l'existence de vastes plateaux (surfaces d'aplanissement) et de cuvettes endoréiques (Niger, Tchad, Congo, Nil, Zambèze, Kalahari...);
- l'existence de couvertures d'altération qui sont souvent épaisses, en relation avec les climats et paléoclimats et aussi la grande durée d'intervention. En Afrique tropicale, les études de géologie de surface basées sur la nature des constituants ont permis ainsi de distinguer :
 - les cuirasses ferrugineuses et aluminoferrugineuses (fig. 8),
 - les altérations kaoliniques,
 - les altérations montmorillonitiques,
 - les accumulations sableuses péri-désertiques (anciennes ou subactuelles).

Mais, en d'autres milieux (cas des domaines méditerranéens arides), on peut envisager aussi les croûtes calcaires, en relation avec les sols rouges fersiallitiques (cf. A. Ruellan, 1971 ; M. Lamouroux, 1972), les carapaces gypseuses et les dépôts salins.

Main contributions

Although it is not possible to give here an exhaustive list, we shall describe a number of case where particularly significant results have been obtained using the techniques mentioned previously. First, we shall present results for the three spatial scales: continent, region, and landscape and plot. Then we shall present data concerning the hydric and the physical and chemical soil regimes, some results obtained from special environments, and also the problems associated with remote sensing from space.

It should be emphasized that the main contribution of French research in the tropics is a definition of soil characteristics which goes far beyond that provided by textbook pedology (in particular, as it is defined in higher latitudes), by using a much *broader* approach including both space and time and based on geomorphology, surface geology and paleoclimatology. An understanding of the soil cover in a given area is one of the best approaches to a global understanding of the surface environment. Since the soil constitutes the interface between the lithosphere and the atmosphere/biosphere, its study *necessarily* involves a knowledge of these domains which, on the other hand, may be studied separately (geology, climatology, meteorology, etc).

■ Cartography

Continental scale

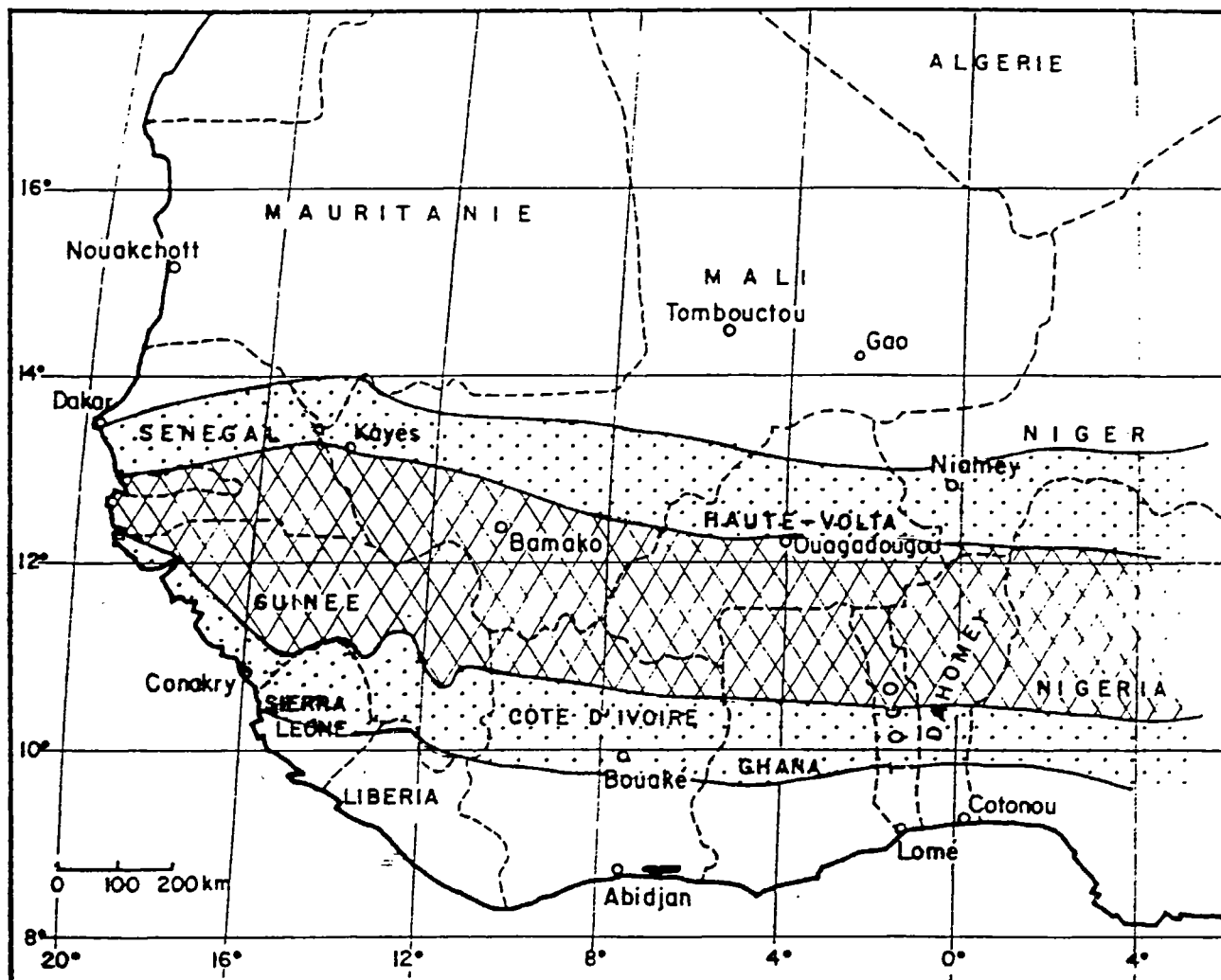
The results obtained concern the geography of soils (see Appendix O). In addition to the present-day bioclimatic conditions the classification of pedologic covers should take into account:

- the large geological structures of the substratum and, for the Precambrian base, the presence of denudation surfaces and endorheic basins (Niger, Chad, Congo, Nile, Zambezi, Kalahari, etc.);
- the existence of weathered surface cover, commonly thick, in relation to the climate, the paleoclimate and also the long period of formation. In tropical Africa, geological studies of surface constituents have revealed:
 - ferruginous and aluminoferruginous duricrusts (fig. 8);
 - kaolinitic alteration;
 - montmorillonitic (smectitic) alteration;
 - old or subrecent sandy accumulations at the periphery of deserts.

In other regions, such as arid Mediterranean areas, calcareous crusts (see Ruellan, 1971 ; Lamouroux, 1972), gypsiferous carapaces and saline deposits are also found.

If we consider West Africa in the context of these studies, we find the following succession from the desert to the Gulf of Guinea:

- old and subrecent eolian covering;
- montmorillonitic alteration cover;



(d'après R.MAIGNIEN, 1958)



-  Zone à cuirassement superficiel et subsuperficiel généralisé
-  Zone à fort contrétionnement superficiel et subsuperficiel

Fig. 8. Répartition schématique des cuirasses et des zones concrétionnées en Afrique de l'ouest
Schematic distribution of the ferricrusts and concretions in west africa

A partir de là, si on examine ce qui se passe en Afrique de l'Ouest, on observe depuis le désert jusqu'au Golfe de Guinée la succession suivante :

- voile éolien subactuel et ancien,
- couverture d'altération montmorillonitique,
- couverture d'altération kaolinique (ferrallitique) avec fort concrétionnement superficiel ou subsuperficiel sur niveau montmorillonitique,
- ceinture cuirassée assez généralisée (en association avec des formations kaoliniques),
- couverture d'altération kaolinique avec fort concrétionnement (sols gravillonnaires),
- couverture d'altération ferrallitique (kaolinique et gibbsitique) sans concrétionnement ferrugineux.

En sorte que les types de sols les mieux représentés en Afrique de l'Ouest sont (cf. par exemple M. Gavaud, 1968):

- près de l'équateur, des *sols ferrallitiques* (ferralsols-oxisols) (Forêt tropicale humide),
- puis, au fur et à mesure que l'on monte en latitude, des *sols ferrugineux tropicaux lessivés* juxtaposés à des *niveaux cuirassés*.

Ces sols sont souvent sur manteau kaolinique (et sont à rapprocher alors des Ultisols de la Soil Taxonomy) ; c'est le cas de la savane humide. En revanche, plus au nord dans le domaine de la savane sèche, ils se développent sur une formation montmorillonitique (et peuvent alors être rangés dans les Alfisols),

- enfin, sur matériaux sableux récents de la zone sahélienne, des *sols ferrugineux* (non lessivés) et des *sols brun-subarides*.

Ainsi, la géographie des sols rénovée a conduit à mettre en évidence en Afrique de l'Ouest un grand type de sol : le « *sol ferrugineux lessivé* », qui est à peu près unique en son genre sur la planète (les correspondances dans les classifications telles ultisols, acrisols, red yellow podzolic soils... ne sont que des à peu près dont il faut absolument se méfier). C'est un sol fortement différencié présentant un horizon superficiel A₂ appauvri et très sableux surmontant un horizon B argiloferrique et contenant fréquemment des concrétions ferrugineuses. (cf. R. Fauck, 1971 ; A. Lévêque, 1975 ; J.C. Leprun, 1979...).

Ce sol apparaît pratiquement sur tous les matériaux acides (quartzeux) dès que la saison sèche devient importante et au moins égale à six mois. Il résulte souvent d'ailleurs de la transformation par voie latérale d'un matériau ferrallitique (cf. R. Boulet, 1974 ; A. Chauvel, 1976) en zone de savane humide. Mais, dès que le climat devient plus aride et que la saison sèche augmente, il se transforme lui-même latéralement à partir des zones aval pour donner successivement naissance à de nouveaux sols : planosols, solonetz solodisés et vertisols (cf. G. Bocquier, 1971) (fig. 9).

Échelle régionale

A cette échelle (1 / 500 000 - 1 / 1 000 000), la caractérisation pédologique des couvertures superficielles constitue une des façons les plus appropriées pour appréhender le *milieu physique* ambiant. En même temps, l'obtention de cartes dérivées a conduit à l'élaboration de cartes de ressources en sols (en terres à proprement parler). Enfin, l'étude des milieux naturels a permis de procéder à des découpages régionaux en vue de l'établissement des schémas directeurs de développement rural (une ou

- kaolinic (ferrallitic) alteration cover with marked concretion at the surface or in the montmorillonitic layer;
- generalized duricrust belt (associated with kaolinic formations);
- kaolinic alteration cover with marked concretion (gravel soils);
- ferrallitic alteration cover (kaolinitic and gibbsitic) without ferruginous concretion.

Consequently the soils most commonly found in West Africa are (Gavaud, 1968):

- ferrallitic soils (Ferrasols/Oxisols) near the equator (wet tropical forest);
- as we move away from the equator "sols ferrugineux tropicaux lessivés" appear at the levels of the duricrusts. These soils are commonly on a kaolinic alteration blanket (and therefore similar to the Utisols of Soil Taxonomy), for example in the humid savanna. In the dry savanna area further north, they develop on montmorillonitic formations (and are therefore classified with the Alfisols);
- finally, on the sandy material of the Sahelian region, "sols ferrugineux tropicaux non lessivés" and "sols bruns subarides" are found.

Thus the soil geography of West Africa has revealed an important soil group — the leached ferruginous soils — which are unique on the planet (correspondences with classifications such as Ultisols, Acrisols, red yellow podzolic soils, etc. are superficial and such comparisons should be avoided). This is a highly differentiated soil displaying an impoverished and very sandy surface layer A₂ overlying a clayey iron-rich B layer which commonly contains ferruginous concretions (Fauck, 1971; Lévêque, 1975; Leprun, 1979).

This soil appears over virtually all acid (quartzose) material once the annual dry season has lasted at least six months. Moreover in humid savanna regions it commonly results from the lateral transformation of ferrallitic material (Boulet, 1974; Chauvel, 1976); but, when the climate becomes more arid and the dry season increases, it is itself laterally transformed from downstream zones successively giving rise to new soils: Planosols, solodized Solonetz and Vertisols (Bocquier, 1971) (fig. 9).

Regional scale

At this scale (1:500,000 to 1:1,000,000), definition of the pedologic characteristics of the superficial cover is one of the most appropriate means of understanding the ambient natural environment. Also maps derived from this study have led to the creation of land resource maps.

The study of the natural environment has permitted regional subdivision with a view to the creation of regional rural development plans for the establishment of one or more crops (using natural rainfall or irrigation) or for crop diversification. Particular examples, some of which are elaborated in the appendix, fall into three areas of research:

- *Knowledge of Natural Environments*
 - Burkina Faso (1:1,000,000) (see Appendix I);
 - Central African Republic (1:1,000,000) (Appendix II)
 - North Cameroon (1:500,000) (Appendix III)
- *Development of Land Resource Maps*
 - Niger and Burkina Faso (1:500,000)
 - Tunisia (1:200,000)
 - North Cameroon (Appendix III)
- *Rural Development. Studies Concerning the Develop-*

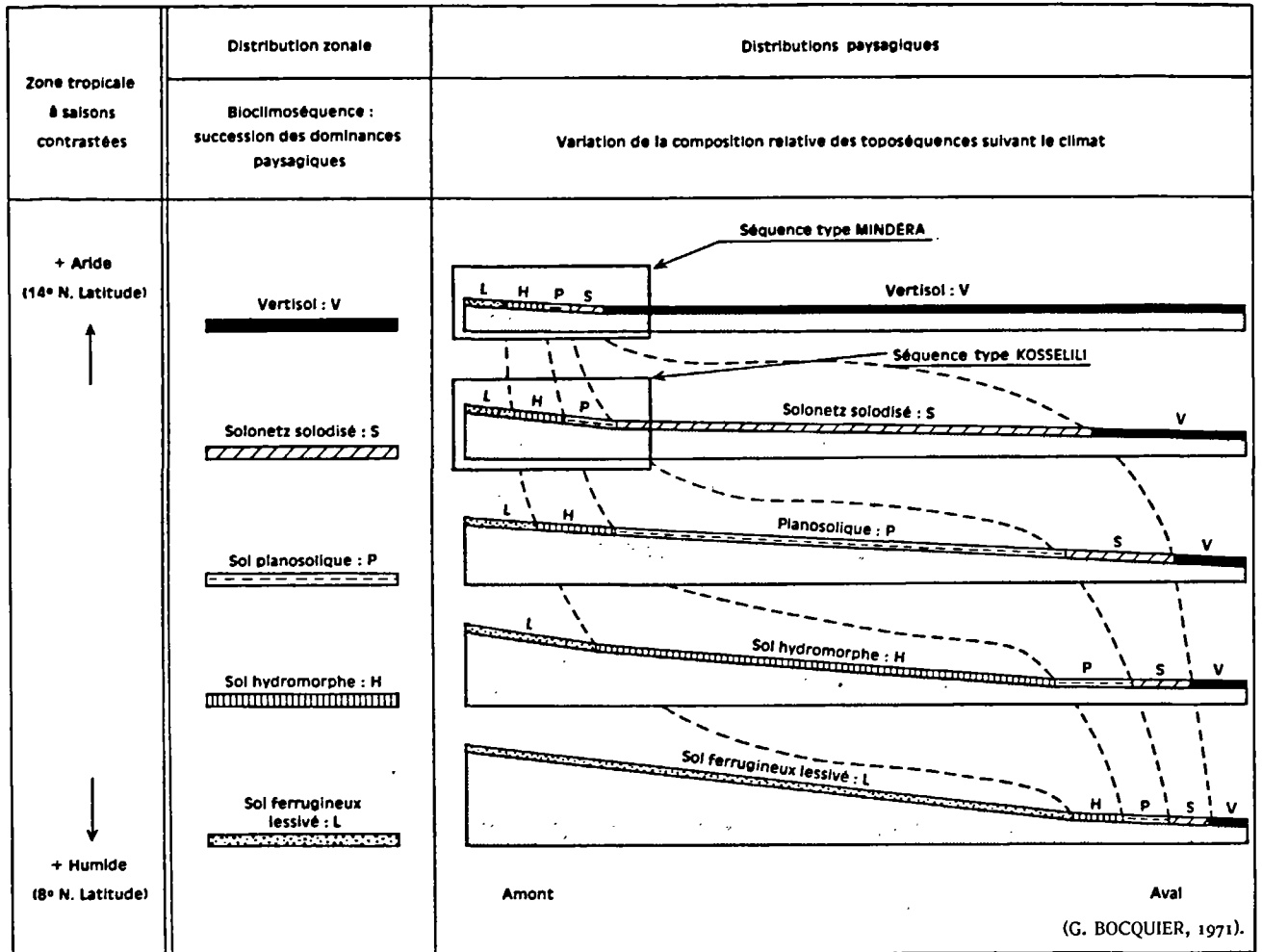


Fig. 9. Variation des composantes pédologiques d'un même système de transformation en fonction des conditions bioclimatiques. Cas de l'Afrique de l'ouest
Variation in the pedological components of the same system of transformation in terms of bioclimatic conditions. The case of west africa

plusieurs cultures, en pluvial ou en irrigué, et problème de la diversification des cultures).

Des *exemples* précis, dont certains sont développés en Annexe, concernent ces 3 domaines de recherche :

- *connaissance des milieux naturels* :
 - Burkina Faso (1 / 1 000 000) (Annexe I) (1)
 - République Centre Africaine (1 / 1 000 000) (Annexe II)
 - Nord-Cameroun (1 / 500 000) (Annexe III).
- *Établissement de cartes de ressources en sols* :
 - Niger et Burkina Faso (1 / 500 000)
 - Tunisie (1 / 200 000)
 - Nord-Cameroun : dans ce cas, des explications sont indiquées dans l'Annexe III.
- *Développement rural. Études pour le développement d'une ou plusieurs cultures* :
 - Madagascar : Nord Ouest de Tananarive (1 / 500 000) (Annexe IV)
 - Amérique Latine et Afrique de l'Ouest : Possibilités de culture du palmier à huile et du cocotier (Annexe V)
 - Étude de mise en valeur du Sénégal oriental (Annexe VI).

(1) SE REPORTER A L'ANNEXE POUR LE DÉTAIL CONCERNANT L'EXEMPLE CITÉ.

ment of Cultures

- Madagascar, northwest of Tananarive (1:500,000) (Appendix IV)
- Latin America and West Africa: palm oil and coconuts (Appendix V)
- Eastern Senegal: development study (Appendix VI)

Échelles paysagique et parcellaire

A ce niveau qui va du 1 / 100 000 au 1 / 2 000, il est possible en simplifiant de procéder de deux manières, suivant que l'on a à aller vite ou moins vite, selon qu'on se trouve en type de milieu connu ou peu connu...

• Dans le cas où il faut avancer assez rapidement ou qu'on se trouve en domaine relativement connu, on est conduit à vouloir dresser une bonne représentation du milieu superficiel à cartographier basée sur l'utilisation de la *méthode de la cartographie morphopédologique* (J. Kilian et J. Tricart).

La démarche suivie consiste à accéder à la connaissance du milieu physique dans sa description comme dans sa morphodynamique. Sous un climat donné, les processus physiques, chimiques, biologiques aboutissant à la formation et à l'évolution des sols et du modelé agissent selon des vitesses différentes qui donnent au milieu ses caractères propres : c'est la notion de Bilan « Morphogénèse-Pédogénèse », qui permet la mise en évidence de milieux géodynamiques et de rendre compte du sens de leur évolution. Lorsque ce bilan est orienté vers la pédogénèse, il y a approfondissement des sols : l'érosion est faible et, sur le plan des phénomènes physiques, le milieu est stable. En zones instables mécaniquement par contre, les processus d'érosion (Morphogénèse) l'emportent, le milieu physique se dégrade (glissements de terrain, ravins, coulées boueuses...); les horizons profonds et superficiels de la couverture pédologique sont modifiés. Dans les milieux pérestables, il y a interférence permanente entre Morphogénèse et Pédogénèse. En général, les processus d'érosion sont superficiels : décapages, transit, accumulation. Ces types de milieux sont généralement hétérogènes ; c'est le domaine des mosaïques de sols.

La démarche cartographique vise à analyser les diverses composantes de ce milieu : climat, relief, matériaux, végétation, morphogénèse, pédogénèse, et la manière dont ces composantes interfèrent. Cela définit les portions de territoire possédant une structure, une évolution et des problèmes communs. Ces portions de territoires sont dénommées « Unités morphopédologiques » ou « Types de milieux ». Elles sont l'expression de systèmes naturels.

Cette cartographie s'écarte donc des méthodes classiques consistant à ne figurer que certains aspects du milieu, analysés séparément. Le sol, par exemple, n'est pas ici la base de l'unité cartographique ; mais il constitue l'une des composantes des unités cartographiées : à savoir, un « système naturel formant un paysage ».

Cette approche permet aussi, dans un certain nombre de cas, d'établir des relations particulièrement intéressantes entre sols et aptitudes culturales (cf. par exemple F. Bourgeat *et al.*, 1973, en ce qui concerne les hautes terres malgaches).

Les contraintes du milieu physique ne sont pas *seulement* d'ordre édaphique, mais également en effet d'ordre géomorphologique, morphodynamique, hydrique, etc. L'implantation correcte permet d'apprécier les réactions du végétal vis-à-vis du milieu cartographié. L'étude de ce comportement consiste à apprécier, analyser et mesurer comment une plante réagit face aux contraintes décelées, et de déterminer ainsi progressivement les aptitudes agricoles, c'est-à-dire désigner pour chaque paysage ou chaque forme de celui-ci, les systèmes de cultures qui lui conviennent. Un exemple concernant cette approche sera développée pour Mayotte (Comores) dans l'Annexe VII.

Landscape scale and plot scale

The scale in this case ranges from 1:100,000 to 1:2,000; two methods may be used, one providing results more quickly than the other, depending on whether the type of zone is already well known or not.

• In the case where results are required quickly or where the zone is relatively well known, a good photographic survey of the surface to be mapped is carried out. The best way to proceed is then the *morphopedologic cartography* method (Kilian and Tricart).

The steps involved lead to a description of the physical environment and an understanding of its dynamics. Physical, chemical and biological processes influence the formation and evolution of the soils and of the landforms; for a given climate, the relative speeds of these processes determine the character of the landscape. This is the idea behind the "Morphogenesis-Pedogenesis" evaluation which reveals areas undergoing geodynamic modification and shows the direction of this evolution. When the evaluation shows that pedogenesis is predominant, the soils are deepening: erosion is minor and, physically speaking, the environment is stable. In mechanically unstable areas, on the other hand, erosion processes (morphogenesis) are predominant, the physical environment degrades through landslides, mudslides and formation of ravines, and soil layers both at the surface and morphogenesis are in competition; erosion processes are generally superficial (soil stripping, transit and accumulation). This type of zone is normally heterogeneous, comprising a mosaic of soils.

The objective of the cartographic work is to analyse the various components of the locality: climate, relief, vegetation, geological constitution, morphogenesis, pedogenesis and also the interactions between these parameters. It is then possible to define areas possessing a "structure" (a common "evolution" and "problems"): these are referred to as "morphopedologic units" or "environmental types" and constitute representative natural systems.

Clearly such cartography is a departure from traditional methods which limit the number of parameters and analyse them separately. For example, the soil is no longer considered to be the basic cartographic unit: this unit is rather the natural system forming a landscape of which the soil is but one component.

This approach sometimes reveals interesting results concerning the suitability of soils for particular cultures (for example, Bourgeat *et al.*, 1973, concerning the highlands of Madagascar).

The limitations of the physical environment are not only edaphic, but also in fact geomorphological, morphodynamic, hydric, etc. Correct planting enables us to observe the reactions of vegetation to the environment mapped. The study of this behaviour consists of assessing, analysing and measuring how a plant reacts to perceived limitations, and thus to determine systematically crop suitability, i.e. to identify the appropriate crop systems for each kind of landscape. One example of this approach developed for Mayotte (Comores) is discussed in Appendix VII.

• If results are not required quickly, or if the zone is unknown, or if the area possesses intense lateral dynamics, it is more appropriate to identify carefully the mechanisms which determine the spatial distribution of the soils, in which case the method of structural analysis is used (Boulet *et al.*). This technique is perfectly adapted to study at small scale and may even be extended to the scale of an individual country or even to regional scale.

• Si en revanche on a la possibilité de faire des études très approfondies, ou bien si le secteur est inconnu, ou encore si l'on se trouve en zone à dynamique latérale intense, on est amené à rechercher assez finement les éléments du déterminisme qui vont servir de base à la compréhension de la distribution des sols dans l'espace. Il faut alors procéder en s'appuyant sur la *méthode de l'analyse structurale* (R. Boulet *et al.*).

Cette analyse est parfaitement adaptée à l'échelle *parcellaire* ; mais bien étayée, elle peut aussi être efficace à l'échelle paysagique et même à l'échelle régionale. Le cas traité ci-dessus du Nord-Cameroun en est un exemple patent. Mais il y en a d'autres (cf. J.F. Turenne, Guyane, Carte 1 / 350 000 Plaines Côtières).

Par ailleurs, dès qu'il s'agit de couvertures en déséquilibre bioclimatique comportant l'individualisation de toposéquences contrastées et la présence de « sols de transition », l'analyse structurale est pratiquement la seule méthode à pouvoir appréhender la variabilité *extrêmement* rapide du milieu pédologique, et à faciliter la prévision de son évolution sous l'influence du temps et aussi de l'action anthropique.

Le cas de la moyenne Casamance (Sénégal), caractérisé par la présence de sols rouges ferrallitiques et de sols beiges ferrugineux tropicaux et étudié par A. Chauvel (1976), est symptomatique à cet égard (cf. Annexe VIII).

Enfin à l'échelle parcellaire, l'application de l'analyse structurale en vue de l'expérimentation agronomique commence à porter ses fruits. Un exemple récent concernant la Guyane peut servir d'exemple à ce dessein (R. Boulet, Ph. Godon *et al.*, 1985. Annexe IX).

■ Autres travaux pédologiques

Études hydro-pédologiques – Dégradation et conservation des sols

Ces recherches concernent toute une série de travaux portant sur l'étude :

- de la dynamique de l'eau *in situ* dans les systèmes de transformation notamment ;
- des phénomènes d'érosion en relation avec les transferts solides et leurs variations en fonction des conditions bioclimatiques de l'Afrique de l'Ouest ;
- de l'aptitude des sols à l'irrigation.

• *Connaissance de la dynamique de l'eau dans le sol et ses conséquences*

Dans ce domaine, on peut considérer successivement les aspects hydriques, pédologiques et agropédologiques (mise en culture).

Des recherches sur la dynamique de l'eau ont été entreprises en différents endroits et sur plusieurs types de systèmes. Il faut noter en particulier celles effectuées naguère au Tchad (P. Audry) et celles en cours de réalisation *in situ* sur les vertisols en Guadeloupe (Y.M. Cabidoche *et al.*, 1984) couplées avec des études sur l'organisation microstructurale et macrostructurale des matériaux argileux effectuées en France (D. Tessier, 1984).

Il est bon de signaler aussi celles entreprises en rapport avec l'autodéveloppement naturel des systèmes de transformation dont il a été question plus haut, surtout dans la zone soudanosahélienne à savane sèche. Alors que dans les régions plus sèches, la dynamique est essentiellement superficielle et latérale et que dans les régions plus humi-

The case treated above in North Cameroon is a patent example, although there are others (for example, the 1:350,000 maps of the coastal plains of Guyana made by Turenne).

Furthermore, when the pedologic cover is in disequilibrium, *structural analysis* is practically the only method capable of analysing and predicting the evolution under anthropic action of the extremely variable toposéquences.

Middle Casamance (Senegal), studied by Chauvel (1976), where red ferrallitic soils and beige tropical ferruginous soils are found, is a typical case (see Appendix VIII).

The application of structural analysis at small scale with a view to agricultural experiments is beginning to bear fruit: we may cite the work of Boulet and Godon in Guyana (1985) (see Appendix IX).

■ Other pedological studies

Hydro-pedological studies

This research includes a whole range of work concerned with:

- erosion studies, in particular the transfer of solids and their variations as a function of bioclimatic conditions in West Africa;
- *in situ* water dynamics, notably in transformation systems;
- the suitability of soils for irrigation;

• *Knowledge of Water Dynamics and their Impact*

In this field we can look at in succession hydrological, pedological and agropedological aspects (under cultivation).

Studies of water dynamics have been carried out in various places and on several types of system. We mention in particular those carried out recently in Chad (Audry) and the field work in progress on the Vertisols of Guadeloupe (Cabidoche, 1984) in conjunction with studies of the micro-and macro-structures of argillaceous material carried out in France (Tessier, 1984).

It is also worth mentioning research concerning the natural spontaneous development of transformation systems, especially in the Sudanese-Sahelian region of dry savanna. Whereas water movements are essentially superficial and

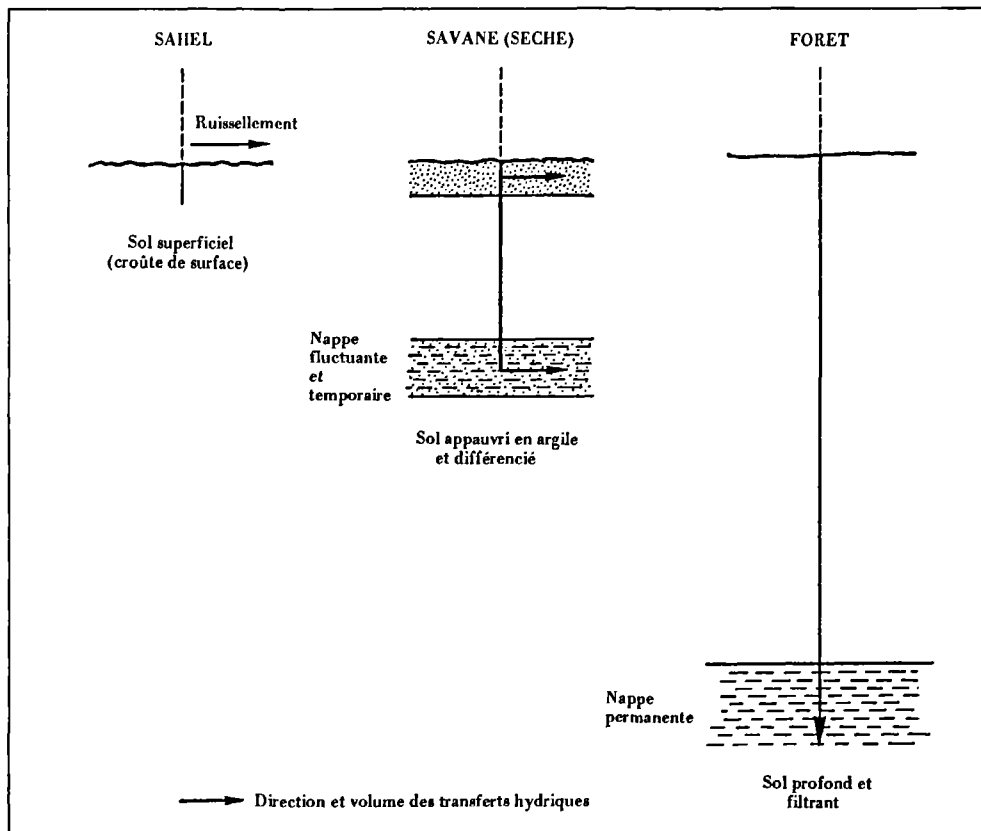


Fig. 10. Évolution schématique des transferts hydriques à la surface ou au sein des couvertures pédologiques en fonction des caractéristiques bioclimatiques
Schematic evolution of water transfers to the surface or within pedological covers in terms of bioclimatic characteristics

des, la dynamique est avant tout interne et verticale (avec nappes permanentes se trouvant à grande profondeur), la zone soudanosahélienne voit les phénomènes pédohydriques affecter *tout* le profil et être préférentiellement à polarité latérale. Mais deux niveaux principaux sont affectés (fig. 10) :

- le niveau superficiel où les transferts latéraux temporaires sont à l'origine du phénomène d'*appauvrissement* de surface (A_2),
- le niveau plus profond à la limite des matériaux d'altération et des horizons B où la présence temporaire d'une nappe *en charge* est à l'origine d'un déséquilibre interne des matériaux ferrallitiques avec séparation brusque du plasma et du squelette, transport latéral du plasma vers l'aval où le confinement tend à se développer et mise en place d'un horizon lessivé interne (A'_2).

Les deux niveaux finissent d'ailleurs par se rejoindre vers l'amont et on se trouve alors devant des sols complètement appauvris en argile (sols éluviés), tandis que se développent à l'aval des sols argileux entièrement illuviés (type vertisols topomorphes) (1).

Ainsi, la considération de la dynamique hydrique des profils associée aux conditions bioclimatiques du milieu a permis de bien situer les différents sols catalogués sur le terrain, à la fois dans le contexte paysagique et dans le contexte latitudinal (climatique et paléoclimatique) (fig. 10 et 11).

(1) A DISTINGUER DES VERTISOLS LITHOMORPHES OU VERTISOLS D'ALTÉRATION.

lateral in the driest regions and internal and vertical in the wettest regions (with permanent ground water table at great depth), in the Sudanese-Sahelian region pedohydric phenomena affect *all* the levels and care preferentially of lateral polarity. However, two principal levels are affected (fig. 10):

- at the surface, where intermittent lateral transfers are the cause of impoverishment (A_2);
- at the deeper layer marking the limit of the alteration material and the B horizons where the temporary presence of a water table *under pressure* is the cause of an internal disequilibrium of the ferrallitic material resulting in an abrupt separation of plasma and skeleton, and of lateral upstream movement of the plasma which tends to become confined and to form an *internal* leached horizon (A'_2).

In the end the two levels join each other upstream and the soils then become entirely eluviated, whereas completely illuviated soils develop downstream (topomorph Vertisols – rather than lithomorph or alteration Vertisols).

• *Run-off, Surface Dynamics and Erosion in West Africa*

The results obtained by Roose (1981) are summarized in Appendix X. Comparisons are made between the region of dense forest and the humid savanna areas and also between cultivated and uncultivated savanna.

These results were all confirmed and extended later by Valentin using rain simulators (in particular the mini rain simulator) (Appendix XI).

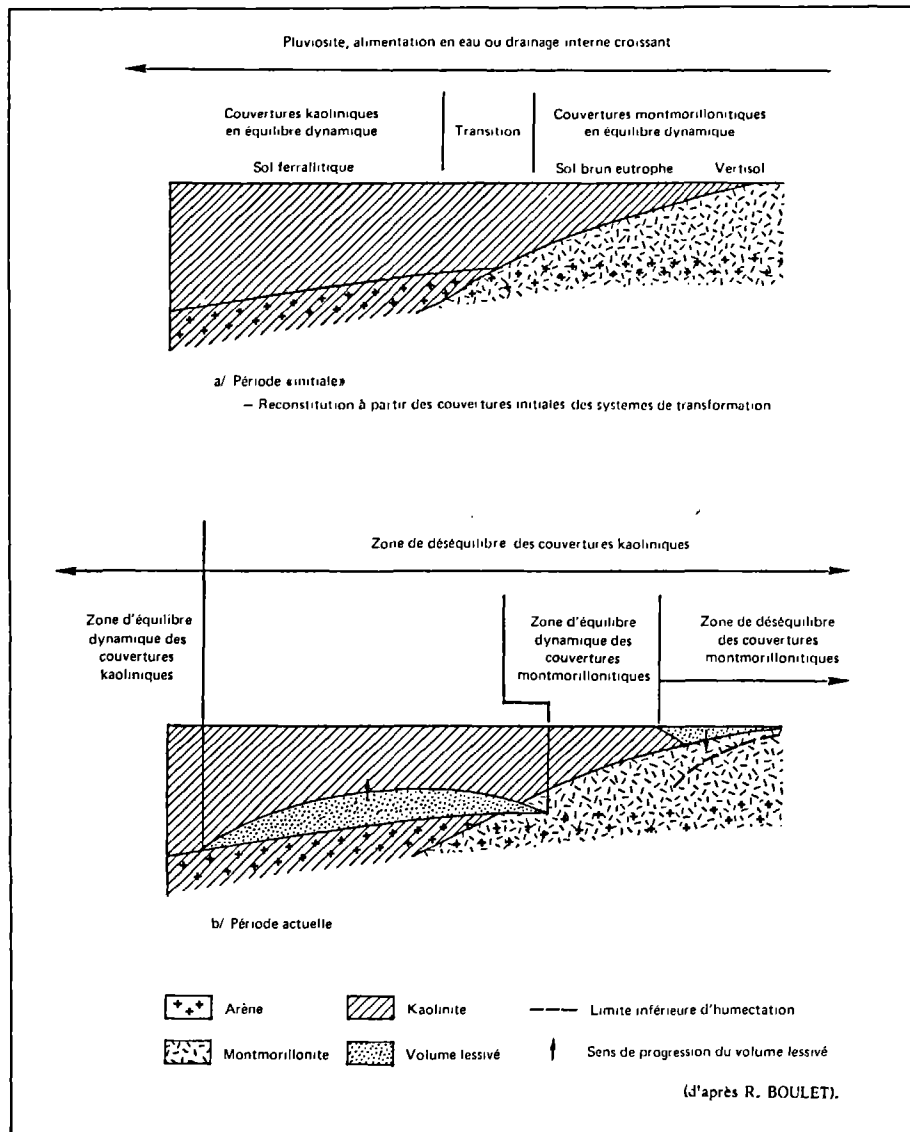


Fig. 11. Développement des systèmes de transformation aux dépens des couvertures pédologiques initiales dans l'Afrique de l'Ouest
Development of systems of transformation at the expense of initial pedological covers in west africa

Il faut indiquer enfin toutes les recherches effectuées en conditions tropicales humides sur l'évolution structurale et hydrique des sols après défrichage et mise en culture (P. Quantin, 1964-1972 ; Ph. de Blic, 1973-1979 ; R. Moreau, 1978-1985 ; E. Braudeau, 1985 - Y.M. Cabidoche, 1983 - J.P. Cointepas, 1982 - C. Charreau et R. Nicou, 1971...).

• *Ruissellement, dynamique superficielle et érosion. Cas de l'Afrique de l'Ouest*

Les mesures et observations rassemblées par E. Roose (1981) sont résumées dans l'Annexe X, où l'on compare la zone forestière à la zone de savane humide d'un côté, le milieu naturel de savane au même milieu cultivé d'un autre.

Ultérieurement, tous ces résultats ont été confirmés et approfondis grâce au simulateur de pluie, et en particulier au minisimulateur par C. Valentin (Annexe XI).

• *Aptitude des sols à l'irrigation*

Un exemple est donné à propos du Niger (Annexe XII).

Thus the study of the hydrodynamics of soil profiles as a function of the local bioclimatic conditions has allowed the soils to be correctly cataloged in their national context and in their regional context (climatic and paleoclimatic) (fig. 10 and 11).

Finally, we should mention the research carried out in humid tropical regions on the structural and hydric evolution of soils following land clearing and conversion of the land to agricultural use (Quantin, 1964-72; de Blic, 1973-79; Moreau, 1978-85; Braudeau, 1985; Cabidoche, 1983; Cointepas, 1982; Charreau and Nicou 1971; etc).

• *Irrigation Aptitude*

An example concerning Niger is given in Appendix XII

Études de milieux particuliers

Il sera fait état ici de plusieurs cas :

- les bas-fonds,
- les zones marginolittorales,
- les sols salés.

• Les bas-fonds

A côté des grandes cuvettes endoréiques (Niger, Tchad) où les sols des zones inondées ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux fondamentaux (C. Cheverry, 1974 ; J.F. Vizier, 1983 notamment), un accent tout à fait particulier a été mis sur un milieu spécifique de l'Afrique et qui recouvre l'appellation de *bas-fonds*, concept jusqu'alors assez flou, mais qui a pu être précisé récemment (M. Raunet, 1982-1985). Des renseignements complémentaires à ce sujet sont reportés dans l'Annexe XIII.

• Les milieux fluviomarins tropicaux

Domaine de la mangrove caractérisé par le développement de processus de sulfatation accompagnés de formation de sulfures (pyrites), ces milieux au fur et à mesure de leur exondation (naturelle ou artificielle) sont susceptibles d'évoluer dans le sens d'une hyperacidité marquée ($\text{pH} \leq 2$), et donc d'une stérilisation totale.

Des travaux fondamentaux réalisés au Sénégal notamment (cf. J. Vieillefon, 1977 ; C. Marius, 1979-1984 ; J.Y. Le Brusq, 1985) ont permis :

- d'une part d'aborder l'étude de la biogéochimie des phénomènes *in situ* ;
- et d'autre part de préciser la nature des évolutions de ces milieux en fonction des conditions bioclimatiques tropicales, depuis les régions humides jusqu'à celles caractérisées par une saison sèche marquée.

Dans ces dernières, l'oxydation des sulfures peut se produire naturellement au sein de la zone du schorre avec le développement des *tannes* à sols sulfatés acides. Il est certain qu'il s'agit là de milieux difficiles, mais en se basant sur des investigations physicochimiques fondamentales, il a pu être formulé des propositions intéressantes (S. Guillobez, 1984) en vue de la conduite de la riziculture aquatique. Notons qu'en raisonnant d'une manière analogique, une solution du même type a pu être envisagée pour les sols hyperalcalins d'Afrique (Hardé...).

• Les sols salés et les phénomènes de salinisation naturelle et artificielle (irrigations) dans les zones arides

A partir d'exemples pris en Afrique, toute une série de travaux de base concernant la modélisation et la simulation des phénomènes de salinisation ont été réalisés : C. Cheverry, 1974 ; B. Fritz, 1975 ; A. Drouby, 1976 ; G. Maglione, 1976 ; M. Dosso, 1980 ; J.Y. Gac, 1980 ; M. Rieu, 1983 ; S. Guillobez, 1984. Ils ont permis de mieux appréhender les aspects de la salinisation des sols et surtout les problèmes de prédiction de la salure en fonction des conditions bioclimatiques et édaphiques, de la composition des eaux d'irrigation et des doses éventuellement conseillées.

Téledétection spatiale. Mises au point méthodologiques

Des méthodologies ont été mises au point, d'une part pour l'identification et le suivi de composantes des Milieux agricoles : surface cultivée, forêt, humidité superficielle, d'autre part pour le suivi de la dynamique de la végétation pastorale sahéenne (deux exemples sont développés en

Studies of special environments

We shall mention here three special environments:

- tropical valley bottom ("bas fonds");
- tropical littoral margins;
- saline soils.

• Tropical Valley Bottoms

Beside large endorheic basins where the soils of inundated zones have been the subject of fundamental research (Cheverry, 1974; Vizier, 1983), special attention has been given to an environment specific to Africa known as "bas-fonds", whose definition was until now rather vague but has recently been clarified (Raunet, 1982). Further details are given in Appendix XIII.

• Tropical Littoral Margins

These mangrove areas are notable for the process of sulphate reduction accompanied by the formation of sulphides (pyrites). As they become exundated, either naturally or artificially, such areas tend to evolve towards hyperacidity ($\text{pH} < 2$) and therefore towards total sterility.

Basic work carried out notably in Senegal (Vieillefon, 1977; Marius, 1979-84; Le Brusq, 1985) has:

- allowed the study *in situ* of the biogeochemistry of these phenomena;
- identified the evolution of these areas as a function of the tropical bioclimatic conditions, from the wettest regions to those with an extended dry season.

In the drier regions, oxidation of sulphides may naturally occur within the schorre, producing patches of acid sulphate soils.

Soils of such coastal regions are certainly very difficult to exploit. However, following fundamental studies of their physics and chemistry, interesting propositions concerning rice culture have been made (Guillobez, 1984). Note that similar solutions have been envisaged for hyperalkaline African soils (Hardé, etc).

• Saline Soils and Natural and Artificial (Irrigation) Salinization in Dry Zones

Based on examples found in Africa, a whole series of basic studies concerning the modelling and simulation of salinization phenomena have been carried out (Cheverry, 1974; Fritz, 1975; Drouby, 1976; Maglione, 1976; Dosso, 1980; Gac, 1980; Rieu, 1983; Guillobez, 1984), which have improved our understanding of salinization resulting from natural or artificial irrigation in arid regions, and above all have helped in the prediction of salinity as a function of bioclimatic and edaphic conditions and the composition and volume of irrigation water.

annexe pour le N-E. de la Thaïlande et dans le Nord Sénégal) (cf. Annexe XIV).

Perspectives et orientations des recherches

Malgré les résultats obtenus en zone tropicale et en Afrique notamment depuis une quarantaine d'années, il reste encore beaucoup à faire sur les sols, en raison à la fois de la difficulté de pénétration dans un grand nombre de régions et de la complexité de l'histoire pédologique des milieux à étudier. D'autant que dans les pays en développement, le sol continue à rester le *passage obligé* de l'agriculture ; c'est-à-dire à devoir être considéré comme un véritable *réacteur* naturel « intermédiaire indispensable », entre la mise en culture avec travaux du sol et apport éventuel d'intrants d'un côté, la production végétale de l'autre, et non comme un *support* plus ou moins « artificialisé » servant au simple transit : Intrants → Plante. D'où l'intérêt, aujourd'hui comme hier, d'une bonne connaissance du milieu pédologique (état initial), afin de mieux l'utiliser et de bien le protéger.

Dans ce domaine, les perspectives à développer restent grandes, et il est possible de les envisager en considérant successivement trois niveaux :

- les méthodes à utiliser et à développer,
- les milieux à étudier,
- les programmes à poursuivre et à initier.

Méthodes

De ce point de vue, la situation actuelle se présente de la façon suivante :

- abandon *progressif* de l'approche taxonomique de caractérisation et de classification des sols,
- accent à mettre sur l'*analyse structurale* pour continuer l'inventaire des systèmes de transformation pédologique, et surtout pour mettre au point le plus rapidement possible une méthodologie permettant de présenter des documents cartographiques à *grande* échelle (passage de l'aspect bidimensionnel-séquence - à l'aspect tridimensionnel-spatial),
- développement de l'approche *géostatistique* dans la connaissance de la distribution spatiale des caractères pédologiques à grande échelle, les recherches effectuées en ce moment en Côte d'Ivoire et au Sénégal s'avérant tout à fait probantes (J.M. Iris, P. Boivin, M. Bourgeon, M. Arnaud...),
- intensification de l'utilisation de la *télétection* aérospatiale dans la caractérisation des milieux superficiels tropicaux. Les recherches effectuées jusqu'ici, ayant donné des résultats très intéressants (Thaïlande, Sénégal, Burkina Faso, Guinée...).

Milieux

Parmi les milieux bioclimatiques tropicaux, les perspectives actuelles tendent à restreindre l'effort d'analyse entrepris jusqu'ici en zone de savane, pour le porter sur deux autres milieux :

Remote sensing studies: methodological approach

Methods of analysis of satellite data have been developed in order to identify the constituents of agricultural regions: cultivated area, forests, surface water, and also to monitor the development of the Sahelian pastoral vegetation (two examples are given in Appendix XIV, one for northeast Thailand, the other for northern Senegal).

Research orientations and perspectives

Despite the results obtained in tropical regions and particularly in Africa over the past forty years, a great deal of work on soils remains to be done, due to both the difficulty of access to many areas and the complex pedological history of the environments to be studied. So much so that in the developing countries, soil remains an *integral part* of the agricultural process; in other words it must be regarded as an indispensable agent in the transformation from planting (including tilling the soil, perhaps with the addition of inputs) to plant production and not merely as playing *supporting role* in a simple transformation from inputs to plant. Hence the interest, which continues to this day, in obtaining a thorough understanding of the pedological environment (in its original state), in order to make better use of it and to protect it adequately.

In this field, the development prospects remain considerable. They can be appreciated by looking in turn at three levels:

- the methods to be used and intensified;
- the environments to be studied;
- the programs to pursue and initiate.

Research methods

The situation today may be summarized as follows:

- the taxonomic approach to soil characterization and classification is progressively abandoned;
- increasing use of *structural analysis* for inventories of pedologic transformation systems and also to enable the development as quickly as possible of a system of producing large-scale cartographic documents passing from the two-dimensional sequential aspect to the three-dimensional spatial aspect;
- development of a *geostatistic approach* to the study of spatial distributions of pedologic characteristics at large scale; research in progress in Senegal and the Ivory Coast is producing very convincing results (cf. Iris, Boivin, Bourgeon, Arnaud, etc);
- increasing use of *aerospatial remote sensing* in the study of tropical landscapes; results obtained so far in Thailand, Senegal, Burkina Faso and Guinea are proving to be very interesting.

- d'une part, les milieux tropicaux arides (*Sahel, Nordeste*), avec poursuite des travaux de caractérisation physicohydraulique, associés à la simulation de pluie et à des études fondamentales (P. Audry, M. Forest, Y.M. Cabidoche, M. Rieu, D. Tessier). Ce sont là les problèmes de gestion de l'eau et de conservation des sols qui viennent en premier,

- d'autre part, les milieux forestiers *humides* (Afrique Centrale, Amazonie)..., dont l'étude s'avère être encore insuffisante. Or, il s'agit là de domaines, qui sont parmi les plus affectés aujourd'hui par les opérations de défrichement et qui posent par ailleurs un certain nombre de problèmes du fait de leur forte *acidité* et de leur richesse en aluminium libre. D'où le développement récent de travaux au Cameroun, au Congo, en Amazonie ; des recherches de base ont été effectuées à ce sujet en Guyane (Opération ECEREX). Tout ceci sera coordonné dans un proche avenir aux programmes « Land clearing and soils acidity » gérés par le réseau international de l'IBSRAM, les relations de travail avec cet Institut étant très étroites.

Programmes prioritaires

On peut les regrouper autour d'un certain nombre de pôles.

- Continuation de l'inventaire des sols et de leur caractérisation dans les zones difficiles, avec notamment l'utilisation de l'analyse structurale, de l'analyse géostatistique et de la télédétection.

- Expression cartographique généralisée de zones pédologiquement analysées : *extension des travaux cartographiques réalisés dans le Nord Cameroun à toute la zone de savane humide de l'Afrique de l'Ouest (500-1 400 mm)*,

- Poursuite et intensification des études sur le fonctionnement hydrique des sols : problèmes des relations sols-eaux-sels solubles, et de leurs conséquences sur le plan physicochimique. Appui de la simulation de pluie.

- Développement des travaux agropédologiques sur l'influence de l'homme et de la mise en culture quant à l'évolution et à la gestion des sols tropicaux :

- suivi des caractéristiques chimiques ;
- dynamique de la matière organique : problèmes de statut organique et de fertilité physique ;
- évolution structurale et dégradation des sols.

- Développement des travaux cartographiques pour l'amélioration du Diagnostic dans les projets de recherche-développement :

- identification et suivi des Milieux agricoles et de leur composante (Télédétection, surtout en se basant sur les images Spot) ;

- identification et suivi des processus d'érosion (nature, intensité, extension) ;

- cartographie morphopédologique pour l'identification des contraintes agronomiques et leur résolution par le choix de sites d'expérimentation agronomiques représentatifs.

Renseignements complémentaires

Ils concerneront les 3 aspects suivants :

- potentiel de pédologues français intervenant actuellement dans les régions chaudes du Globe ;
- action de formation de pédologues et de techniciens

Research environments

Among the various tropical bioclimates, the trend today is an extension of analyses carried out in savanna areas to two other types of region:

- arid tropical areas (Sahel, Nordeste): further work on physical and hydric definitions using rain simulators (Audry, Forest, Cabidoche, Rieu, Tessier), priority being given to problems of water management and soil conservation;

- wet forest areas (Central Africa, Amazonia, etc), which have been insufficiently studied. These areas are among those most affected by land clearing and also pose a number of special problems arising from the high soil *acidity* and free aluminium levels. Work in Cameroon, Congo and Amazonia have been extended and basic research carried out in Guyana (ECEREX project). All this work as soon to be coordinated with the "Land Clearing and Soil Acidity" program organized by the international network of the IBSRAM with whom French research institutes maintain close contact.

Priority programs

The priorities of existing and future programs are as follows:

- to continue the soil inventory and characterization in difficult areas using structural analysis, geostatistic analysis and remote sensing;

- to carry out general mapping of pedological zones that have been studied: *extension of mapping done in Northern Cameroon to the entire humid savanna zone of West Africa (500-1 400 mm)*;

- to intensify work in the hydrological regime of soils. Study of problems related to soluble salt content of water in soils and their physical and chemical consequences. Use of rain simulators;

- to develop agropedological study of the influence on soils and their evolution of human activity and of the conversion of land to agricultural use:

- monitoring of chemical characteristics;
- the dynamics of organic matter: problems of organic state and physical fertility;
- structural evolution and degradation of soils.

prospecteurs étrangers des pays en développement au sein des Établissements français d'enseignement et de recherche tropicale ;

- information scientifique sur les interventions pédologiques dans les PED réalisées par les Organismes français.

Potentiel de pédologues français intervenant dans les régions chaudes du Globe

Dans ce domaine, il faut distinguer deux cas :

- le cas des chercheurs affectés directement à l'étude de problèmes pédologiques dans les régions chaudes du Globe. Ils appartiennent à des Organismes tels que l'ORSTOM ou le CIRAD, auxquels il faut ajouter un certain nombre de pédologues de l'INRA. A l'heure actuelle, cela représente 100 chercheurs, qui se décomposent ainsi :

– 64 sont en *poste fixe* dans les pays en développement avec la répartition suivante :

AFRIQUE (26)

Afrique Méditerranéenne (5)

Afrique Tropicale (21) : Cameroun (2), Centre Afrique (1), Congo (3), Côte d'Ivoire (4), Sénégal (9), Togo (2).

AMÉRIQUE LATINE (28)

Antilles (8), Guyane (9), Venezuela (1), Equateur (1), Mexique (2), Nicaragua (1), Brésil (6).

OCÉAN INDIEN - ASIE-PACIFIQUE (10)

Ile Maurice (1), Inde (1), Indonésie (1), Nouvelle Calédonie (7).

– 36 peuvent intervenir à tout moment, au moins une fois par an mais souvent pluriannuellement, dans un pays des régions chaudes,

- le second cas est celui des chercheurs en poste en France, mais qui travaillent ou sont susceptibles de travailler sur les sols des régions chaudes. Appartenant à des Organismes tels l'INRA et le CNRS ou encore à l'Université (Laboratoires de Pédologie), on peut évaluer leur nombre à 120.

Au total, cela correspond à un potentiel chercheurs très élevé. En outre, il est bon de noter que plus de la moitié des pédologues français ont une spécialité tropicale et que cette spécificité est loin d'être nouvelle, l'expérience tropicale ayant une quarantaine d'années derrière elle.

Action de formation en pédologie réalisée en France entre 1950 et 1985

Il faut distinguer à ce propos les pédologues et les techniciens-prospecteurs.

- *Pédologues*

Il s'agit ici d'une post-graduation universitaire comprenant deux années d'étude : une d'enseignements théoriques et pratiques de Pédologie tropicale dispensés en France (ORSTOM) et une seconde consacrée à un stage de cartographie des sols effectué dans un pays de la zone intertropicale différent du pays d'origine de l'étudiant, sous la responsabilité de pédologues seniors français en poste dans la région.

Depuis les années 1950, il a été formé ainsi 160 pédologues étrangers en provenance de 37 pays :

Supplementary information

This chapter gives information concerning:

- the number of French pedologists presently working in the warm areas of the earth;
- training at French teaching and research institutes of foreign pedologists and technicians from developing countries;
- scientific documentation on pedologic interventions by French institutes in developing countries.

Potential for French pedologists

French pedology workers may be divided into two groups.

- First, researchers who are directly assigned to the study of pedologic problems in the warm areas of the earth. They belong to various institutes such as ORSTOM or CIRAD; some also work for the INRA.

There are currently 100 researchers of which 64 are working *permanently* in developing countries:

AFRICA (26)

Mediterranean Africa (5)

Tropical Africa (21) : Cameroon (2), Central Africa (1), Congo (3), Ivory Coast (4), Senegal (9), Togo (2).

LATIN AMERICA (28)

West Indies (8), Guiana (9), Venezuela (1), Ecuador (1), Mexico (2), Nicaragua (1), Brazil (6).

INDIAN OCEAN ASIA PACIFIC (10)

Mauritius (1), India (1), Indonesia (1), New Caledonia (7).

Another 36 scientists are available, intervening at least once and often several times per year.

- Secondly, about 120 researchers, who are studying or capable of carrying out studies of tropical soils, work permanently in France. They belong to various bodies such as the INRA or the CNRS or to Universities (Laboratories of Pedology).

The research potential is consequently *very high*. Furthermore, it is worth mentioning that more than half of French pedologists are specialized in tropical work, a specialization acquired through forty years experience.

Training of foreign pedologists in France between 1950 and 1985

Teaching of pedology in France began in 1950. A distinction should be made between pedologists and prospector-technicians.

- *Pedologists*

The diploma is a university two-year postgraduate degree: the first year involves theoretical and practical studies of tropical pedology and takes place in France (ORSTOM); the second year is dedicated to practical training in soil cartography and is spent in a tropical country (not the country of origin of the student) under the supervision of senior French pedologists working in the area.

A total of 160 foreign pedologists from 37 different countries have been trained since the 1950's:

AFRIQUE MÉDITERRANÉENNE (40)

Tunisie (20), Algérie (10), Maroc (9), Liban (1).

AFRIQUE TROPICALE (68)

Côte d'Ivoire (12), Cameroun (10), Bénin (7), Congo (6), Centre Afrique (6), Burkina Faso (5), Sénégal (5), Mali (3), Madagascar (3), Tanzanie (2), Tchad (2), Togo (2), Cap-Vert (1), Gabon (1), Mauritanie (1), Nigeria (1), Soudan (1).

AMÉRIQUE LATINE ET CENTRALE (33)

Venezuela (7), Colombie (7), Brésil (4), Cuba (4), Haïti (4), Uruguay (3), Bolivie (1), Mexique (1), Nicaragua (1), Paraguay (1).

ASIE (19)

Cambodge (10), Iran (3), Vietnam (3), Afghanistan (1), Laos (1), Pakistan (1).

• *Techniciens-prospecteurs*

La formation correspond à une année d'étude théorique et pratique réalisée en France (ORSTOM), conduisant à un diplôme de technicien pédologue.

Dans cette catégorie, il a été formé ainsi près de 75 *techniciens-prospecteurs* appartenant à plus de 20 pays. Leur répartition se fait de la façon suivante :

AFRIQUE MÉDITERRANÉENNE (32)

Tunisie (18), Algérie (8), Maroc (6).

AFRIQUE TROPICALE (33)

Côte d'Ivoire (15), Guinée (4), Gabon (3), Congo (2), Bénin (1), Burundi (1), Burkina Faso (1), Madagascar (1), Mali (1), Nigeria (1), Centre Afrique (1) Tchad (1) Togo (1).

AMÉRIQUE LATINE ET CENTRALE (2)

Nicaragua (1), Venezuela (1).

ASIE (6)

Afghanistan (2), Cambodge (1), Laos (1), Irak (1), Iran (1).

Ainsi, l'action de formation sur les sols tropicaux a concerné près de 235 *élèves étrangers* appartenant à une quarantaine de pays situés dans les régions chaudes du Globe.

Documentation disponible sur les sols des régions chaudes au sein des Organismes français

Dans ce domaine, on doit distinguer les documents publiés et donc répertoriés dans les bibliothèques et les catalogues d'une part, et les documents *non* publiés d'autre part.

• *Documents publiés*

Il s'agit de notes scientifiques publiées dans des revues de pédologie, de mémoires et thèses en Science des Sols concernant les régions tropicales; enfin de cartes (avec notices).

Tout ce qui est publié en pédologie (notes et cartes) par les Organismes de recherche (ORSTOM et CIRAD notamment) est consigné dans des *catalogues* qui sont régulièrement mis à jour et disponibles à tout moment.

• *Documents non publiés*

Dans ce domaine scientifique, les documents de ce type sont très nombreux. Ils sont *tous* inventoriés dans les Organismes respectifs et susceptibles, de ce fait, d'être consultés à *tout moment*. Mais leur nombre est grand, en sorte qu'il est impossible de les répertorier dans ce genre de Rapport. Il est aisé en revanche d'indiquer leur volume

MEDITERRANEAN AFRICA (40)

Tunisia (20), Algeria (10), Morocco (9), Lebanon (1).

TROPICAL AFRICA (68)

Ivory Coast (12), Cameroon (10), Benin (7), Congo (6), Central African Republic (6), Burkina Faso (5), Senegal (5), Mali (3), Madagascar (3), Tanzania (2), Chad (2), Togo (2), Cape Verde Islands (1), Gabon (1), Mauritania (1), Nigeria (1), Sudan (1).

LATIN AND CENTRAL AMERICA (33)

Venezuela (7), Colombia (7), Brazil (4), Cuba (4), Haiti (4), Uruguay (3), Bolivia (1), Mexico (1), Nicaragua (1), Paraguay (1).

ASIA (19)

Cambodia (10), Iran (3), Vietnam (3), Afghanistan (1), Laos (1), Pakistan (1).

• *Prospector-technicians*

The training includes one year of theoretical and practical studies in France (ORSTOM) leading to a pedologic technician diploma.

A total of 75 prospector-technicians belonging to more than 20 different countries have been trained. The distribution is as follows:

MEDITERRANEAN AFRICA (32)

Tunisia (18), Algeria (8), Morocco (6).

TROPICAL AFRICA (33)

Ivory Coast (15), Guinea (4), Gabon (3), Congo (2), Benin (1), Burundi (1), Burkina Faso (1), Madagascar (1), Mali (1), Nigeria (1), Central African Republic (1), Chad (1), Togo (1).

LATIN AND CENTRAL AMERICA (2)

Nicaragua (1), Venezuela (1).

ASIA (6)

Afghanistan (2), Cambodia (1), Laos (1), Irak (1), Iran (1).

Therefore the training program concerns *about 235 foreign students* belonging to 40 different countries situated in the warm areas of the earth.

Documentation on soils

There are two sorts of documents: those which are published and therefore listed in libraries and catalogs, and those which have not been published.

• *Published documents*

These concern scientific articles published in pedology reviews, student theses in soil science of tropical areas, and also maps (with accompanying documents).

All the pedologic publications (articles and maps) of the research institutes (ORSTOM and CIRAD mainly) are listed in catalogs which are available in any time.

• *Non-published documents*

There are many non-published documents in this scientific field. They all are cataloged by the respective institutes and may therefore be consulted at any time. However, it is not possible to establish an exhaustive list in the present report for there are about 5,700 titles (even if work carried out in Algeria, Tunisia, Morocco and Vietnam before their independence is excluded): ORSTOM 5,007 - CIRAD 686 (IRAT 570 - IRFA 70 - IRHO 46). The documents cataloged in the various libraries in France are geographically distributed as follows:

AFRICA (3 814)

MEDITERRANEAN AFRICA (575)

qui s'élève à près de 5 700 titres (1), se distribuant ainsi : ORSTOM 5007 - CIRAD 686 (IRAT 570 - IRFA 70 - IRHO 46). La répartition géographique de ces documents se présente de la façon ci-après :

AFRIQUE (3 814)

Afrique méditerranéenne (575) : Tunisie (321), Maroc (160), Liban (45), Algérie (38), Lybie (6), Syrie (4), Egypte (1).

Afrique tropicale (3 239) : Madagascar (557), Côte d'Ivoire (438), Sénégal (350), Cameroun (356), Centre Afrique (288), Congo (256), Tchad (209), Gabon (143), Togo (134), Bénin (130), Burkina Faso (127), Mali (74), Guinée (58), Niger (47), Mauritanie (37), Ethiopie (12), Nigeria (4), Tanzanie (3), Liberia (3), Djibouti (3), Kenya (3), Soudan (2), Egypte (1), Rwanda (1), Zambie (1), Sierra Leone (1).

AMÉRIQUE LATINE ET CENTRALE (371)

Guyane (194), Antilles (46), Brésil (45), Equateur (22), Venezuela (14), Mexique (10), Cuba (8), Haïti (8), Nicaragua (6), Colombie (6), Pérou (4), Argentine (3), Chili (2), Costa-Rica (1), Bolivie (1), Panama (1).

ASIE-OCÉAN INDIEN-PACIFIQUE (282)

Pacifique (190), Réunion (24), Comores (12), Maurice (5), Afghanistan (17), Arabie Saoudite (8), Indonésie (11), Thaïlande (6), Irak (4), Iran (2), Vietnam (1), Laos (1), Cambodge (1).

RAPPORTS GÉNÉRAUX ET DIVERS : (1 226)

Notons ici que des bibliographies partielles ont été établies pour certains domaines ou pays. On peut citer par exemple celle réalisée par V. Eschenbrenner (1979) pour les pays du Bassin du Niger et celle aussi mise au point par M. Gavaud en 1985.

Conclusions

Ce rapport avait pour but de brosser un aperçu sur ce que les Organismes Français de Recherche pour les Régions Chaudes ont réalisé depuis une quarantaine d'années, et sont à même de réaliser dans l'avenir, plus spécialement en ce qui concerne les sols des vieilles zones stables intertropicales.

Dans les problèmes de développement, et en particulier de mise en valeur agricole, le sol est bien le partenaire privilégié de l'homme. Sa connaissance en tant que constituant majeur de l'écosystème terrestre s'avère être donc fondamentale ; et c'est en application d'un proverbe familier en France « Terre connue est à moitié vaincue », que depuis la fin de la dernière guerre des recherches ont été entreprises sur cette question. Dans ce domaine, il est bon de redire ici que les milieux à étudier sont en général difficiles à appréhender (climat-durée...) et que, de ce fait, toutes les actions entreprises ont été avant tout des opérations de recherche au sens plein du terme. Cette stratégie d'approche a semblé indispensable pour pouvoir un jour être à même de dominer quelque peu les problèmes à résoudre. Cela est d'autant plus vrai que, dans ces régions, l'homme peut être un agent pédologique très puissant, notamment dans les domaines à déséquilibre interne (cf. Opération ECEREX Guyane).

Par ailleurs, les travaux réalisés ont permis de se rendre compte que si la surface du Globe constituait un monde

Tunisie (321), Morocco (160), Lebanon (45), Algeria (38), Libya (6), Syria (4), Egypt (1).

TROPICAL AFRICA (3 239)

Madagascar (557), Ivory Coast (438), Senegal (350), Cameroun (356), Central African Republic (288), Congo (256), Chad (209), Gabon (143), Togo (134), Benin (130), Burkina Faso (127), Mali (74), Guinea (58), Niger (47), Mauritania (37), Ethiopia (12), Nigeria (4), Tansania (3), Liberia (3), Djibouti (3), Kenya (3), Sudan (2), Egypt (1), Rwanda (1), Zambia (1), Sierra Leone (1).

LATIN AND CENTRAL AMERICA (371)

Guyana (194), West Indies (46), Brazil (45), Ecuador (22), Venezuela (14), Mexico (10), Cuba (8), Haiti (8), Nicaragua (6), Colombia (6), Peru (4), Argentina (3), Chile (2), Costa-Rica (1), Bolivia (1), Panama (1).

ASIA INDIAN OCEAN PACIFIC (282)

Pacific (190), Reunion (24), Comores (12), Maurice (5), Afghanistan (17), Saudi Arabia (8), Indonesia (11), Thailand (6), Irak (4), Iran (2), Vietnam (1), Laos (1), Cambodia (1).

MISCELLANEOUS REPORTS (1 226)

Conclusion

This report gives an outline of the work carried out in warm regions of the world by French research institutions in the last forty years, and which they are capable of carrying out in the future, especially projects concerning the soils of old stable areas in the tropics.

In all work concerning land development, particularly in agriculture, the soil is man's partner and a knowledge of its characteristics as a component of the ecosystem is fundamental. The well-known French proverb "Terre connue est à moitié vaincue" ("terrain which is understood is already half-conquered") explains well the amount of research devoted to this subject since the last world war. It is worth repeating that the regions studied are generally difficult to understand and because of this all work tends to be very basic research. This approach seems to indispensable in order one day to be able to resolve the problems arising in land development projects. It should also be remembered that human activity can have a very important pedological influence especially on the internal equilibrium of soils (see, for example, the ECEREX project in Guyana).

Moreover, research has shown that although the land surfaces of the earth reveal a certain organization and are subject to the same laws of pedogenesis, the pedological approach needs to be very different depending on whether the region under study is young or old, volcanic or calcareous, whether one is dealing with a stable shields or alluvial deposits. For this reason it is unthinkable to approach soil problems using an over-strict and univocal interpretation of pedology, which provides only a taxonomic approach, regardless of the environment in question. This important conclusion must be borne in mind in the future.

Finally, it should be noted that during recent years soil research has undergone a continuous evolution, the sense being from small scale to large scale, from long term to short term, from pedogenesis to functioning. This evolution is indispensable in view of the need to improve our understanding of the relations between soil problems and agronomic ones (see the report of C. Pieri and R. Moreau concerning soil-plant relations, fertilization, etc).

(1) SANS COMPTER LES TRAVAUX EN ALGÉRIE, TUNISIE, MAROC ET VIETNAM AVANT LEUR INDÉPENDANCE, NI CEUX RÉALISÉS PAR L'INRA AUX ANTILLES-GUYANE.

organisé et soumis aux *mêmes* grandes lois de la pédogenèse, l'approche pédologique devait être très différente, suivant que la région à étudier est jeune ou bien vieille, volcanique ou calcaire, qu'on a affaire à des boucliers stables ou à des zones alluviales... Il n'est donc pas concevable d'aborder les problèmes des sols en procédant à une lecture trop stricte et trop univoque de la pédologie, dont on sait que le seul instrument de travail est, pour tous les milieux, une approche de type taxonomique. C'est probablement là une des grandes leçons à retenir pour l'avenir.

Enfin, il faut noter depuis ces dernières années une évolution constante des recherches sur les sols, dans le sens allant de la petite échelle à la grande échelle, du long terme au court terme, de la pédogenèse au fonctionnement... Or, ceci constitue un des éléments primordiaux en vue d'une meilleure adéquation entre les problèmes de sols et ceux d'agronomie (Relations sol-plantes ; Fertilisation... cf. Rapport C. Pieri et R. Moreau), et par là même, une grande espérance de succès pour les travaux du futur.

Bibliographie générale (1)

- AUDRY P • 1967 • OBSERVATIONS SUR LE RÉGIME HYDRIQUE COMPARÉ D'UN SOL FERRUGINEUX TROPICAL FAIBLEMENT LESSIVÉ SOUS SAVANE ET SOUS CULTURES (ARACHIDE ET PÉNICILLAIRE). ORSTOM, FORT-LAMY, 26 P. ET COLLOQUE FERTIL. SOLS TROP., TANANARIVE, NOV. 1967, COM. 129, T. II, P. 1591-1614.
- AUDRY P / COMBEAU A / HUMBEL F.X / ROOSE E / VIZIER J.F • 1978 • ESSAI SUR LES DYNAMIQUES ACTUELLES DES SOLS. ORSTOM (PARIS), 126 P.
- AUDRY P • 1978 • MODÉLISATION DU RÉGIME HYDRIQUE D'UN SOL TROPICAL DRAINÉ. APPLICATION A UN SOL FERRALLITIQUE DU TCHAD ÉTUDIÉ SOUS SAVANE BOISÉE. ORSTOM (PARIS), 111 P.
- BEAUDET G / PEDRO G / FAUCK R / VOLKOFF B • 1986 • SOILS AND DURICRUSTS OF WEST AFRICA. HISTORY OF LANDFORM AND SOIL EVOLUTION. IN CATENA: NUMERO SPECIAL: SOILS AND LANDSCAPE DEVELOPMENT OF GONDWANALAND (SOUS-PRESSE).
- BEAUDOU A / CHATELIN Y • 1977 • MÉTHODOLOGIE DE LA REPRÉSENTATION DES VOLUMES PÉDOLOGIQUES. TYPOLOGIE ET CARTOGRAPHIE EN MILIEU FERRALLITIQUE. ORSTOM, CAHIERS, SÉR. PÉDOLOGIE, XV, 1, P. 3-18.
- BERTRAND R • 1985 • SODISATION ET ALCALISATION DE SOLS DE L'OFFICE DU NIGER (MALI). RAPPORT DE MISSION IRAT, 25 P.
- BLIC PH de • 1976 • LE COMPORTEMENT DES SOLS FERRALLITIQUES DE CÔTE D'IVOIRE APRÈS DÉFRICHEMENT ET MISE EN CULTURE MÉCANISÉE : RÔLE DES TRAITS HÉRITÉS DU MILIEU NATUREL. ORSTOM, CAHIERS, XIV, 2, P. 113-130.
- BOCQUIER G • 1971 • GENÈSE ET ÉVOLUTION DE DEUX TOPO-SÉQUENCES DE SOLS TROPICAUX AU TCHAD. INTERPRÉTATION BIO-GÉODYNAMIQUE. ORSTOM, MÉMOIRES, N° 62, 350 P. (1973).
- BOVIN P • 1984 • ÉTUDE PÉDOLOGIQUE DE LA VALLÉE DE KOUBALAN (BASSE CASAMANCE). RAPPORT CENTRE ORSTOM DAKAR, 73 p.
- BOULET R • 1974 • TOPOSÉQUENCE DE SOLS TROPICAUX EN HAUTE-VOLTA. ÉQUILIBRE ET DÉSÉQUILIBRE PÉDOBIOCLIMATIQUE. ORSTOM, MÉMOIRES, N° 85, 272 P. (1978).
- BOULET R / AL • 1978 • ANALYSE STRUCTURALE ET CARTOGRAPHIE EN PÉDOLOGIE. CAHIERS ORSTOM PÉDOLOGIE, 4, P. 309-351.
- BOULET R / CHAUVEL A / LUCAS Y • 1984 • LES SYSTÈMES DE TRANSFORMATION EN PÉDOLOGIE. IN LIVRE JUBILAIRE DU CINQUANTENAIRE DE L'AFES, P. 167-179.
- BOURGEAT M / AL • 1973 • RELATIONS ENTRE LE RELIEF, LES TYPES DE SOL ET LEURS APTITUDES CULTURALES SUR LES HAUTES TERRES MALGACHES. COMPTE RENDU ACAD. AGRICULTURE DE FRANCE, P. 773-780.
- CABIDOCHÉ Y M • 1979 • UNE APPROCHE CARTOGRAPHIQUE DU FONCTIONNEMENT DES SOLS DE GUYANE COMME SUPPORT DES PRODUCTIONS FOURRAGÈRES. IN LES COLLOQUES DE L'INRA, N° 24, PRAIRIES GUYANAISES ET ÉLEVAGE BOVIN, P. 127-163.

(1) CETTE BIBLIOGRAPHIE EST ÉTABLIE ESSENTIELLEMENT EN FONCTION DU CONTENU DU RAPPORT. ELLE EST DONC FORCÉMENT INCOMPLÈTE, SURTOUT SI ON SE RÉFÈRE À L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS SUR LES SOLS PUBLIÉS PAR LES DIVERS ORGANISMES. THIS BIBLIOGRAPHY IS BASED ESSENTIALLY ON THE CONTENT OF THE PRESENT REPORT AND IS THEREFORE INCOMPLETE, ESPECIALLY IF REFERENCE IS MADE TO THE WHOLE COLLECTION OF SOIL DATA PUBLISHED BY THE VARIOUS INSTITUTES.

- CABIDOCHÉ Y M / JAILLARD B • 1984 • ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL ARGILEUX GONFLANT. SCIENCE DU SOL, 3, P. 239-251.
- CHARREAU C / NICOU R • 1971 • L'AMÉLIORATION DU PROFIL CULTURAL DANS LES SOLS SABLEUX ET SABLO-ARGILEUX DE LA ZONE TROPICALE SÈCHE OUEST-AFRICAINE ET SES INCIDENCES AGRONOMIQUES. AGRON. TROP. 26, 9 : 903-978 et 11, P. 1183-1247.
- CHAUVEL A • 1976 • RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES. ORSTOM, TRAVAUX ET DOCUMENTS, N° 62, 532 P. (1977).
- CHEVERRY C • 1974 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PÉDOLOGIQUE DES POLDERS DU LAC TCHAD. DYNAMIQUE DES SOLS EN MILIEU CONTINENTAL SUBARIDE DANS DES SÉDIMENTS ARGILEUX ET ORGANIQUES. THÈSE, UNIV. STRASBOURG ET ORSTOM, 275 P.
- COINTEPAS J P / MAKILO R • 1982 • BILAN DE L'ÉVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURES INTENSIVES DANS UNE STATION EXPÉRIMENTALE EN MILIEU TROPICAL HUMIDE (CENTRAFRIQUE). ORSTOM, CAHIERS, SÉR. PÉDOL., XIX, 3 : 271-282.
- COLLINET J / VALENTIN C • 1979 • ANALYSE DE DIFFÉRENTS FACTEURS INTERVENANT SUR L'HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE. NOUVELLES PERSPECTIVES : APPLICATIONS AGRONOMIQUES. ORSTOM, CAHIERS, SÉRIE PÉDOLOGIE, XVII, 4 : 283-328.
- DABIN B / MAIGNIEN R • 1979 • LES PRINCIPAUX SOLS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST ET LEURS POTENTIALITÉS AGRICOLES. CAH. ORSTOM SÉRIE PÉDOLOGIE, 4, 235-257.
- DROUBY A • 1976 • GÉOCHIMIE DES SOLS ET DES SOLUTIONS CONCENTRÉES PAR ÉVAPORATION. MODÈLE THERMODYNAMIQUE DE SIMULATION. APPLICATION AUX SOLS SALÉS DU TCHAD. MÉMOIRES STRASBOURG, 177 p.
- DOSSO M • 1980 • GÉOCHIMIE DES SOLS SALÉS ET DES EAUX D'IRRIGATION. AMÉNAGEMENT DE LA BASSE VALLÉE DE L'EUPHRATE (SYRIE). TOULOUSE, 181 P.
- ESCHENBRENNER V • 1977 • INVENTAIRE DES ÉTUDES PÉDOLOGIQUES EFFECTUÉES DANS LE BASSIN DU FLEUVE NIGER. ORSTOM-COOPÉRATION, 159 P.
- ESCHENBRENNER V / BADARELLO • 1978 • CARTE DES PAYSAGES MORPHOPÉDOLOGIQUES. RÉGION D'ODIENNÉ (CÔTE D'IVOIRE) NOTICE ORSTOM, 74, 123 P.
- ECEREX • 1983 • ANALYSE DE L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER TROPICAL HUMIDE ET SES MODIFICATIONS APPORTÉES PAR L'HOMME. COLLOQUE CAYENNE, 417 P.
- FAUCK R • 1971 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES SOLS DES RÉGIONS TROPICALES. LES SOLS ROUGES SUR SABLES ET SUR GRÈS D'AFRIQUE OCCIDENTALE. ORSTOM, MÉMOIRES, N° 61, PARIS 1972, 257 P.
- FAURE A • 1985 • LES SOLS DE LA KARA (NORD-EST TOGO). RELATIONS AVEC L'ENVIRONNEMENT. ORSTOM. TRAVAUX ET DOCUMENTS 183, 276 P. AVEC CARTES.
- FRITSCH E • 1984 • LES TRANSFORMATIONS D'UNE COUVERTURE FERRALLITIQUE EN GUYANE FRANÇAISE. THÈSE ORSTOM, 188 P.
- FRITZ B • 1975 • ÉTUDE THERMODYNAMIQUE ET SIMULATION DES RÉACTIONS ENTRE MINÉRAUX ET SOLUTIONS. APPLICATION A LA GÉOCHIMIE DES ALTÉRATIONS ET DES EAUX CONTINENTALES. MÉMOIRES STRASBOURG, 41, 152 P.

- GAC J Y • 1980 • GÉOCHIMIE DU BASSIN DU LAC TCHAD. TRAVAUX ORSTOM, 123, 251 P.
- GAVAUD M • 1977 • LES GRANDS TRAITS DE LA PÉDOGENÈSE AU NIGER MÉRIDIONAL. ORSTOM. TRAVAUX ET DOC. N° 76, 102 P.
- GAVAUD M • 1978 • PROJET DE CORRÉLATION PÉDOLOGIQUE DU BASSIN DU LAC TCHAD. CONTRAT ORSTOM /UNESCO NS / 0725 / 68, PARIS. NOTICE 117 P., ORSTOM, PARIS (CARTES AU 1 / 5 000 000 et 1 000 000).
- GAVAUD M • 1985 • NOTES SUR LES TRAVAUX RÉALISÉS PAR L'ORSTOM SUR LES SOLS AFRICAINS. I RAPPORT 15 P.
- GUILLOBEZ S • 1985 • RÉFLEXIONS SUR LA CONDUITE DE LA RIZICULTURE AQUATIQUE EN FONCTION DU BILAN DES IONS MAJEURS SUR SOLS TROPICAUX A FORT DÉSÉQUILIBRE IONIQUE. COMPTE ACAD. AGRICULTURE. FRANCE, 71, P. 157-163.
- IRIS J M • 1983 • GÉOSTATISTIQUE LINÉAIRE. ANALYSE SPATIALE DE LA VARIABILITÉ DES PARAMÈTRES PÉDOLOGIQUES. CENTRE ORSTOM ABIDJAN, 13 P.
- KILIAN J • 1974 • ÉTUDE DES MILIEUX PHYSIQUES EN VUE DE SON AMÉNAGEMENT. CONCEPTION DE TRAVAIL, MÉTHODES CARTOGRAPHIQUES, AGRON. TROPICALE N° 2 ET 3.
- LAMOUROUX M • 1972 • PÉDOGENÈSE FERRALLITIQUE AU LIBAN. MÉMOIRE ORSTOM 56, 266 P.
- LEPRUN J C • 1979 • LES CUIRASSES FERRUGINEUSES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE SÈCHE. MÉMOIRE SC. GÉOL., 58, 244 P.
- LEVEQUE A • 1975 • PÉDOGENÈSE SUR LE SOCLE GRANITOGNEISSIQUE DU TOGO. TRAVAUX ET DOC. ORSTOM, N° 108, 224 P. (1979).
- LOYER J Y / BOVIN P / LE BRUSQ J Y / ZANTE P • 1986 • LES SOLS DU DOMAINE FLUVIOMARIN DE CASAMANCE. SYMPOSIUM SOLS SULFATÉS ACIDES. DAKAR, 11 P.
- MAGLIONE G • 1976 • GÉOCHIMIE DES ÉVAPORITES EN MILIEU CONTINENTAL CONFINÉ. TRAVAUX ORSTOM, 60, 330 P.
- MARIUS C • 1985 • MANGROVES DU SÉNÉGAL ET DE LA GAMBIE. TRAVAUX ORSTOM 193, 376 P.
- MELFI A J / PEDRO G • 1978 • GÉOCHIMIE DES COUVERTURES PÉDOLOGIQUES DU BRÉSIL. 1 PLAQUETTE USP-INRA, 96 P.
- MOREAU R • 1983 • ÉVOLUTION DES SOLS SOUS DIFFÉRENTS MODES DE MISE EN CULTURE EN CÔTE D'IVOIRE FORESTIÈRE ET PRÉ-FORESTIÈRE. ORSTOM, CAHIERS, SÉR. PÉDOL., XX, 4 : 311-326.
- MOREL R / QUANTIN P • 1964 • LES JACHÈRES ET LA RÉGÉNÉRATION DES SOLS EN CLIMAT SOUDANO-GUINÉEN D'AFRIQUE CENTRALE. AGRON. TROP., XIX, 2 : 105-136.
- RAUNET M • 1982 • LES BAS-FONDS EN AFRIQUE ET A MADAGASCAR. MÉMOIRE IRAT, 70 P.
- RIEU M • 1983 • SIMULATION NUMÉRIQUE DES FLUX HYDRIQUES ET PRÉDICTION DE LA SALINITE DES SOLS. ORSTOM, 161 P.
- ROOSE E • 1981 • DYNAMIQUE ACTUELLE DES SOLS FERRALLITIQUES ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE. TRAVAUX ORSTOM, N° 130, 569 P.
- RUELLAN A • 1971 • LES SOLS A PROFIL CALCAIRE DIFFÉRENCIÉ DES PLAINES DE LA BASSE MOULOUYA. MÉMOIRES ORSTOM 54, 302 P.
- RUELLAN A / TESSIER D • 1985 • VERTISOLS. QUELQUES RECHERCHES PÉDOLOGIQUES A DÉVELOPPER. WORKSHOP ON "MANAGEMENT OF VERTISOLS". IBSRAM-HYDERABAD.
- TESSIER D • 1984 • ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ORGANISATION DES MATÉRIAUX ARGILEUX. THÈSE PARIS. INRA DPT. SCIENCE DU SOL, 361 P.
- TRICART J / KILIAN J • 1979 • L'ÉCOGÉOGRAPHIE ET L'AMÉNAGEMENT DU MILIEU NATUREL F. MASPERO. COLLECT. HERODOTE, 320 P. PARIS.
- TURENNE J F • 1977 • MODES D'HUMIDIFICATION ET DIFFÉRENCIATION PODZOLIQUE DANS DEUX TOPOSÉQUENCES GUYANAISES. MÉMOIRES ORSTOM, 84, 173 P.
- VALENTIN C • 1985 • ORGANISATIONS PELLICULAIRES SUPERFICIELLES DES SOLS DES RÉGIONS SUBDÉSERTIQUES. ÉTUDES ET THÈSES ORSTOM, 259 P.
- VIELLEFON J • 1977 • LES SOLS DES MANGROVES ET DES TANNES DE BASSE CASAMANCE (SÉNÉGAL). IMPORTANCE DU COMPORTEMENT GÉOCHIMIQUE DU SOUFRE DANS LEUR PÉDOGENÈSE. ORSTOM, MÉMOIRES, N° 83, 291 P.
- VIZIER J F • 1982 • ÉTUDES DES PHÉNOMÈNES D'HYDROMORPHIE DANS LES SOLS DE RÉGIONS TROPICALES A SAISON SÈCHE CONTRASTÉE. DYNAMIQUE DU FER ET DIFFÉRENCIATION DES PROFILS. ORSTOM, TRAVAUX ET DOCUMENTS, N° 165, 294 P.
- WILLAIME P / BARBERY Y / MIZOURI M • 1984 • CARTE DES RESSOURCES EN SOL DE LA TUNISIE AU 1 / 200 000 ; NOUVELLE APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE. DRES, TUNIS, 87 P.

ANNEXES

ET

DOCUMENTS PRÉSENTÉS

P. 38 □ 0 • LES GRANDES TENDANCES DES SOLS MONDIAUX □ P. 41 □ I • PRÉSENTATION DES MILIEUX NATURELS DU BURKINA FASO □ P. 41 □ II • SYNTHÈSE CARTOGRAPHIQUE DE LA RÉPUBLIQUE CENTRE AFRICAINE □ P. 41 □ III • CARTE DES SOLS ET DES RESSOURCES EN TERRES DU NORD CAMEROUN □ P. 43 □ IV • MILIEU NATUREL ET POSSIBILITÉS DE MISE EN VALEUR AGRICOLE DU MOYEN OUEST DE MADAGASCAR □ P. 43 □ V • POSSIBILITÉS DE CULTURE DU PALMIER À HUILE ET DU COCOTIER EN AMÉRIQUE DU SUD ET EN AFRIQUE DE L'OUEST □ P. 45 □ VI • CARTE DES POSSIBILITÉS AGRICOLES, FORESTIÈRES ET PASTORALES DU SÉNÉGAL ORIENTAL □ P. 45 □ VII • CARTOGRAPHIE DES TERRES CULTIVABLES ET DE LEURS APTITUDES CULTURALES (MAYOTTE) □ P. 49 □ VIII • ÉTUDE DE LA TRANSFORMATION DES SOLS EN CASAMANCE ET DES SYSTÈMES PÉDOLOGIQUES SOLS ROUGE-SOLS BEIGE □ P. 51 □ IX • ANALYSE STRUCTURALE ET EXPÉRIMENTATION AGRONOMIQUE EN GUYANE □ P. 60 □ X • RUISSELLEMENT, DYNAMIQUE SUPERFICIELLE ET ÉROSION EN AFRIQUE DE L'OUEST □ P. 61 □ XI • NATURE ET IMPORTANCE DES ORGANISATIONS SUPERFICIELLES DANS LES COUVERTURES PÉDOLOGIQUES DU SAHEL ET DES CONFINS SAHARIENS □ P. 62 □ XII • CARTE D'APTITUDE DES SOLS À L'IRRIGATION POUR L'OPTIMISATION DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS AU NIGER P. 62 □ XIII • LES BAS-FONDS EN AFRIQUE ET À MADAGASCAR P. 65 □ XIV • ÉVALUATION DES COMPOSANTES DU MILIEU NATUREL PAR TÉLÉDÉTECTION SPATIALE (THAÏLANDE) ET DE LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION (NORD SÉNÉGAL)

ANNEXE O

Les grandes tendances des sols mondiaux GEORGES PEDRO (1985)

Au niveau de la planète, l'inventaire des sols, commencé depuis le début du siècle, a donné lieu depuis la dernière guerre, à de multiples études qui ont débouché avec la réalisation, sous l'égide de la FAO-UNESCO, d'une carte pédologique à l'échelle de 1 / 5 000 000. Ce document n'est ni exhaustif, ni d'égale valeur ; il permet toutefois de connaître la nature des grands types de sols (ou mieux des principales couvertures pédologiques) et d'en préciser leur distribution. Une esquisse au 1 / 10 000 000 qui tient compte de l'expérience de l'École Pédologique Française et en particulier de celle de l'ORSTOM, a été réalisée spécialement en 1984 à l'occasion du Cinquantenaire de l'Association Française pour l'Étude du Sol par V. Eschenbrenner, B. Volkoff et G. Pedro (voir fig. 1 et 2). Cette carte a été exposée pendant six mois au Palais de la Découverte.

L'examen de cette carte permet immédiatement de faire un certain nombre de remarques :

- Il existe des régions de la planète, où la couverture pédologique est très peu développée et souvent discontinue ; c'est le cas des zones montagneuses où les pentes sont trop fortes et des déserts où le climat est trop sec (ou trop froid). Comme chacun de ces domaines couvre environ 25 % des terres émergées, cela représente au total 50 % du globe.

- Dans toutes les autres régions, les couvertures pédologique sont continues avec des sols bien développés : elles sont en outre variées, mais le nombre de grands types de sols est cependant limité (une douzaine environ) ; quant à leur répartition à la surface du globe, elle est avant tout d'ordre latitudinal, ce qui signifie que le facteur essentiel de l'évolution est essentiellement de type bioclimatique.

- Ainsi dans les hautes latitudes, on rencontre les sols podzolisés.

— Les latitudes moyennes (correspondant grosso modo à une zone délimitée par les isothermes annuelles de 5 à 15 °C) sont le domaine des sols bruns, lessivés et isohumiques continentaux.

— De part et d'autre des déserts tropicaux, se développent des sols fersiallitiques, des sols subdésertiques ou aridisols et des sols salés.

— Enfin dans la zone intertropicale règnent les sols ferrallitiques, les sols lessivés tropicaux et subtropicaux ; mais d'autres sols, tels les rabisols et les planosols sont susceptibles de s'y développer largement.

Ainsi, à l'échelle mondiale, la distribution des sols est avant tout zonale, comme cela est illustré par la figure 4 où est reproduite une coupe allant du Pôle Nord à l'Équateur.

Mais, le facteur bioclimatique n'est pas le seul paramètre à prendre en compte, car l'âge des couvertures pédologiques n'est pas le même partout en raison des divers événements qui ont marqué l'histoire de la planète. Ainsi, les zones péripolaires et des moyennes latitudes sont relativement jeunes, à la suite de l'action des glaciations quaternaires qui ont soit rabisé les sols qui existaient auparavant, soit déposé un certain nombre de formations superficielles caractéristiques (tels les loess par exemple).

En revanche, dans les régions intertropicales, l'action

pédologique se poursuit depuis bien longtemps, au moins des centaines de milliers d'années, en sorte que les sols sont toujours évolués, profonds et très appauvris.

NATURE DES SOLS ET STRATÉGIE D'INTERVENTION

Quel est alors l'intérêt d'un tel inventaire, notamment sur le plan des caractéristiques et des grandes tendances intéressant la mise en valeur et le développement agricole ?

L'élément majeur à prendre en compte est constitué par la nature des minéraux caractéristiques du complexe d'altération (*argiles et oxydes*).

Deux voies sont à considérer suivant la nature de la pédogenèse :

- soit il se forme essentiellement des argiles 2/1 à feuillet chargé, donc à charge négative déterminée (illites, vermiculites, montmorillonites) qui possèdent une capacité d'échange permanente et sont susceptibles de retenir les cations alcalins et alcalino-terreux. C'est le cas des sols des régions arides et tropicales sèches, avec maintien de la saturation cationique au cours de l'évolution ; et aussi des sols tempérés, avec une tendance inéluctable à la désaturation, à l'acidification et à l'aluminisation concomitante ;

- soit il s'individualise surtout des argiles 1/1 (kaolinite) à feuillet neutre associées à des oxydes et hydroxydes métalliques (fer-Al) et on a affaire alors à des sols ayant une charge variable en fonction du pH : dans ce cas leur capacité d'échange est très faible (d'où l'absence de rétention de cations) et en outre leur charge peut même prendre une valeur positive lorsque le milieu devient légèrement acide ; d'où la possibilité de rétention, non des cations mais des anions. C'est ce qui se produit dans les sols des régions tropicales humides, qui représentent environ 30 % de la surface du globe.

Or, cette distinction est extrêmement importante au plan des stratégies d'intervention, qui doivent en effet reposer :

- d'une part, sur la tendance géochimique générale : appauvrissement en cations alcalins et alcalino-terreux avec acidification (sols des zones boréales, tempérées et tropicales humides), ou bien enrichissement avec maintien de la saturation, voire alcalinisation (sols des régions arides) ;
- et d'autre part, sur la nature des minéraux du complexe d'altération (charge permanente négative ou charge variable).

Il n'existe donc pas un modèle unique d'intervention à l'échelle du globe, et seules les études pédologiques ont été à même d'aboutir à un résultat aussi capital. « Sortir de l'hexagonie » comme l'a proné dans son dernier livre André Fontaine du « Monde » s'avère encore plus nécessaire en pédologie et en agronomie que dans d'autres domaines.

RESSOURCES EN SOLS : IMPORTANCE ET RÉPARTITION

Bien que les facteurs bioclimatiques soient prépondérants à l'échelle de la différenciation des sols de la planète, la répartition des couvertures pédologiques n'est ni strictement zonale, ni même symétrique par rapport à l'Équateur. Cela provient tout d'abord de l'inégale distribution des continents. Ainsi, ni les sols podzolisés boreaux, ni les sols lessivés des latitudes moyennes (entre 5° et

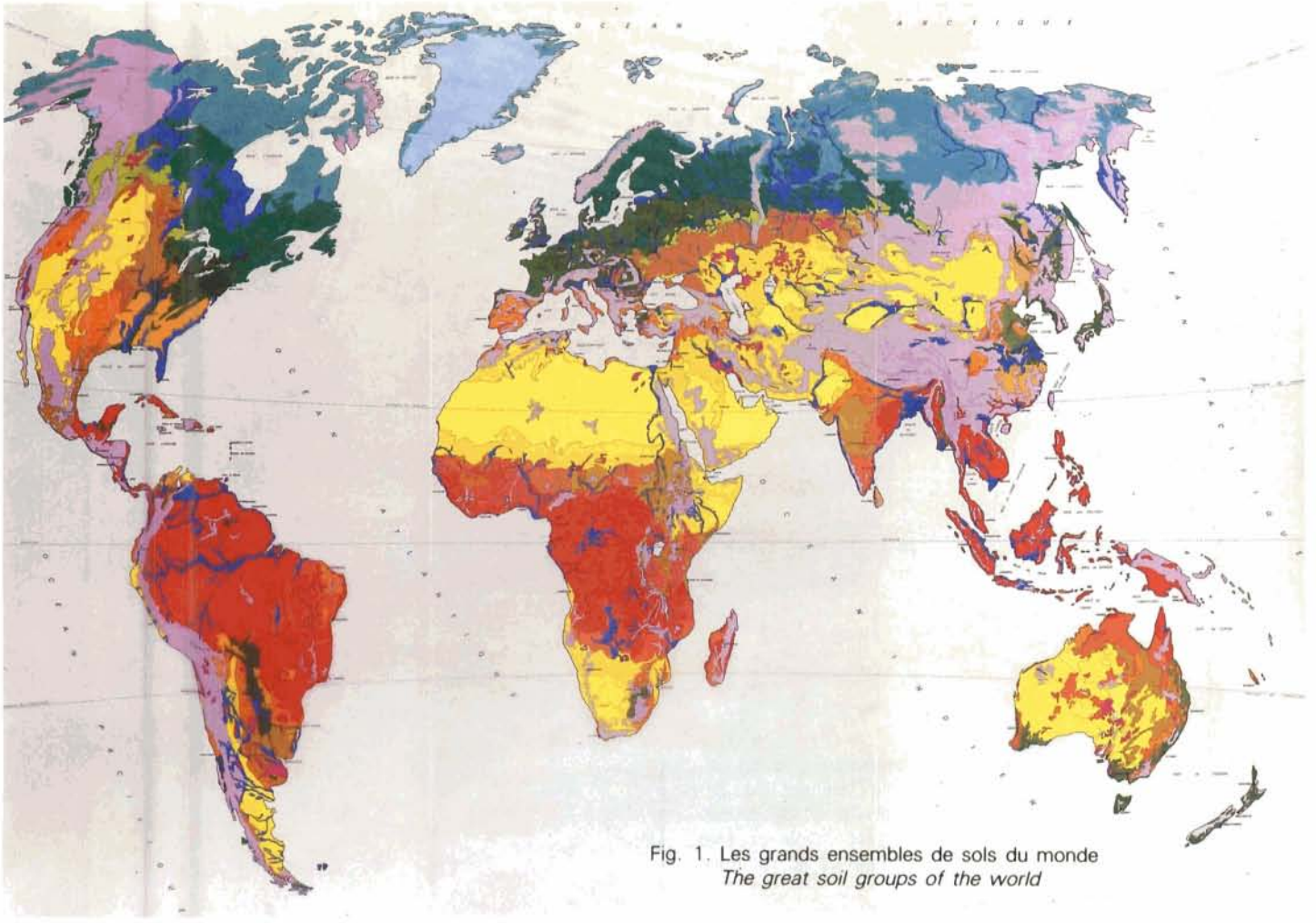


Fig. 1. Les grands ensembles de sols du monde
The great soil groups of the world

LEGENDE

DOMAINES A COUVERTURE PEDOLOGIQUE CONTINUE - SOLS DEVELOPPES

- Podzols et sols podzoliques
- Sols lessivés et brun-lessivés
- Sols gris forestiers
- Tchernozems et sols isohumiques
- Sols subdésertiques (andisols)
- Sols salés
- Sols rouges et bruns lessivalliques
- Vertisols
- Sols lessivés subtropicaux (ultisols)
- Sols ferrugineux tropicaux (héritages ferrallitiques)
- Sols ferrallitiques
- Planosols
- Sols alluviaux, sols hydromorphes

DOMAINES A COUVERTURE PEDOLOGIQUE DISCONTINUE (affleurements rocheux) OU A SOLS PEU DEVELOPPES (climat trop sec ou trop froid, pentes trop fortes)

- Déserts: sols minéraux bruts, sols peu évolués (associés à des sols variés résultant d'héritages paléoclimatiques)
- Zones où le gel est permanent en profondeur: cryosols, sols à gley tourbeux, podzols hydromorphes
- Zones montagneuses: sols minéraux bruts, rankers, associés à des sols très variés (sols podzoliques, andosols...)

DOMAINES OÙ LES SOLS SONT ABSENTS

- Glaciers
- Lacs, mers, océans

RESSOURCES MONDIALES EN SOLS

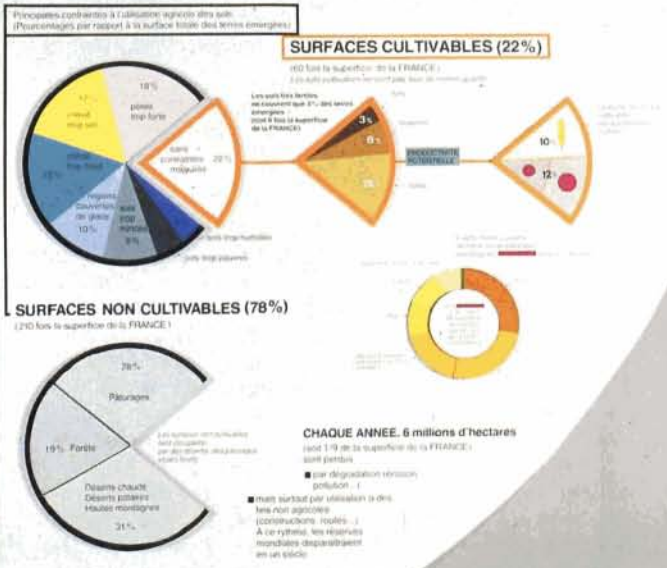


Fig. 2. Ressources mondiales en sols
The soil resources of the world

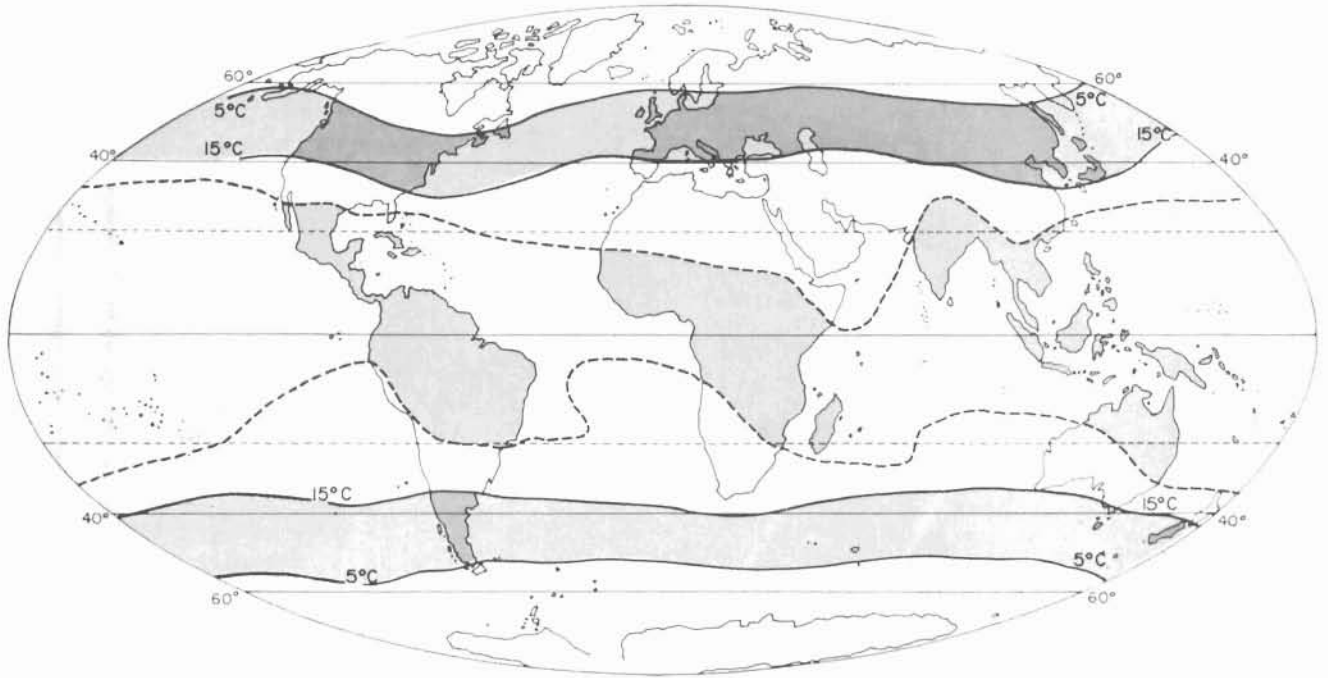


Fig. 3

15 °C) ne sont représentés dans l'hémisphère sud (en dehors du Sud du Chili et de la Nouvelle Zélande) (fig. 3). Mais cela résulte aussi de l'inégale répartition des zones montagneuses, celles-ci étant bien représentées en Asie par exemple, mais inexistantes en Afrique et en Australie (fig. 1).

Sur le plan des potentialités agronomiques, les ressources des différentes nations du monde sont de ce fait très variables :

- les régions boréales sont défavorisées à cause de leurs sols (sols podzolisés) et de leur climat ;
- les régions de moyenne latitude sont les plus favorisées à la fois par l'aptitude de leurs sols (sols bruns-lessivés) et par leur climat tempéré ;
- les régions semi-arides non salines ont des sols bien pourvus, mais peu profonds. Elles sont en outre défavorisées du fait de la sécheresse climatique, qui peut toutefois être contrecarrée par l'intermédiaire d'irrigations contrôlées ;
- enfin, les régions tropicales humides, très bien développées en Afrique, Amérique Latine, Asie du Sud-Est et Océanie, sont caractérisées par des sols vieux, profonds, très appauvris chimiquement et souvent à charge variable. Il n'y a en revanche pas de limitation climatique, en sorte que les potentialités agronomiques restent grandes, pour peu qu'on arrive à promouvoir une politique adaptée en matière d'amendements et d'éléments fertilisants.

Au total, si l'on établit le bilan de l'ensemble des facteurs physiques à partir de statistiques de la FAO, on constate que 22 % seulement des sols des terres émergées sont cultivables (fig. 2) ; à première vue cela fait peu, mais comme 10,6 % sont actuellement cultivés, les sols potentiellement cultivables, qui forment ainsi les réserves de la Planète, représentent encore à ce jour 11,4 %, soit environ 1 700 millions d'hectares !

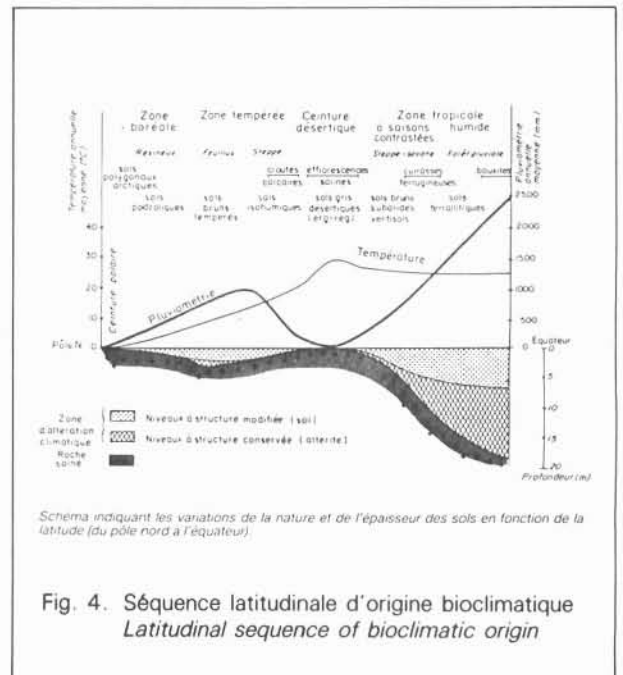


Fig. 4. Séquence latitudinale d'origine bioclimatique
Latitudinal sequence of bioclimatic origin

ANNEXE 1

Présentation des milieux naturels du Burkina Faso

CARTE 1 / 1 000 000. S. GUILLOBEZ (1985)

L'étude pédologique de la région conduit à l'élaboration d'un document *synthétique* sur les « milieux naturels ». Le découpage général est de type physiographique basé sur l'existence de reliefs résiduels, sur la nature du type d'altération (cuirassé, kaolinique ou montmorillonitique) caractérisant les diverses surfaces d'aplanissement et sur le développement de formations éoliennes. La compartimentation suivante découle de l'utilisation de critères morphopédogénétiques et conduit à l'individualisation de paysages circonscrits au sein desquels le contenu pédologique est précisé. La carte obtenue est d'ailleurs accompagnée de cartons pédologiques, phytoclimatique et des régions naturelles.

S. GUILLOBEZ • CARTE DES MILIEUX NATURELS DU BURKINA FASO. 1 / 1 000 000, 1985, CIRAD.

ANNEXE II

Synthèse cartographique de la République Centre Africaine

CARTES À 1 / 1 000 000, Y. BOULVERT (1984).

La réalisation de l'étude pédologique conduit à une véritable synthèse du milieu naturel.

C'est ce qui a été proposé par Y. Boulvert pour la République Centre Africaine à partir de 1983, territoire à peu près inconnu qui couvre 623 000 km², dont environ la moitié est constituée de cuirasses affleurantes ou sub-affleurantes. Mais ici, un *même* auteur a préparé des documents cartographiques *séparés* au 1 / 1 000 000 :

- carte pédologique ;
- carte orohydrographique ;
- carte phytogéographique ;
- carte géomorphologique.

Ces diverses cartes ont été présentées au Congrès International de Géographie en 1984. Si l'on se réfère au document pédologique qui est le seul imprimé à ce jour, on note immédiatement la qualité du détail et la précision du découpage, qui correspond en fait, ici aussi, à une délimitation morphopédologique. Quant à la désignation des unités cartographiques, elle est faite par référence à un orthotype de la classification française des sols ; mais comme elle traduit dans tous les cas l'existence de toposéquences répertoriées, il est certain qu'on pourrait procéder autrement ; et ce, sans pour autant modifier le découpage minutieux réalisé, qui traduit une bonne connaissance du milieu Centre Africain.

Y. BOULVERT • CARTE PÉDOLOGIQUE DE LA CENTRE AFRIQUE 1 / 1 000 000, 1984. ORSTOM.

ANNEXE III

Carte des sols et des ressources en terres du Nord Cameroun

1 / 500 000. P. BRABANT ET M. GAVAUD (1985).

L'étude pédologique intègre les données récentes de la pédologie africaine rénovée, telle qu'elle apparaît à travers la considération des systèmes pédologiques et des phénomènes de transformation ; en sorte que, dans ce cas, la carte pédologique en tant que telle est la *meilleure* expression du milieu naturel et de ses potentialités. C'est ce qui a été réalisé par exemple pour le Nord Cameroun par P. Brabant et M. Gavaud (1985) sur un territoire de 82 000 km² qui s'étend de la Falaise de l'Adamoua au Lac Tchad et dont les 2/3 correspondent à des glacis et pédiments d'altération. Partant de la notion de volume pédologique caractéristique (horizon), les auteurs montrent :

- d'abord que le nombre de ces volumes est tout à fait limité (24), même dans un milieu pédologique aussi diversifié ;
- ensuite que ces horizons s'associent toujours de manière ordonnée, ce qui conduit à l'individualisation d'un nombre réduit de couvertures pédologiques (12) : pour trois d'entre elles seulement, l'ordonnement est vertical, en sorte que leur expression peut se faire sous la forme de profils verticaux (pedons) ; pour les neuf autres en revanche, l'ordonnement est latéral et il faut alors recourir à une séquence pour représenter le plus fidèlement la réalité pédologique. Ces couvertures pédologiques sont répertoriées sous la dénomination de *catégories de sols* (Exemple joint : catégorie 7) ;
- en troisième lieu suivant l'importance de chaque volume (horizon) et son extension latérale, on peut caractériser les *faciès* différents d'un même type de couvertures pédologiques (*sous-catégories*) ;
- enfin, chaque faciès peut être à son tour divisé *verticalement* en unités qui sont appelées des *séries cartographiques*.

A partir de là, il est aisé de procéder à la délimitation des unités cartographiques, en fonction de l'échelle choisie, et aussi des autres éléments du milieu, en particulier la nature du matériau original. Ainsi pour le 1 / 500 000, c'est le faciès de couvertures pédologiques qui est retenu.

A ce document, sont adjoints en outre cinq cartons au 1 / 2 000 000 relatifs à la pluviométrie, à la géologie, aux formations végétales, aux principales formes du relief et à la distribution des sols telle qu'elle peut être définie à partir des unités FAO.

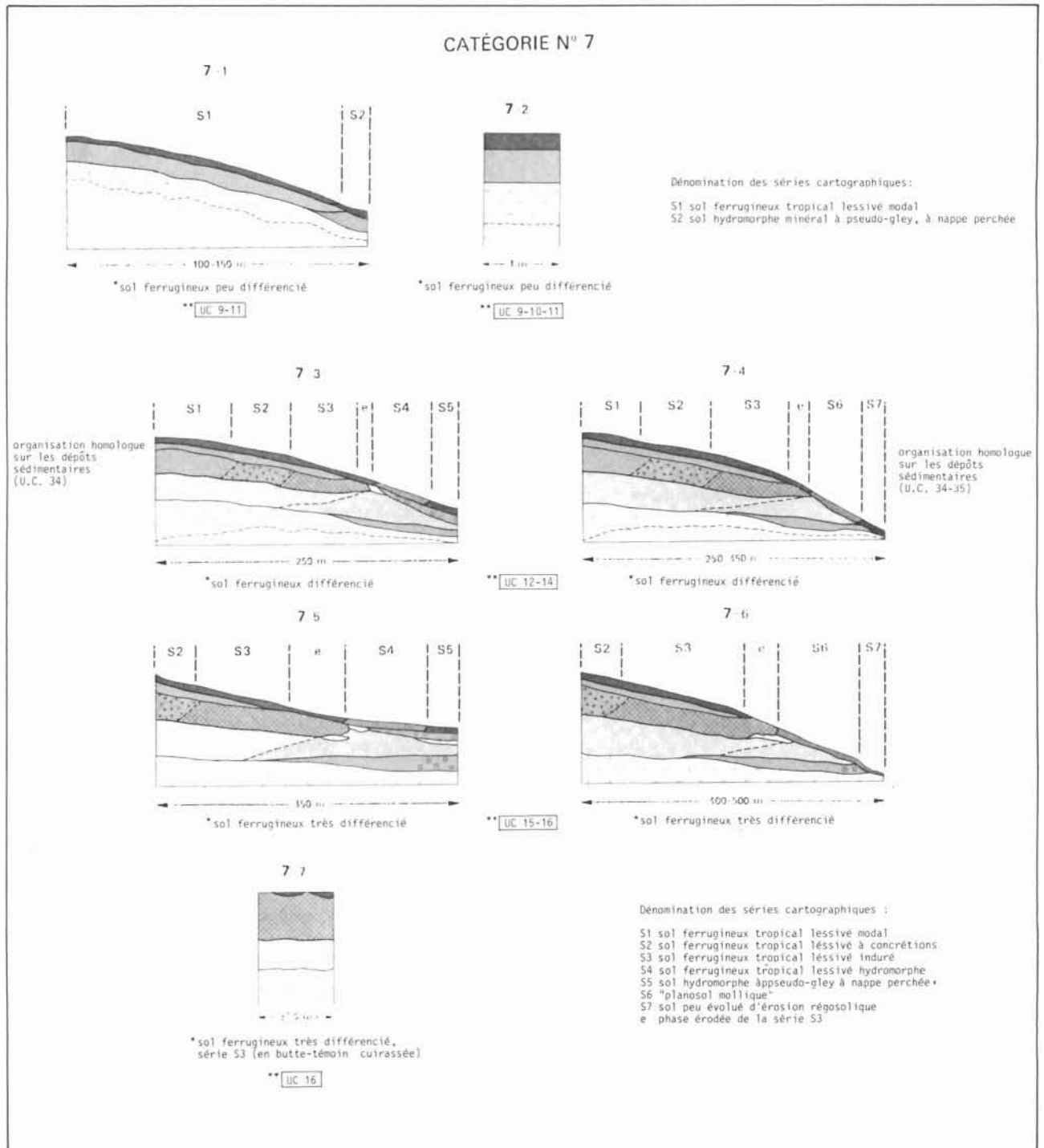
A côté de cela, l'importance des recherches réalisées dans ce cadre a permis de ne pas s'en tenir à une description du milieu naturel, aussi intéressante soit-elle, mais à proposer un certain nombre de documents dérivés à des fins d'application :

- ainsi, en s'appuyant avant tout sur les propriétés *physicohydriques* des sols, la dynamique de l'eau étant le principal facteur limitant de la mise en valeur de ces régions à climat fortement contrasté, il a été possible de dénombrer vingt-quatre classes de terres, qui ont servi à établir une carte des ressources en sols à la même échelle (1 / 500 000), accompagnée de 3 cartons au 1 / 2 000 000 consacrés aux zones agroclimatiques, à la dégradation des terres en relation avec leur degré d'occupation et enfin à la répartition des glossines, facteur im-

portant pour tout ce qui touche à l'élevage du bétail ;
 • d'un autre côté, il a été réalisé un livret portant sur l'étude des contraintes et aptitudes de chacune des terres et comprenant quarante-huit cartes au 1 / 750 000 où sont indiquées, outre leur localisation et leur extension, leur aptitude en culture villageoise et les possibilités de

passage à une agriculture impliquant une mécanisation légère et l'emploi d'irrigation.

P BRABANT ET M GAUVAUD • LES SOLS ET LES RESSOURCES EN TERRES DU NORD CAMEROUN. 1985. ORSTOM. COLLECTION NOTICE EXPLICATIVE N° 103.



ANNEXE IV

Madagascar : Carte des Unités de Milieu naturel du Moyen Ouest

POSSIBILITÉS DE MISE EN VALEUR AGRICOLE.
S. GUILLOBEZ, 1981.

Ce document cartographique de synthèse a été établi à l'échelle du 1 / 500 000 à la demande du Développement rural

La définition des unités est basée sur les grands éléments structuraux de la région (Reliefs résiduels, Surfaces d'aplanissement, Glacis quaternaires et Plaines alluviales) ; d'autres composantes sont aussi prises en compte comme le matériau, le modelé (évalué par la dissection du réseau hydrographique), la morphogenèse et la pédogenèse. Les unités ainsi délimitées de type morphopédologique, sont ensuite caractérisées du point de vue de leur valeur agricole et des propositions d'utilisation des milieux sont formulées ; c'est ainsi que pour cette région qui couvre une superficie approximative de 23 000 km², il a été fait une estimation pour chaque grande unité inventoriée des superficies utilisables dans diverses spéculations agricoles : élevage extensif, agriculture traditionnelle, cultures mécanisées intensives, riziculture, agriculture intensive...

S GUILLOBEZ • 1981. LE MOYEN OUEST DE LA PROVINCE D'ANTANARIVO. MILIEU PHYSIQUE, POSSIBILITÉS DE MISE EN VALEUR AGRICOLE. IRAT/SATEC, NOV. 1981.

Caractéristiques des principaux sols et fertilisation (n₀ = Année de plantation).

Characteristics of main soils and fertilization (n₀ = Planting year)

ANNEXE V

Possibilités de culture du Palmier à huile et du Cocotier

• *En Amérique Latine* (A. Lauzeral, 1980), la culture du palmier à huile est envisageable depuis le Sud du Mexique jusqu'au Nord du Paraguay. A l'intérieur de cette unité se situent de nombreux types de sols : les sols alluviaux des plaines en bordure de la Cordillère des Andes ou des plaines côtières, latosols (sols ferrallitiques désaturés) des plateaux d'Amazonie, andosols ou sols andiques récents (Equateur), Vertisols.

Après caractérisation de ces types de sols (tab.) (physique et chimique), divers aménagements ont été proposés pour les plantations (drainage, irrigation, techniques culturales, réseaux routiers).

Une relation étroite a été mise en évidence entre le déficit hydrique et la production qui a pu être schématisée sur un graphique pour les différents types de sols (voir fig. 1)

A LAUZERAL - 1980 • LES SOLS D'AMÉRIQUE LATINE ET LA CULTURE DU PALMIER A HUILE. MISE EN VALEUR, FERTILISATION ET POTENTIEL DE PRODUCTION. OLÉAGINEUX, VOL. 35, N° II, NOV. 85.

• *En Afrique de l'Ouest* (carte jointe fig. 2) : (Nguyen Hugo Van, J. Olivin, R. Ochs, 1984), les sols utilisés pour les projets de développement de la culture des oléagineux (palmier à huile et cocotier) en Afrique de l'Ouest, sont issus des formations parentales suivantes :

- les sables quaternaires qui longent le littoral et s'étendent du Sénégal au Nigeria ;
- les sédiments tertiaires de Guinée Bissau, de Sierra Leone, de Côte d'Ivoire, du Ghana, du Bénin et du Nigeria ;
- les altérites de roches cristallines et éruptives du socle birrimien et, à un moindre degré,
- les alluvions fluviales hydromorphes drainables.

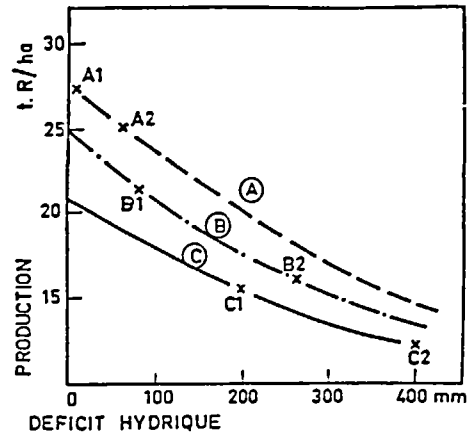
A. LAUZERAL - 1980 -

Type de sols Localisation de l'exemple	Déficit hydrique Production	Principales caractéristiques des sols	N Urée 45 p. 100 N	P Supertriple 45 p. 100 P ₂ O ₅	K Chlorure 60 p. 100 K ₂ O	Mg (Kléserite) 33 p. 100 MgO	B Borax
Vertisols Plantation du Val d'Iguape (Brésil)	DH = 200 mm 16/18 tR/ha	Sols riches en argiles à mont- morillonite. Problèmes de déficience azo- tée par asphyx- ie	Apport pro- gressif de 250 g en n ₀ jus- qu'à 1 500 g en n ₁	Pas d'apport	Apport pro- gressif les pre- mières années de production de 500 g en n ₀ , jusqu'à 1 200 g en n ₁	Pas d'apport	Pas d'apport
Sols alluviaux récents Plantation de San Alberto (Colombie)	DH = 100 mm 25 tR/ha	Sols riches avec complexe ab- sorbant désé- quilibré à for- te pression cal- cique. Défi- cience en chlo- re	Apport les pre- mières années de plantation 125 g en n ₀ , 250 g en n ₁	Du phosphore est apporté sous forme de scories : 750 g à partir de n ₀	Apport pro- gressif de 250 g en n ₀ , jusqu'à 1 250 g à par- tir de n ₁	Apport pro- gressif jusqu'à 650 g à partir de n ₀	Le sol en n ₁ , 75 g à partir de n ₀
Sols volcaniques Plantation de Quindé (Equateur)	DH = 100 mm 22 tR/ha	Sols riches rela- tivement bien pourvus en tous éléments. Quelques symptômes vi- suels de caren- ce azotée et magnésienne	Apport pro- gressif de 400 g en n ₀ , jusqu'à 1 500 g en n ₁	Pas d'apport	Pas d'apport	250 g en n ₀ , jus- qu'à 750 g à 1 kg à partir de n ₁	Apport pro- gressif de 45 g en n ₀ , à 75 g à partir de n ₁
Latosols Plantation de Belem (Brésil)	DH = 0 21 tR/ha	Sols pauvres extrêmement carences en P	De 250 g en n ₀ , jusqu'à 500 g en n ₁	Apport pro- gressif de 500 g en n ₀ , jusqu'à 1 500 g à par- tir de n ₀ , ou 1,5 t/ha de trical- cique tous les 3 ou 4 ans	Apport pro- gressif de 100 g en n ₀ , jusqu'à 1 500 g à par- tir de n ₁	Apport pro- gressif de 100 g en n ₀ , jusqu'à 750 g en n ₁	De 50 g en n ₀ , à 75 g à partir de n ₁

A cause de leur texture pratiquement dépourvue d'argile, les sables quaternaires ne sont retenus que pour le cocotier. Les sols développés sur les alluvions fluviales sont souvent hydromorphes et conviennent mieux au palmier qu'au cocotier. Par contre, les autres formations sont favorables aux deux cultures. Les sols dérivés des sables quaternaires et des sédiments tertiaires ont, sur de larges surfaces, des propriétés physiques assez homogènes.

La localisation des terrains plantables ne demande qu'une étude pédologique générale avec des observations peu denses. Ces deux formations se différencient par le paysage, les types de végétation et de sols. Les sols formés à partir des altérites du socle ancien sont, par contre, très hétérogènes. Des sols très gravillonnaires, ou hydromorphes en permanence, ne convenant ni au palmier ni au cocotier, peuvent s'intercaler avec des sols favorables. La délimitation des terrains ayant un fort pourcentage de bons sols requiert par conséquent un *réseau dense d'observations pédologiques*, afin de pouvoir localiser les zones inaptées : affleurements rocheux, pentes fortes, marécages et sols impropres. Les alluvions fluviales sont assez homogènes dans l'ensemble. Elles sont souvent hydromorphes et inondables pendant la saison des pluies. L'étude de leur mise en valeur doit être suffisamment détaillée pour pouvoir cartographier les cours d'eau de toutes dimensions, afin d'établir ensuite le réseau de drainage. Pour tous les sols cités, il a été donné une brève description du profil pédologique, les principales caractéristiques physico-chimiques, leur place dans les grandes classifications pédologiques, leur potentiel vis-à-vis de la culture du palmier à huile et du cocotier, et les principaux impératifs techniques de mise en valeur.

NGUYEN HUGO VAN, J OLIVIN, R OCHS - 1984 • SOLS A PALMIERS A HUILE ET A COCOTIERS EN AFRIQUE DE L'OUEST. OLÉAGINEUX, VOL. 39, N° 2, MARS 84 ET VOL. 39, N° 4, AVRIL 84.

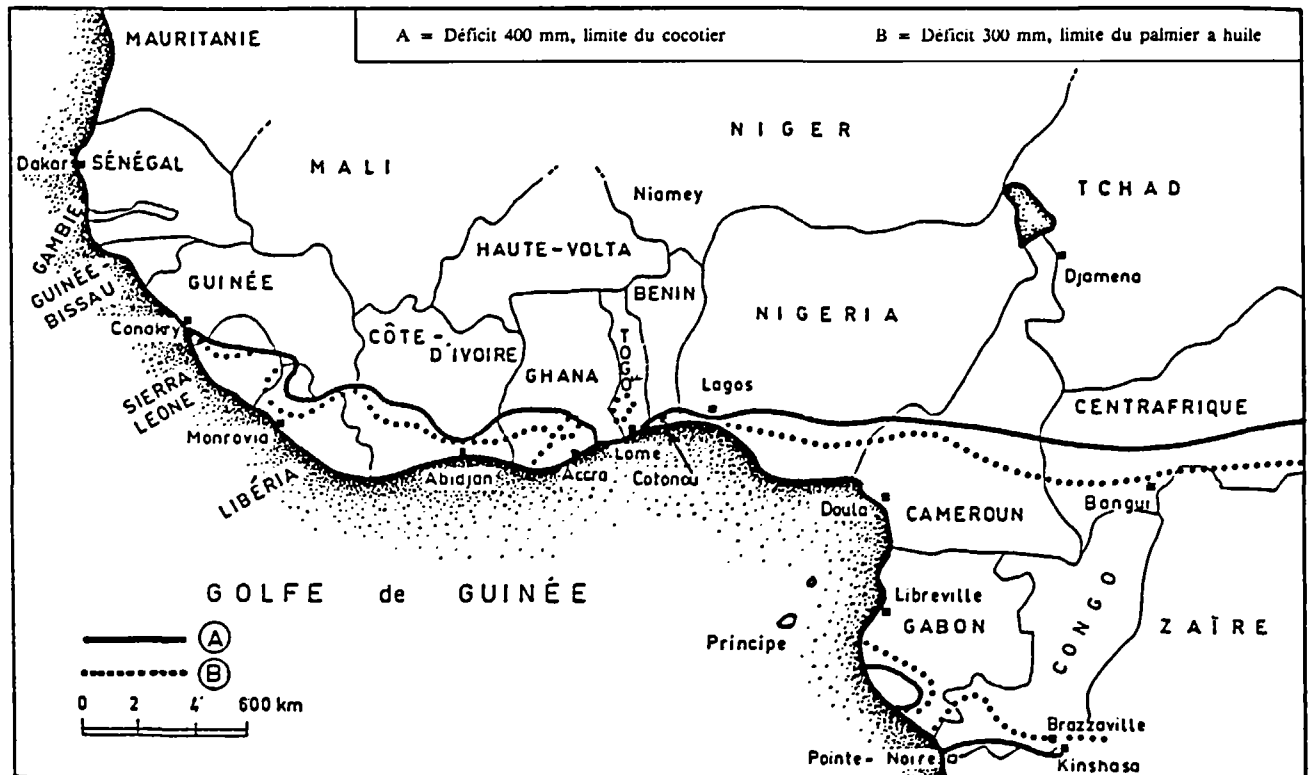


Pour un déficit hydrique donné, la production peut également varier autour d'un point central en fonction de la température et des facteurs de l'insolation

- A : sols exceptionnels
A1 = cendres volcaniques-Equateur
A2 = sols alluviaux-Colombie
- B : sols moyens
B1 = alluvions anciennes-Pérou
B2 = sols argileux-Panama
- C : sols médiocres
C1 = Vertisols-Brazil
C2 = sols sableux-Mexique

Fig. 1. Relation déficit hydrique-production pour 3 principaux types de sols
Relationship between water deficit-production for three main soil types

Fig. 2. Courbes d'isodéficit délimitant les zones de culture du palmier à huile et du cocotier
Isodeficit curves delimiting areas of cultivation of oil palms and coconut palms



ANNEXE VI

Carte des possibilités agricoles forestières et pastorales du Sénégal oriental

CARTE À 1 / 500 000, R. BERTRAND-J. VALENZA, (1979)

Cette cartographie de synthèse, établie à la demande du Développement rural, avait pour but de faire un inventaire des différents types de milieu de cette vaste région (60 000 km²) et d'en déduire les possibilités de mise en valeur.

La délimitation des grandes unités résulte d'un découpage physiographique basé sur la nature et l'âge du matériau et sur les grands types de modelé. Les types de sols ont été définis à l'intérieur de chacune de ces grandes unités (lithosols, sols ferrugineux, sols brunifiés et vertiques).

Il fut établi sur cette carte une évaluation des potentialités des Terres aussi bien pour l'agriculture que pour la forêt ou le pastoralisme. Ce type de carte, réalisé pour les planificateurs, a mis en évidence que sur l'ensemble de cette région :

- 2 100 000 ha (soit 35 %) ont une bonne fertilité parmi lesquels 430 000 sont occupés par la forêt ou par le Parc naturel de Niokolo Koba ;
- moins de 50 % de ces terres sont cultivées, ce qui laisse d'importantes possibilités de développement.

R BERTRAND ET J VALENZA - 1979 • ÉVALUATION DES POSSIBILITÉS AGRICOLES, PASTORALES ET FORESTIÈRES DES MILIEUX NATURELS DU SÉNÉGAL ORIENTAL. CARTE IRAT-IEMVT 1 / 500 000.

ANNEXE VII

Archipel des Comores

MAYOTTE. CARTOGRAPHIE DES TERRES CULTIVABLES ET DE LEURS APTITUDES CULTURALES (ÉCHELLE 1 / 50 000, E. LATRILLE, 1981).

Cette cartographie a été réalisée à la demande des autorités comoréennes qui l'ont inscrit au VI^e plan quinquennal français (1971-1975). Elle répondait à un souci de faire le point des potentialités agricoles de l'île face au doublement prévisible de la population d'ici la fin du siècle et de disposer de données actualisées pour établir un plan de développement agricole.

Une carte morphopédologique a été réalisée formulant des propositions pour l'affectation des terres de chaque unité délimitée, après en avoir défini les contraintes (édaphiques, morphodynamiques, hydriques). L'île de Mayotte (374 km²) est d'origine essentiellement volcanique édifiée en plusieurs phases distinctes :

- une première phase volcanique dite ancienne (Miocène) met en place des édifices en basalte hawaïen ;
- une seconde phase " moyenne " (Pliocène) plus ponctuelle est marquée par des édifices d'explosion.

Ces deux phases sont marquées par une *ferrallitisation* intense et un modèle de dissection vif. Au quaternaire une troisième phase d'activité (« récente ») met en place des formes stromboliennes et hawaïennes sur lesquelles s'est développée une pédogenèse andique.

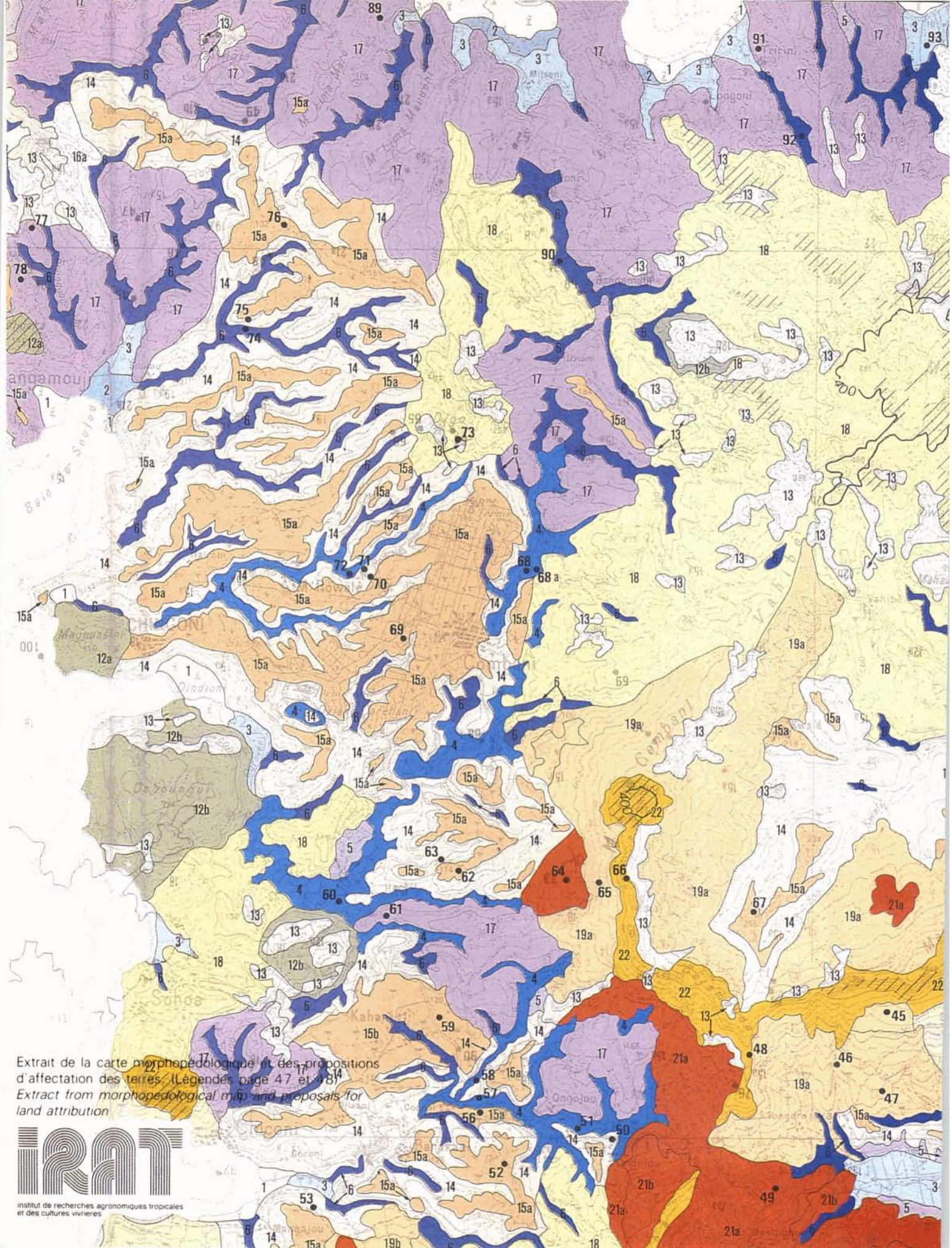
Les sols ferrallitiques ont été soumis à une morphogénèse intense (coulées boueuses, décapages, mouvements de masse...). Les zones d'altérations, lorsqu'elles sont mise à jour (altérites), sont alors le siège d'une brunification quasi généralisée.

L'étude morphopédologique a mis en évidence la rareté des modelés peu pentus, l'abondance des altérites ferrallitiques au modelé de dissection très prononcé (les 3/4 de l'île environ) ; la relative stabilité du milieu physique, une fertilité actuelle satisfaisante et une aptitude certaine de l'île aux cultures.

Les classes d'affectation des terres, tenant compte des données morphopédologiques et des contraintes sont au nombre de 5 : (I) polyvalentes, (II) limitées à des cultures arbustives et arborées, (III) pastorales, (IV) essentiellement forestières, (V) à laisser sous végétation permanente ; seule la classe I convient aux cultures vivrières.

L'île de Mayotte possède un potentiel agricole certain : 34 000 sur 38 600 ha de l'île ; mais celle-ci, du fait du modelé, est orientée plutôt vers les cultures arbustives et arborées (cocotier, poivrier, caféier, cacaoyer, plantes à parfum). L'orientation vivrière de l'île est moins affirmée : 5 500 ha seulement. En raison du modelé, il s'agit de promouvoir une véritable « agriculture de pente » susceptible a priori d'assurer l'autosuffisance alimentaire sous réserve d'une mise en place des aménagements indispensables de protection contre l'érosion.

E LATRILLE - 1981 • MAYOTTE : INVENTAIRE DES TERRES CULTIVABLES ET DE LEURS APTITUDES CULTURALES. DOC. IRAT. RAPPORT ET ANNEXE.



Extrait de la carte morphopédologique et des propositions d'affectation des terres. (Légendes page 47 et 48)
 Extract from morphopedological map and proposals for land attribution

ANNEXE VIII

Étude de la transformation des sols en Casamance et des systèmes pédologiques, sols rouges → sols beiges

A. CHAUVEL, 1976.

En moyenne Casamance, l'examen détaillé de toposéquences en conditions naturelles a permis de montrer que les sols beiges provenaient de la transformation des sols rouges consécutive à une évolution pédoclimatique et que cette transformation se propageait latéralement de manière centrifuge depuis le centre des plateaux. A partir de là, A. Chauvel s'appuyant sur un grand nombre de travaux a pu expliciter la distribution des sols telle qu'elle se réalisait :

- d'abord à l'échelle *paysagique* (cf. fig. a). En effet, alors que les sols rouges occupent le centre des reliefs convexes au sud, ils forment sur le pourtour des plateaux une auréole de plus en plus lâche, claire et discontinue vers le nord, laissant place aux sols beiges typiques ;

- ensuite, à l'échelle *régionale* (fig. b) montrant que ces sols se distribuaient au Sénégal de façon ordonnée dans les mailles d'un réseau formé par l'entrelacement de lignes approximativement latitudinales indiquant la variation du facteur pluviosité et de lignes obliques suivant l'abaissement de l'humidité relative de l'air en saison sèche.

Mais cette étude a permis d'aller plus loin dans la mesure où, à côté de la caractérisation des toposéquences, il a pu être procédé à un examen approfondi de séquences datées d'évolution *sous culture après défrichement* (entre quelques années et un siècle) et, de ce fait même, à une estimation de la vitesse de transformation ; on a constaté ainsi qu'il fallait *environ 1 000 ans pour transformer un sol rouge en sol beige, la propagation latérale se faisant à raison de 2 cm/an* (fig. c).

Il a pu finalement être proposé une reconstitution et une projection possible de l'évolution pédomorphologique sous la forme d'une série de cartes qui représentent les *étapes successives* de l'évolution du paysage (fig. d).

A CHAUVEL - 1976 • RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES. ORSTOM. TRAVAUX ET DOCUMENTS N° 62. 532 P. (1977).

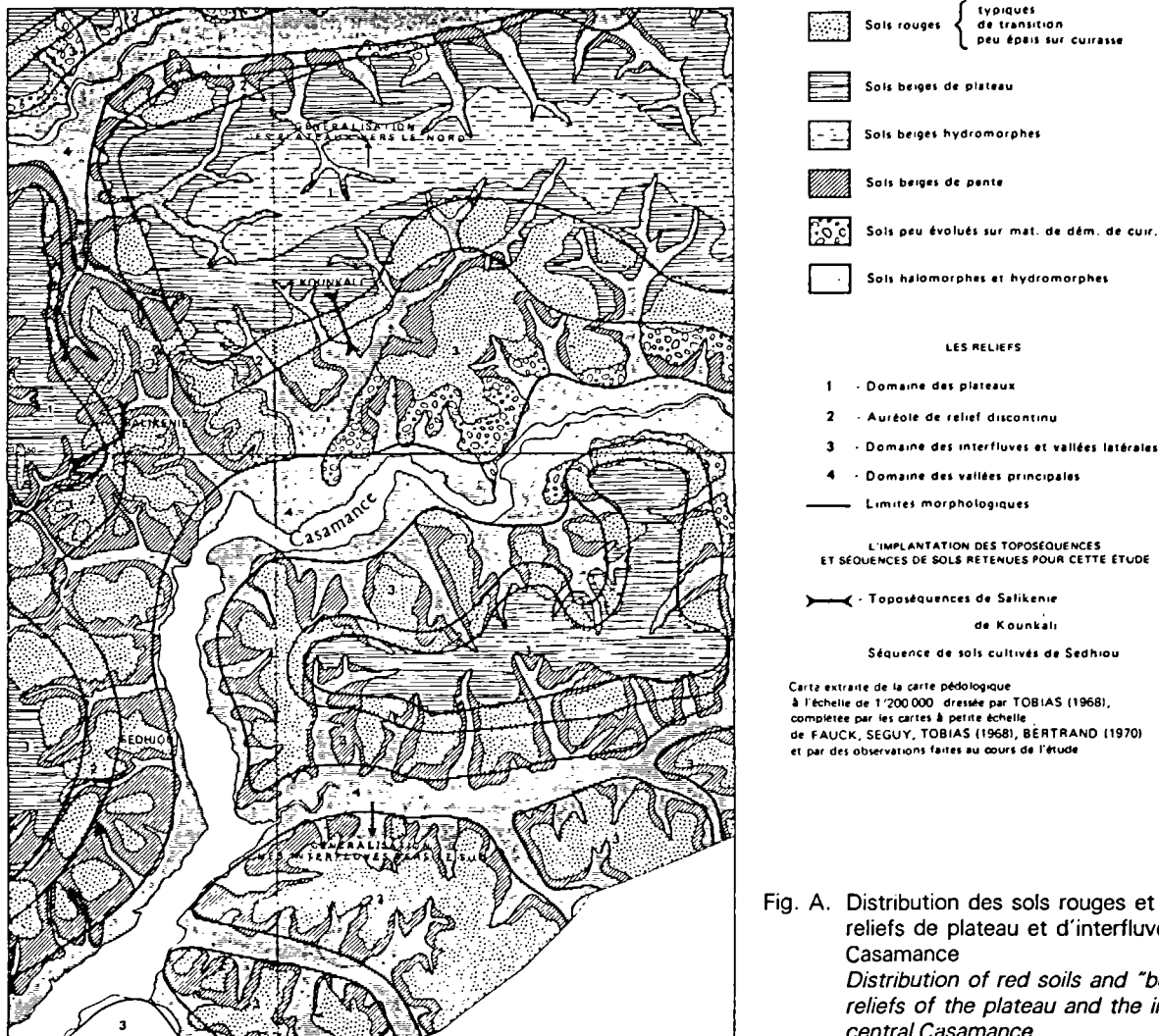


Fig. A. Distribution des sols rouges et beiges sur les reliefs de plateau et d'interfluve de moyenne Casamance
Distribution of red soils and "beige" soils on the reliefs of the plateau and the interfluve of the central Casamance

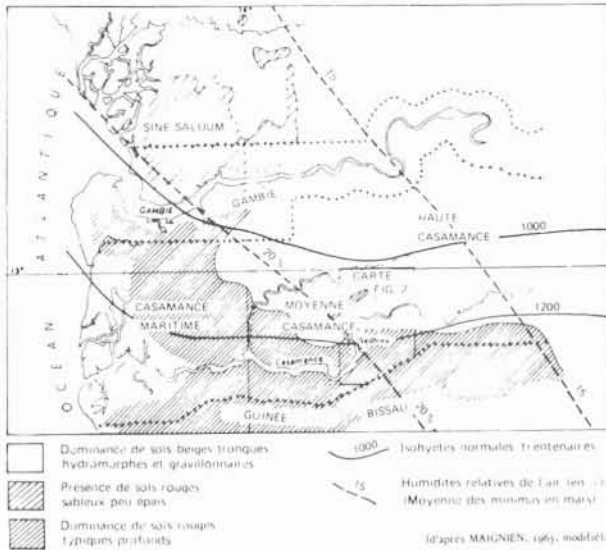


Fig. B. Carte schématique montrant la limite entre les sols rouges et les sols beiges dans la région sud-ouest du Sénégal. Schematic map showing boundaries between red soils and "beige" soils in the south-western region of Senegal.

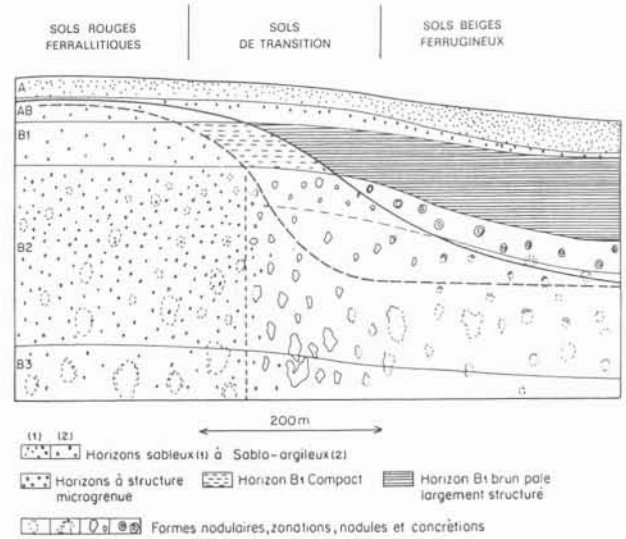


Fig. C. Relations entre les sols ferrallitiques et les sols beiges ferrugineux dans la toposéquence. Relationships between ferrallitic soils and ferruginous soils in the toposequence.

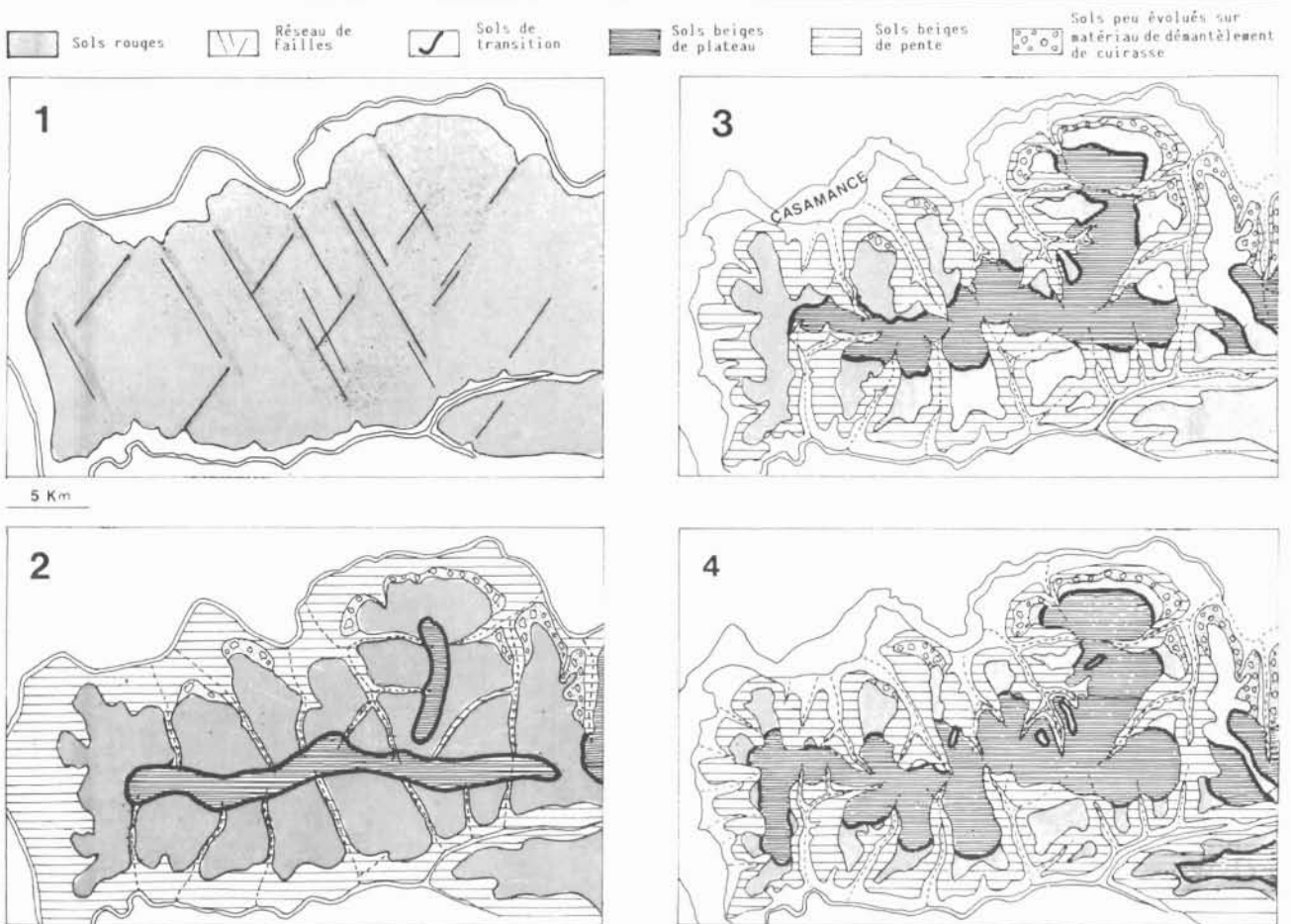


Fig. D. Les différentes étapes de la transformation pédologique d'un plateau de moyenne Casamance. Various stages in pedological transformation of a plateau in the central Casamance.

ANNEXE IX

Analyse structurale et expérimentation agronomique, application à la Guyane

R. BOULET ET AL. (1982) - R. BOULET, PH. GODON ET AL. (1984)

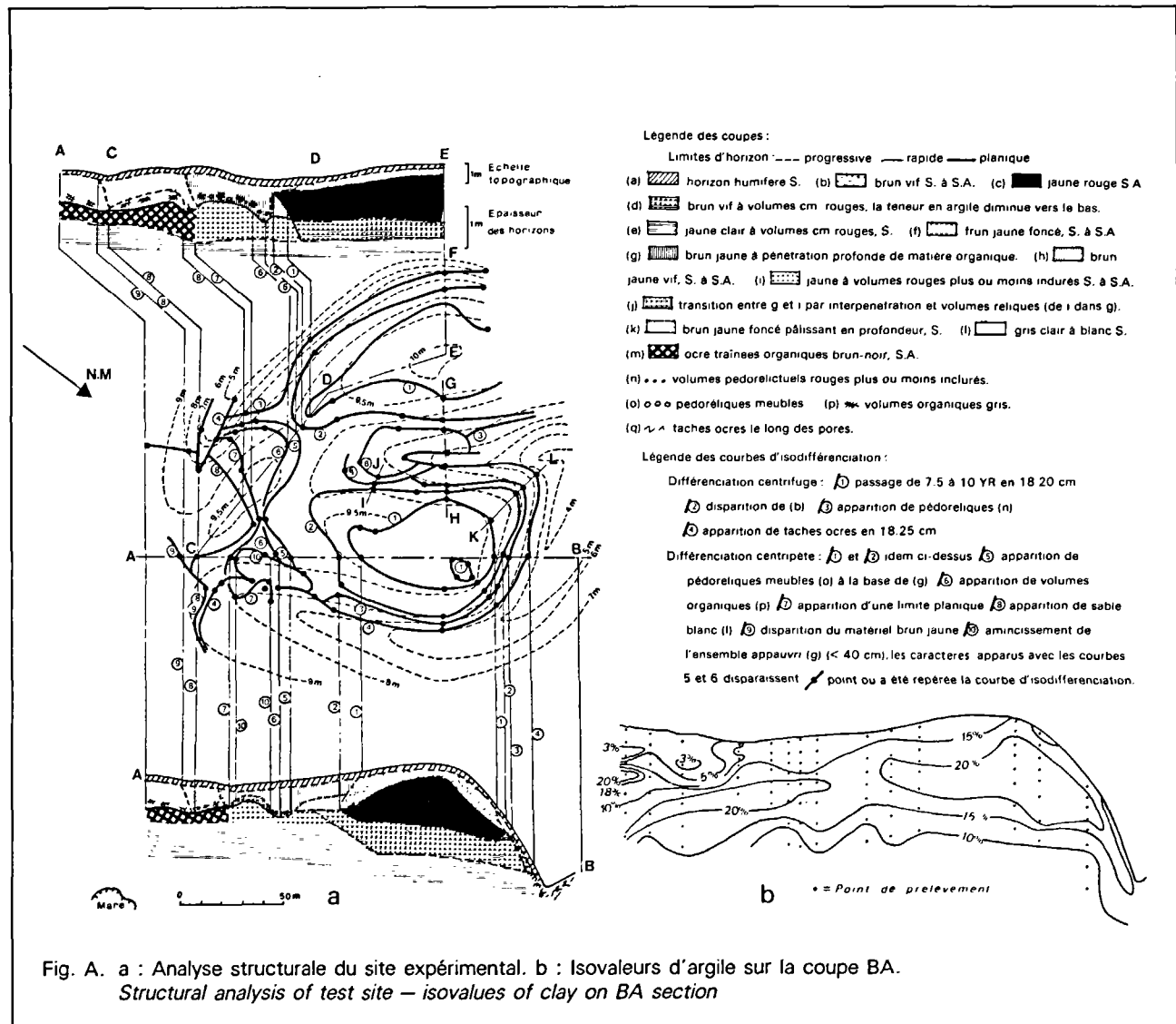
L'analyse structurale en pédologie se prête parfaitement bien à l'échelle *parcelle* ; Ceci est présenté notamment dans la plaquette sur la Guyane (Document reproduit ci-dessous). De ce fait, elle est en prise directe avec l'Agro-nomie et, en particulier, avec l'expérimentation. L'étude réalisée récemment par R. Boulet, Ph. Godon et al. (1984) sur les barres pré littorales de la Guyane est significative à ce sujet.

Après une analyse pédologique *détaillée* du site expérimental dont quelques éléments sont reportés sur la figure A et une représentation cartographique des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface

(fig. B), il a été procédé à 2 expérimentations : soja sur 2 cycles et maïs sur un cycle et 3 traitements (fig. C). Les résultats concernant le comportement du soja et du maïs aux différents stades en relation avec les sols sont reportés sur les figures D et E ; ils ont permis ainsi de montrer que certaines *limites structurales* étaient tout à fait significatives et qu'elles pouvaient de ce fait être retenues en vue de la *compartmentation agronomique* des barres pré littorales de la plaine côtière ancienne. Une cartographie des sols basée sur des critères taxonomiques s'avère en revanche complètement *inopérante* de ce point de vue.

BOULET R, GODON PH, LUCAS Y ET WOROU SK • ANALYSE STRUCTURALE DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE ET EXPÉRIMENTATION EN GUYANE FRANÇAISE. CAH. ORSTOM SÉRIE PÉDOLOGIE N° 1-1984. (APPLICATION AU SOJA ET AU MAÏS SUR BARRE PRÉLITTORALE A LA PAPPI).

DOCUMENT CENTRE ORSTOM-CAYENNE



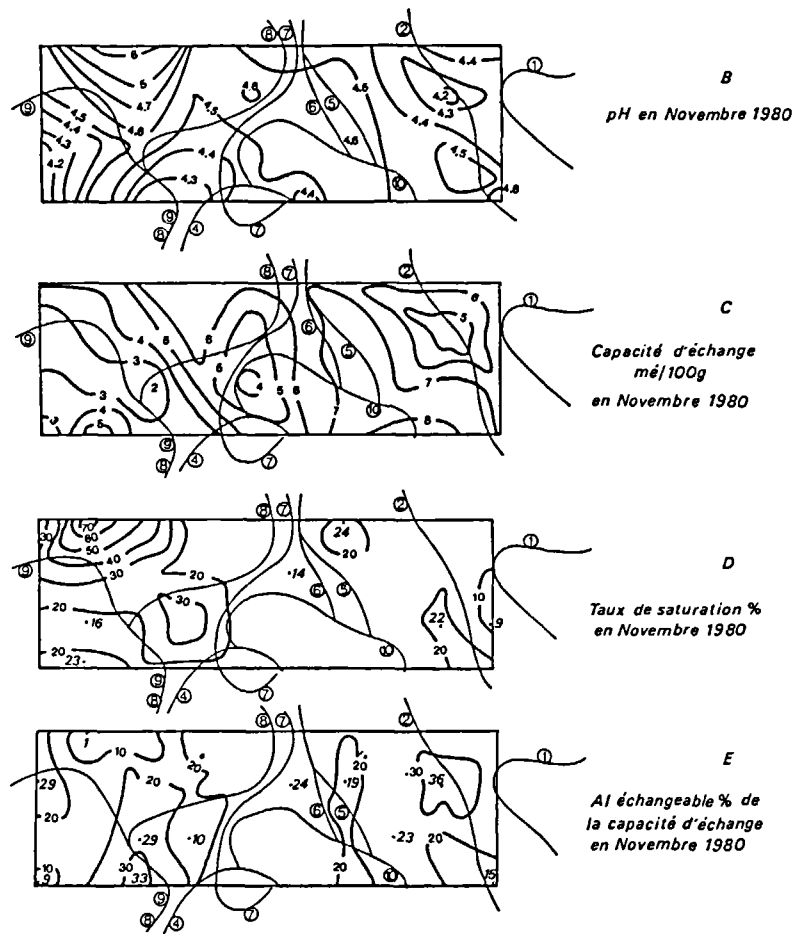


Fig. B. Caractères analytiques de surface après défrichement maïs avant tout apport fertilisant (novembre 1980) et séquence de pH en juin 1984 après quatre ans de culture et de fertilisation
Analytical nature of surface horizon after deforestation but before any fertilizing (november 1980) and pH sequence in june 1984 after four years of cultivation and fertilizing

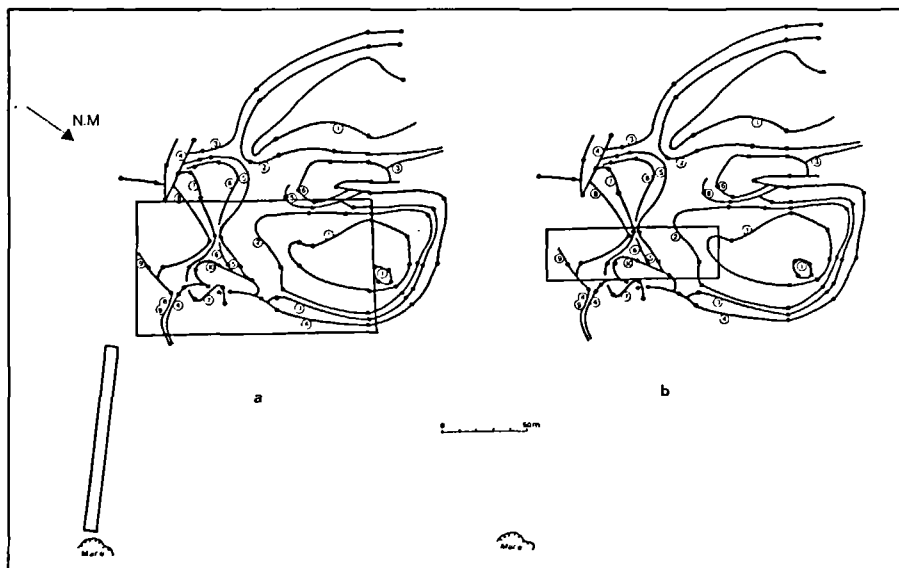


Fig. C. Dispositif expérimental
a : Expérimentation soja
b : Expérimentation maïs
Experimental system
Soya experimentation
Corn experimentation

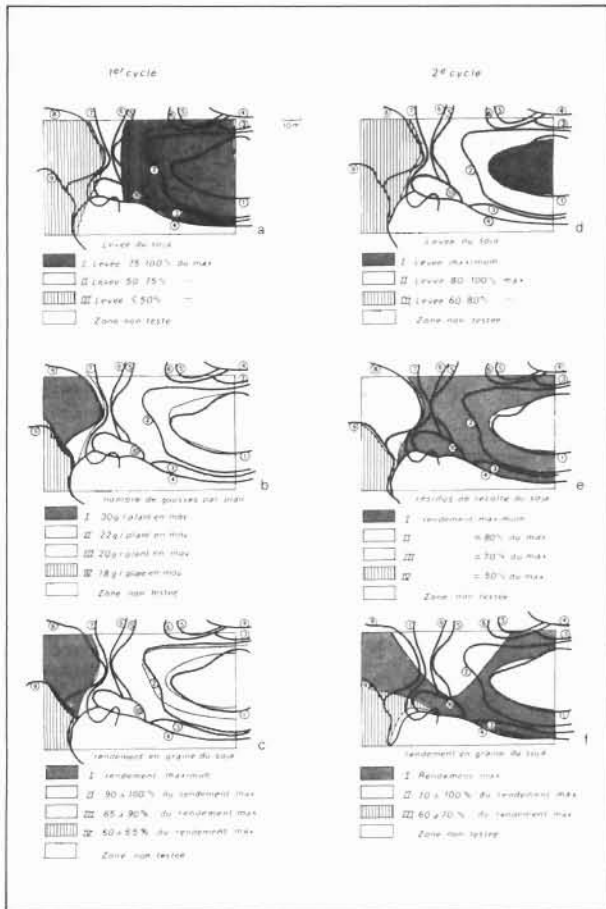


Fig. D. Comportement du soja aux divers stades
Behaviour of soya at various stages

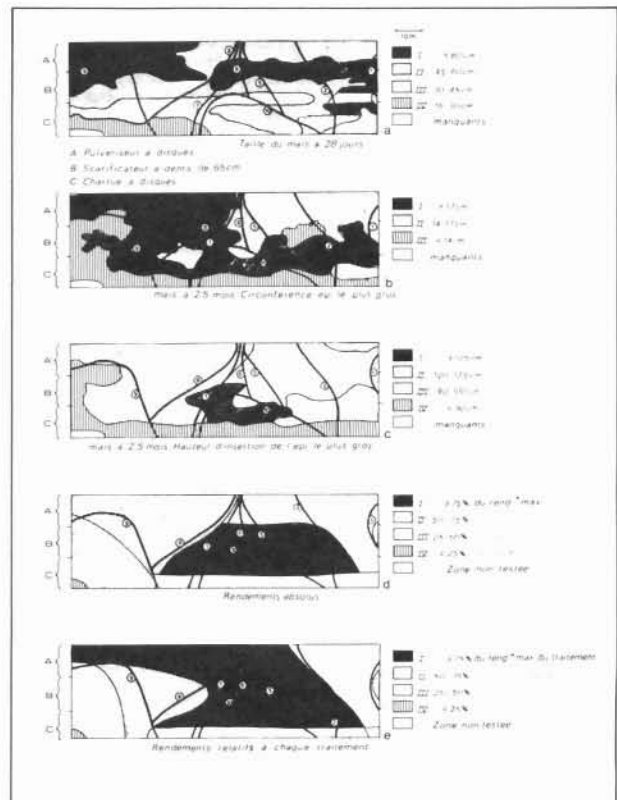


Fig. E. Comportement du maïs aux divers stades
Behaviour of corn at various stages

États des recherches sur les sols Guyanais - Apport de la pédologie au développement

R. BOULET

Objet de la pédologie, relations avec l'agronomie

Le pédologue étudie le sol, qui est la pellicule meuble située à la surface de l'écorce terrestre et qui résulte de l'altération des roches, dures ou non, sous l'effet des agents climatiques, pluie et température essentiellement. C'est dans cette pellicule que la végétation, naturelle ou cultivée, s'enracine et assure son alimentation minérale et hydrique. Le sol n'est pas homogène, il présente des variations d'organisation et de composition verticales et latérales qui influent sur le cheminement de l'eau, le développement racinaire, la répartition des éléments nutritifs, tous facteurs essentiels pour l'utilisation de ce sol par les végétaux, donc pour son exploitation agricole.

Le pédologue fournit à l'agronome les informations sur la composition, la dynamique de l'eau, la richesse chimique de chaque type de sol d'une région. L'agronome à son tour, par une expérimentation appropriée recherche les meilleures techniques et les spéculations les plus adaptées pour chacun de ces sols. Ces résultats sont ensuite extrapolables régionalement grâce aux cartes pédologiques. Selon la diversité régionale des sols, cette collaboration agronome - pédologue est plus ou moins importante. En Guyane française où les propriétés du sol varient consi-

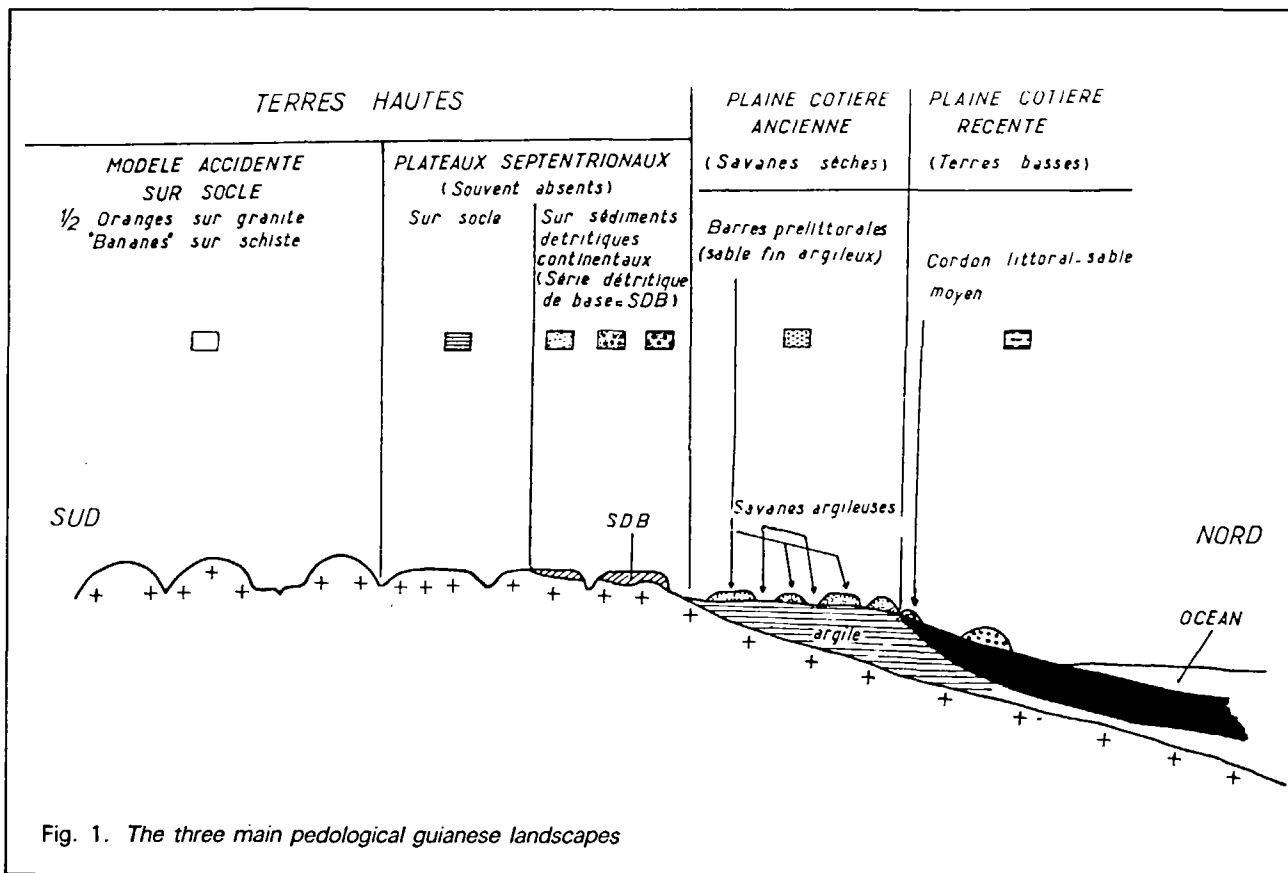
dérablement et rapidement, cette collaboration est essentielle, mais a jusqu'ici manqué de moyens matériels et humains pour se réaliser correctement. Les progrès actuels dans ce domaine sont uniquement attribuables aux bonnes volontés individuelles et non à l'amélioration de ces moyens.

Nous allons tout d'abord examiner très rapidement les trois principaux paysages pédologiques guyanais (cf. fig. 1) : les terres hautes, la plaine côtière ancienne où se trouvent les savanes sèches, les terres basses qui portent entre autres les savanes mouillées. On verra ensuite quel rôle la pédologie doit jouer dans la mise en valeur de la Guyane.

Les terres hautes

On appelle terres hautes en Guyane les régions de collines ou plus rarement de plateaux développées sur le bouclier Guyanais, socle très ancien, cristallin, schisteux ou volcanosédimentaire, ainsi que sur les sédiments sabloargileux qui couvrant une partie du nord ouest du département, s'étendent largement au Surinam et en Guyana et que l'on appelle Série détritique de base.

Sur le socle, ce n'est pas la fertilité chimique partout très basse, comme dans toutes les régions équatoriales humides, qui différencie les sols, mais ce sont leurs propriétés physiques et principalement celles qui régissent le cheminement de l'eau et les possibilités de pénétration de l'enracinement. Il faut en effet savoir que le premier facteur de la fertilité d'un sol, c'est l'équilibre air-eau qui doit



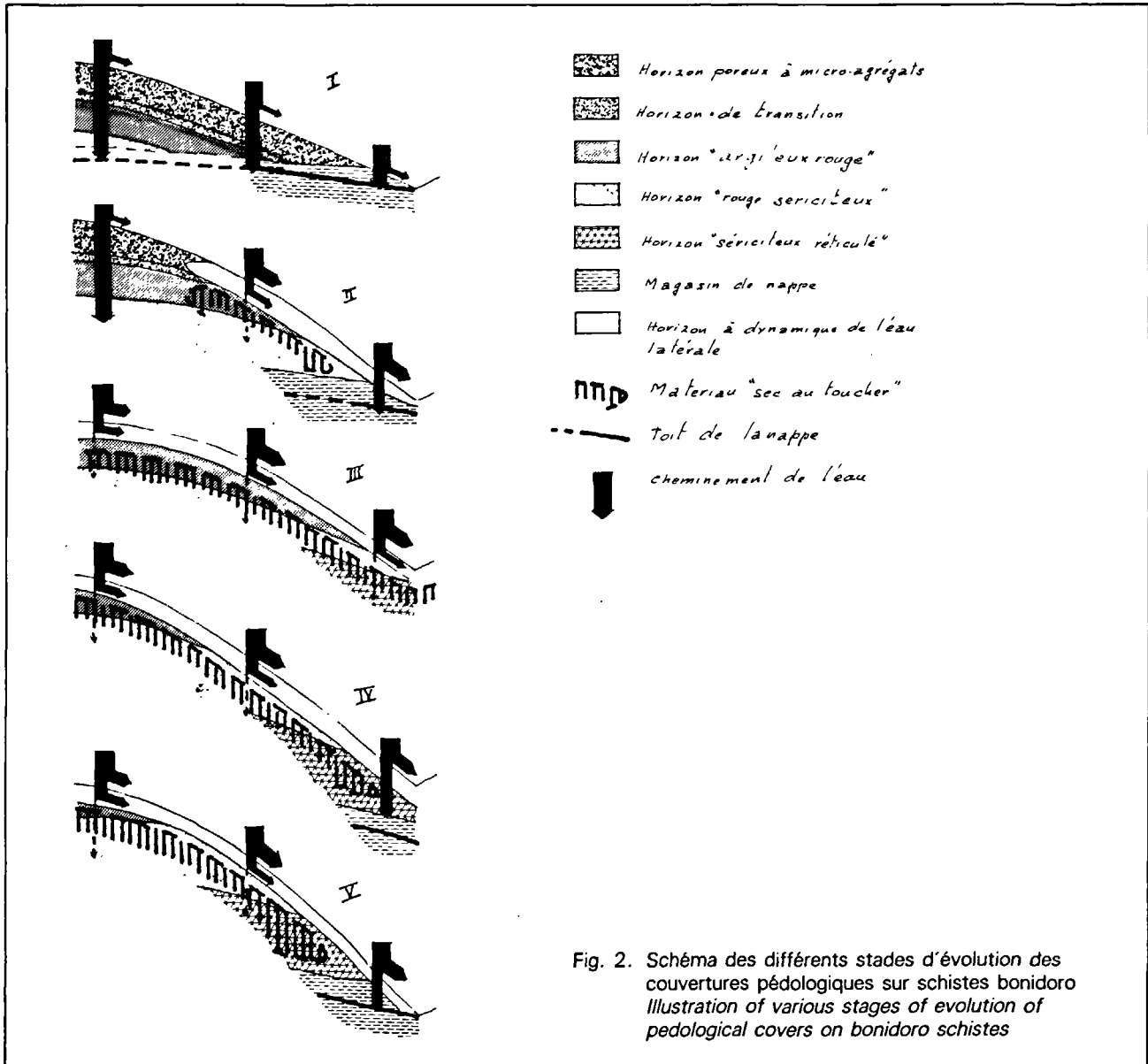


Fig. 2. Schéma des différents stades d'évolution des couvertures pédologiques sur schistes bonidoro
Illustration of various stages of evolution of pedological covers on bonidoro schistes

être tel que les racines des plantes cultivées, à quelques exceptions près comme le riz, trouvent à la fois l'air nécessaire aux échanges gazeux des racines (et à la bonne fermentation des matières organiques fournissant l'humus) et l'eau nécessaire à leur alimentation hydrique et minérale. Certes les plantes sont plus ou moins sensibles à cet équilibre, mais les résultats optimum nécessitent que celui-ci soit convenable. La fertilité chimique reste subordonnée à cette condition. Si la fertilisation chimique a été la principale préoccupation des agronomes en Afrique équatoriale, c'est que l'équilibre air-eau du sol y est en général suffisamment correct pour ne pas constituer une contrainte importante.

Sur terre haute en Guyane, on trouve en gros trois types de couverture pédologique. La plus rare, malheureusement, correspond à des sols où le cheminement de l'eau est vertical et profond, où il n'y a jamais stagnation prolongée d'eau dans la tranche de sol exploitée par les racines mais dont les capacités de stockage sont suffisantes

pour assurer l'alimentation des plantes en période sèche. Ces sols ne présentent pas de contrainte majeure et l'éventail des utilisations agricoles possibles y est large avec une référence pour les cultures ne nécessitant pas un travail du sol fréquent, soit principalement l'arboriculture et la prairie artificielle.

Le second type correspond au contraire à des sols où la pénétration de l'eau est interrompue ou fortement ralentie à faible profondeur, entre 50 et 100 cm. L'eau s'accumule en poches au-dessus de cette barrière hydrique, circule latéralement par débordement de ces poches, tandis qu'une grande partie de l'eau de pluie s'écoule à la surface du sol par ruissellement.

Les principales conséquences pratiques d'un tel régime hydrique sont :

- la faible épaisseur du sol accessible aux racines. Les mesures d'enracinement effectuées sous forêt primaire montrent des différences très importantes dans la répartition des racines entre ce type de sol et le précédent à

drainage vertical ;

- une alternance d'excès d'eau et de sécheresse dans la tranche de sol exploitable par les racines ;
- une très grande fragilité du sol au défrichement car les très forts ruissellements, s'ils ne provoquent pas de départ de terre sous forêt primaire, grâce à la protection de celle-ci et de son chevelu racinaire, entraînent, lors du défrichement une dégradation importante du sol.

Le troisième type correspond aux couvertures mixtes où une partie des versants, généralement la partie supérieure, est à drainage vertical libre, le reste étant à drainage vertical bloqué.

Il importe de comprendre la raison de ces variations afin que cesse en particulier l'assimilation systématique du milieu pédologique guyanais à celui de nos voisins, et plus particulièrement à celui du Surinam, où ces problèmes ne se posent pas, du moins dans les régions actuellement exploitées.

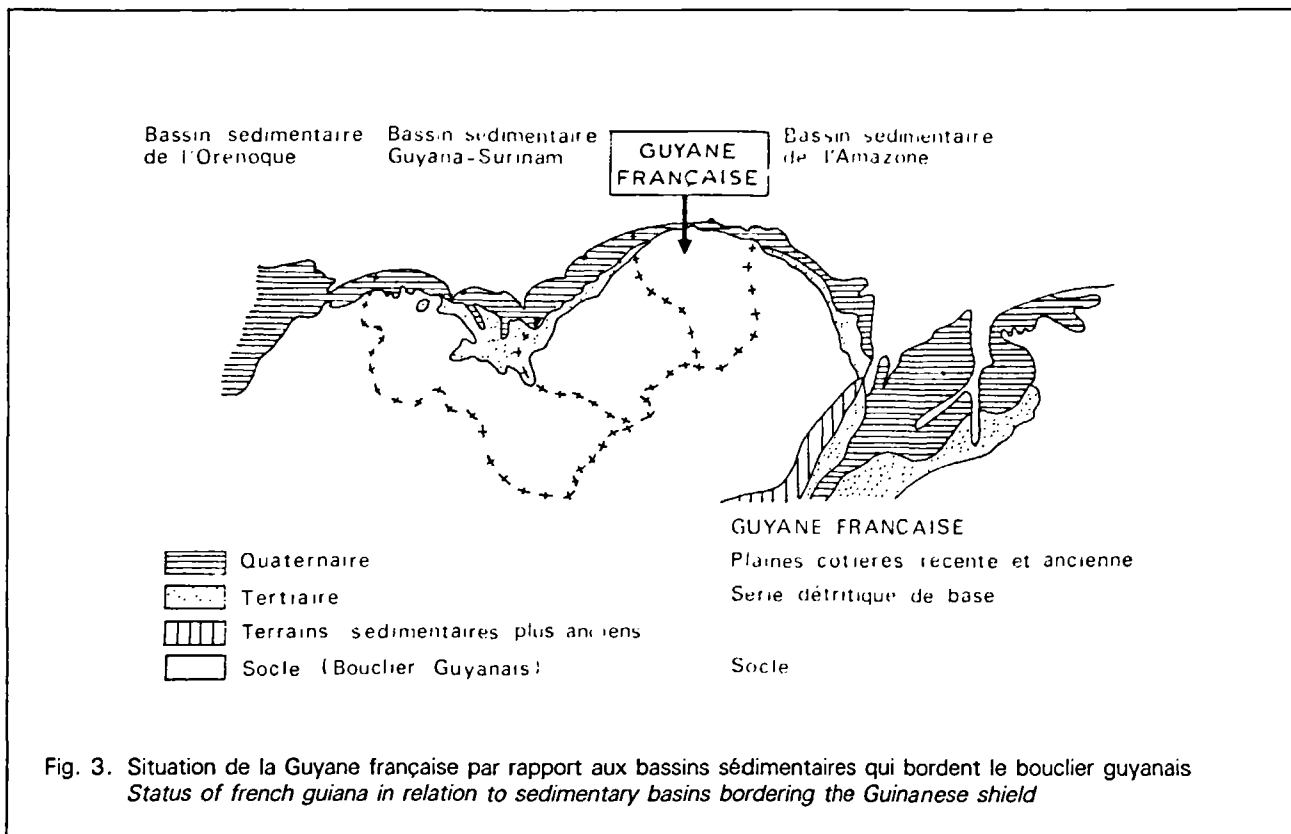
Il s'agit là d'une erreur nuisible à plus d'un titre car d'une part elle est source d'insatisfaction pour la population Guyanaise qui, comparant les réalisations agricoles dans les deux pays, attribue uniquement aux hommes l'échec passé de la mise en valeur en Guyane française. D'autre part, elle incite à continuer d'ignorer une contrainte naturelle qui risque de handicaper les efforts actuels de développement agricole.

De façon très schématique (cf. fig. 2-I), il s'est formé d'abord une couverture pédologique épaisse, à drainage vertical libre, dont les restes constituent la première catégorie définie précédemment. Cette couverture comportait, et comporte encore là où elle subsiste, des horizons supérieurs poreux, filtrants, capables de stocker l'eau de pluie. En profondeur par contre, ces horizons poreux passent

progressivement à des horizons compacts. Mais la régulation de la filtration de l'eau de pluie, grâce aux horizons poreux susjacentes, permet un drainage profond alimentant des nappes phréatiques.

Par suite d'un abaissement relatif du niveau de base, la surface topographique s'est enfoncée dans cette couverture initiale plus rapidement que celle-ci ne se forme et les horizons supérieurs perméables se sont amincis jusqu'à un seuil au-delà duquel leur capacité de stockage de l'eau devient insuffisante pour assurer la filtration à travers les horizons compacts. Il y a alors saturation des horizons supérieurs, écoulement latéral subsuperficiel et ruissellement. Le drainage bascule ; et de vertical et profond, il devient superficiel et latéral. Apparaissent alors les couvertures pédologiques mixtes (fig. 2-II), puis, le processus se poursuivant, les couvertures pédologiques à drainage vertical bloqué (fig. 2-III).

Or cet abaissement relatif du niveau de base est dû au fait que la Guyane française est située entre deux bassins sédimentaires fonctionnels, où s'accumulent les alluvions marines, ce qui provoque un enfoncement de la croûte terrestre susjacente. C'est la subsidence. Ces bassins sont celui du Surinam-Guyana à l'Ouest et celui de l'Amazone à l'Est (cf. fig. 3). Par contrecoup, le compartiment de socle de Guyane française se soulève lentement, ce qui provoque le creusement des rivières et l'abaissement relatif du niveau de base précité. En réalité, un tel phénomène se produit aussi au Surinam, mais dans la moitié Sud, encore peu exploitée. Toutefois les pédologues surinamiens commencent à trouver des sols à drainage vertical bloqué à la latitude du lac de Brokopongo en particulier.

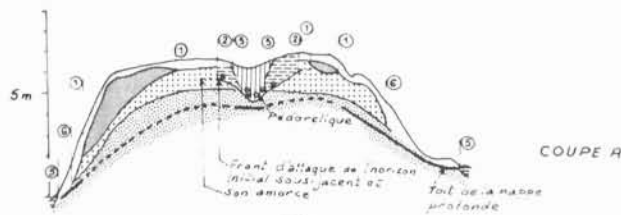


COUPES

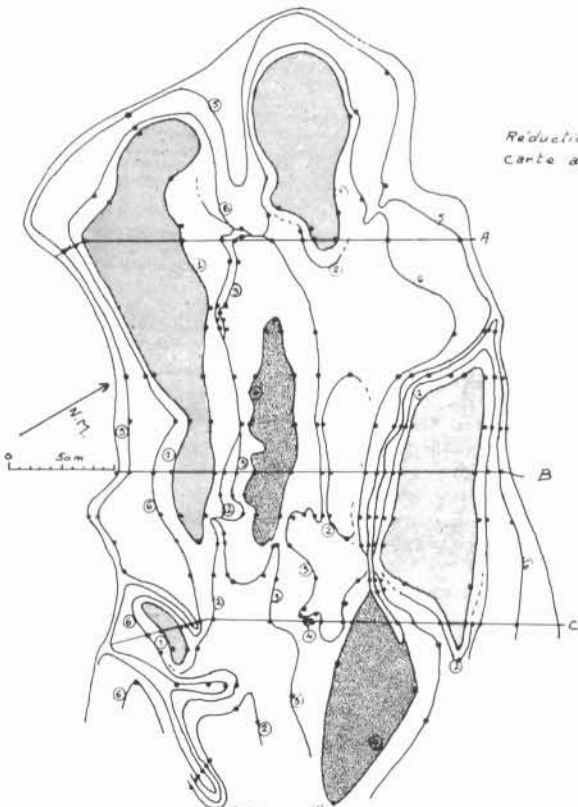
- (a) Volume sablo-argileux jaune rouge
- (b) Volume sablo-argileux jaune à taches rouges
- (c) Volume sableux jaune clair à taches rouges (magasin de nappe)
- (d) Volume jaune clair appauvri en argile
- (e) Volume appauvri en argile beige à taches ocres
- (f) Volume de sable blanc avec accumulation humoferrugineuse à la base
- (g) Volume limono-sableux noir

COURBES D'ISODIFFÉRENCIATION

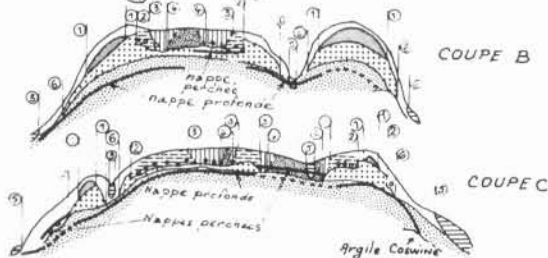
- Remarque : La caractérisation de chaque courbe est réglée pour un observateur qui la traverse en allant du côté du numéro.
- 1 Disparition du volume sablo-argileux jaune rouge (a). Le sol est alors jaune avec des taches rouges en profondeur : il présente des variations verticales de texture progressives.
 - 2 Apparition du volume appauvri en argile jaune clair (d) et d'un front d'attaque par descensus du volume jaune à taches rouges (b) avec persistance de pédotèles au dessus. Ce front correspond à une variation brusque de texture (sableux → sablo-argileux) et de couleur (jaune pâle → jaune vif).
 - 3 Apparition d'îlots millimétriques beige très clair sous l'humus humifère.
 - 4 Apparition de sable blanc (f) au contact du front d'attaque.
 - 5 Apparition du volume sablo-limoneux noir (g).
 - 6 Disparition du volume (b) par suite de la jonction entre le magasin de nappe et de l'horizon appauvri sus-jacent.
 - 7 Point où a été repérée la courbe d'isodifférenciation.



COUPE A



Reduction d'une
carte au 1/2000



COUPE B

COUPE C

Fig. 4. Représentation en coupes et plan d'une couverture pédologique sur barre pré littorale
Representation in section and plan of a pedological cover on pre littoral bar

Nous venons d'examiner assez longuement le problème des sols sur socle parce que ces sols couvrent la majeure partie de la Guyane et qu'ils montrent l'originalité du milieu pédologique guyanais, originalité dont l'aménagement du territoire devrait évidemment tenir le plus grand compte. Les autres paysages pédologiques sont également complexes, complexité que l'on se contentera d'évoquer pour ne pas rendre ce texte trop long et trop ardu.

Toujours dans le domaine des terres hautes, les sols développés sur la *série détritique de base* montrent également des variations latérales importantes et rapides.

Là aussi une couverture initiale, de couleur jaune, à bonnes propriétés physiques, s'est transformée et continue de le faire, mais cette fois pour donner des sables blancs, bien connus entre Iracoubo et Saint-Laurent. Ces sols de sable blanc, totalement dépourvus d'argile, n'ont aucune capacité de stockage de l'eau et il n'est pratiquement pas possible d'améliorer leur fertilité chimique. Les restes de couverture initiale constituent par contre, comme sur le socle, des sols à bonne potentialité, sans contrainte majeure autre que leur pauvreté chimique. Ce sont en particulier les sols jaunes de l'Acarouany. Ils couvrent en Guyane française quelques dizaines de milliers d'hectares, alors qu'au Surinam ils s'étendent sur 550 000 ha.

La plaine côtière ancienne

La plaine côtière ancienne est constituée de deux sédiments marins superposés : à la base des argiles, au sommet des sables fins très bien triés (cf. fig. 1). Ces sables fins ont gardé en partie le modelé du dépôt, constitué d'ondulations de faible amplitude appelées barres pré littorales. Sur ces barres pré littorales, on observe là encore, et l'on peut même dire là surtout, des sols à variations extrêmement importantes et rapides des propriétés physiques du sol et de son régime hydrique, et cela sur de très courtes distances. Une couverture initiale à sols de couleur rouge, à bonnes propriétés physiques, se transforme en sols de sable blanc, gorgés d'eau pendant les périodes pluvieuses.

Le système ressemble à celui de la série détritique de base, mais à la dimension des barres pré littorales qui est de l'ordre de la centaine de mètres alors que sur série détritique de base, l'échelle du système est de l'ordre du kilomètre, voire de la dizaine de kilomètres. Sur la carte au 1/4 200 de la fig. 4, on constate que l'on passe d'un bon sol à un sol de sable blanc en une cinquantaine de mètres. On concevra aisément que la maîtrise d'une telle hétérogénéité lors de la mise en valeur présente quelques difficultés. Lorsque les argiles sous-jacentes affleurent, elles se présentent sous la forme de savanes argileuses, parfois de forêts marécageuses, les premières étant bien connues depuis que l'on a tenté d'y implanter les cultures de riz. Les sols y sont imperméables, saturés d'eau en surface pendant la saison des pluies. Ces propriétés sont effectivement favorables à la riziculture, mais restent à résoudre des problèmes de fertilités chimiques.

Les terres basses

Restent enfin les terres basses qui sont constituées par les sédiments marins argilo-limoneux déposés depuis moins de 3 500 ans et qui sont encore soumises à la submersion par la marée. Cette submersion implique que

les terres basses doivent nécessairement être poldérisées pour être mises en valeur.

Les caractéristiques des terres basses changent lorsque l'on va de la mer vers la terre ferme. Sur le front de mer, où se trouve la mangrove, les sédiments sont salés et non consolidés, donc insuffisamment portants. Un drainage prolongé avec lavage par l'eau de pluie permet de pallier ces défauts. Vers l'intérieur, les sédiments d'âge croissant se dessalent d'abord en surface, puis sur toute leur épaisseur et se consolident, pour donner des sols à propriétés physiques aisément améliorables et à fertilité chimique élevée. Les sédiments les plus anciens, généralement séparés des précédents par un cordon sableux comme celui qui porte la route des Hattes, présentent toutefois des inconvénients graves dus à ce qu'ils se sont déposés en milieu lagunaire et sont interstratifiés avec des niveaux organiques. Il s'en est suivi la formation de sulfures, de pyrite en particulier. Lorsqu'on exonde ces sols pour les cultiver, les sulfures s'oxydent, libérant de l'acide sulfurique, ce qui acidifie considérablement le sol et le rend toxique même pour le riz. Les moyens de lever cette contrainte sont connus mais coûteux et les délais d'améliorations sont longs.

Ce sont donc les terres basses situées au milieu de la séquence qui sont les meilleures. On constate sur la carte que la largeur des terres basses diminue de Saint-Laurent jusqu'à Cayenne, puis qu'elle augmente à nouveau vers l'Est entre la Mahury et Saint-Georges. Cette disposition est due une fois de plus au fait que la Guyane française est située entre deux bassins sédimentaires.

Les terres basses de bonne qualité de Guyane française sont en majeure partie situées à l'Est de Cayenne, dans la plaine de Kaw. Malheureusement, cette région est aussi la plus arrosée de Guyane et la petite saison sèche de mars est trop incertaine pour assurer la réalisation des deux cycles culturaux indispensables à la rentabilisation de l'investissement coûteux que constitue la poldérisation. Les conditions climatiques sont beaucoup plus favorables entre Mana et Saint-Laurent, ce qui explique le choix de cette région pour l'implantation des polders rizicoles, malgré la qualité moindre des terres basses qui s'y trouvent.

Rôle de la pédologie dans le développement agricole de la Guyane

Nous venons de voir qu'un certain nombre de contraintes naturelles pèse sur le développement agricole de la Guyane. Faute d'une expérimentation agronomique suffisamment renseignée en ce qui concerne ces contraintes ou d'une agriculture moderne implantée depuis assez longtemps pour apporter des informations agronomiques fiables, il est impossible de faire un pronostic sûr à partir des seules données pédologiques en ce qui concerne les potentialités, les vocations, ainsi que les techniques agricoles et les fertilisations susceptibles de lever les contraintes précitées. En effet, bien que l'on ait maintenant une bonne connaissance de l'organisation et de la dynamique des diverses couvertures pédologiques de Guyane septentrionale, les facteurs qui interviennent aux interfaces sol-plante-atmosphère sont trop nombreux pour que l'on puisse en déduire les effets sur les cultures et surtout les effets à moyen et long terme.

En conséquence, les études pédologiques susceptibles d'apporter une aide efficace au développement agricole de la Guyane sont de plusieurs ordres :

• recherche et délimitation par une cartographie de reconnaissance au 1 / 50 000 des sols sans contraintes hydriques, c'est-à-dire constituant de bons supports physiques pour les cultures. Ces cartographies sont menées dans les régions où l'on sait qu'il existe des surfaces notables de tels sols, ce que des critères physiographiques permettent de déceler, et où le modelé est favorable à l'agriculture mécanisée que l'on envisage actuellement.

Parmi ces régions, l'ordre d'urgence des cartographies peut être déterminé en fonction d'impératifs autres que pédologiques.

Ce type de cartographie est poursuivi depuis 1975, principalement entre la Mana, la rivière Iracoubo, la crique Morpio et la RN 1. C'est en effet dans cette région que se trouvent les plus vastes surfaces de sols à bonnes propriétés physiques de Guyane septentrionale. La cartographie de cette zone est, pour l'essentiel, terminée, et les sols de bonne qualité y couvrent plus de 10 000 ha. Ajoutons que ces terres sont en grande partie désenclavées par le réseau de pistes ouvertes par la SFM, mais que ce désenclavement est provisoire car ce réseau n'est plus entretenu et se dégrade rapidement.

Par contre, la cartographie des régions comportant principalement des sols à contraintes serait coûteuse et peu utile parce que prématurée. Face à ces contraintes, on ne peut donner un avis sûr faute de références agronomiques. Faire un pronostic favorable amènerait les agriculteurs qui s'installeraient sur ces terres à courir des risques importants à moyen et long terme.

• Le second volet rassemble les études agropédologiques destinées à lever les contraintes précitées. Il nécessite une collaboration étroite entre les agronomes des organismes compétents (IRAT, INRA, IRFA, etc.) et les pédologues. Les tâches pédologiques comportent :

- le choix des sites représentatifs des sols étudiés, de concert avec l'agronome ;
- une cartographie très détaillée sur laquelle sont calées les expérimentations agronomiques et qui permet l'extrapolation des résultats de ces dernières ;
- le suivi pédologique de l'expérimentation agronomique.

Seules de telles études peuvent fournir les critères pédologiques permettant de délimiter les sols aptes à telle ou telle culture et d'appliquer à bon escient les techniques d'amélioration mises au point lors de ces expérimentations.

Depuis 1980 un certain nombre de recherches de ce type ont été entreprises (voir les références bibliographiques). Ce sont principalement l'étude du comportement des pâturages sur système pédologique mixte (drainage vertical libre à l'amont, drainage vertical bloqué à l'aval) dans le cadre de la ferme d'élevage du Service de l'Agronomie à Matoury, et l'étude de diverses cultures annuelles sur barres pré littorales sur le domaine de la PAPPI. Toutefois, ces expérimentations ont été menées avec des moyens très insuffisants en personne et en matériel, et toujours avec une dépendance importante vis-à-vis de l'exploitant qui accepte d'accueillir l'expérimentation sur sa ferme. Sans que puisse être mise en doute la bonne volonté de cet exploitant, cette dépendance, qui concerne les travaux nécessitant du gros matériel ainsi que les événements non prévus susceptibles de se produire sur le site expérimental, constitue un handicap considérable pour l'agronome qui ne peut ainsi contrôler comme il le devrait le protocole expérimental. Il s'ensuit une perte importante, soit d'information, soit de fiabilité des résultats.

• Enfin, il ne semble pas actuellement possible d'obtenir

que les nouvelles implantations agricoles soient, pour l'essentiel, situées dans les régions pédologiquement favorables que l'on a cartographiées. De ce fait, nombre de futurs agriculteurs se voient attribuer des terrains dans des zones où dominent des sols à forte contrainte. Il n'est pas pour autant question pour la Section de Pédologie de laisser ces personnes dans l'ignorance de la nature des sols sur lesquels ils souhaitent s'installer, mais il n'est pas non plus envisageable qu'un chercheur aille visiter chaque terrain concerné, ce qui compromettrait l'accomplissement des tâches principales que nous venons de décrire. La solution de ce problème, appliquée avec succès depuis plusieurs années, fait appel à la collaboration du demandeur. Un plan de sondage est établi par le pédologue d'après le plan de situation du terrain qui doit comporter la localisation des axes de drainage. Le matériel nécessaire à la réalisation de sondages, ainsi qu'au prélèvement des échantillons selon un protocole précisément défini, est prêté au demandeur pour un ou plusieurs week-end. Les échantillons sont ensuite étudiés par un pédologue qui peut alors caractériser la couverture de sol concernée. Cette solution présente le double avantage d'économiser au maximum le temps des chercheurs et de permettre au demandeur de découvrir le sol qu'il veut cultiver. Ainsi se trouve préservée notre fonction, très importante à nos yeux, d'information sur les problèmes de sol auprès de la population guyanaise.

Une fois précisées les possibilités et les limites des apports de la pédologie au développement, il convient de rappeler que les décideurs restent évidemment libres de tenir compte ou non de ces données. Si des implantations agricoles sont réalisées dans des zones à contrainte, les considérations précédentes n'impliquent nullement que cela doive aboutir à un échec mais seulement que l'on n'a aucun élément pour faire un pronostic sûr. Toutefois, lors de la prise de décision, il importe alors de savoir et de préciser qu'un pari est fait dont les auteurs de la décision sont responsables.

Bibliographie

BEREAU (M), BOULET (R), ET LUCAS (Y) • PERENNITÉ DES PRAIRIES A *DIGITARIA SWAZILANDENSIS* EN GUYANE. IN « LES COLLOQUES DE L'INRA » N° 24 PRAIRIES GUYANAISES ET ÉLEVAGE BOVIN P. 219-231.

BOULET (R), FRITSCH (E) ET HUMBEL (F X) • LES SOLS DES TERRES HAUTES ET DE LA PLAINE CÔTIÈRE ANCIENNE EN GUYANE FRANÇAISE SEPTENTRIONALE. ORGANISATION EN SYSTÈMES ET DYNAMIQUE ACTUELLE DE L'EAU 1979, DOC. MULTIGRAPHIÉ, 170 P. (A CONSULTER SUR PLACE AU CENTRE ORSTOM DE CAYENNE).

BOULET (R), CHAUVEL (A), HUMBEL (F X) ET LUCAS (Y) • ANALYSE STRUCTURALE ET CARTOGRAPHIE EN PÉDOLOGIE. CAH ORSTOM SÉRIE PÉDOLOGIE N° 4, 1982, P. 309-351.

BOULET (R) ET LUCAS (Y) • IMPORTANCE DE LA DIFFÉRENCIATION PÉDOLOGIQUE LATÉRALE DANS L'EXPÉRIMENTATION AGRONOMIQUE EN GUYANE FRANÇAISE. IN « LES COLLOQUES DE L'INRA » N° 24 PRAIRIES GUYANAISES ET ÉLEVAGE BOVIN, P. 103-126.

BOULET (R), GODON (PH), LUCAS (Y), ET WOROU (S K) • ANALYSE STRUCTURALE DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE ET EXPÉRIMENTATION EN GUYANE FRANÇAISE. CAH ORSTOM SÉRIE PÉDOLOGIE N° 1-1984 (APPLICATION AU SOJA ET AU MAIS SUR BARRE PRÉLITTORALE A LA PAPPI).

BOULET (R), CHAUVEL (A), ET LUCAS (Y) • LES SYSTÈMES DE TRANSFORMATION EN PÉDOLOGIE. IN « LIVRE JUBILAIRE DU CINQUANTIENAIRE DE L'AFES » P. 167-179, 1984

CABIDOCHÉ (Y M) • UNE APPROCHE CARTOGRAPHIQUE DU FONCTIONNEMENT DES SOLS DE GUYANE COMME SUPPORT DES PRODUCTIONS FOURRAGÈRES. IN « LES COLLOQUES DE L'INRA » N° 24. PRAIRIES GUYANAISES ET ÉLEVAGE BOVIN P. 127-163.

ANNEXE X

Ruissellement, dynamique superficielle et érosion en Afrique de l'Ouest

E. ROOSE, 1981

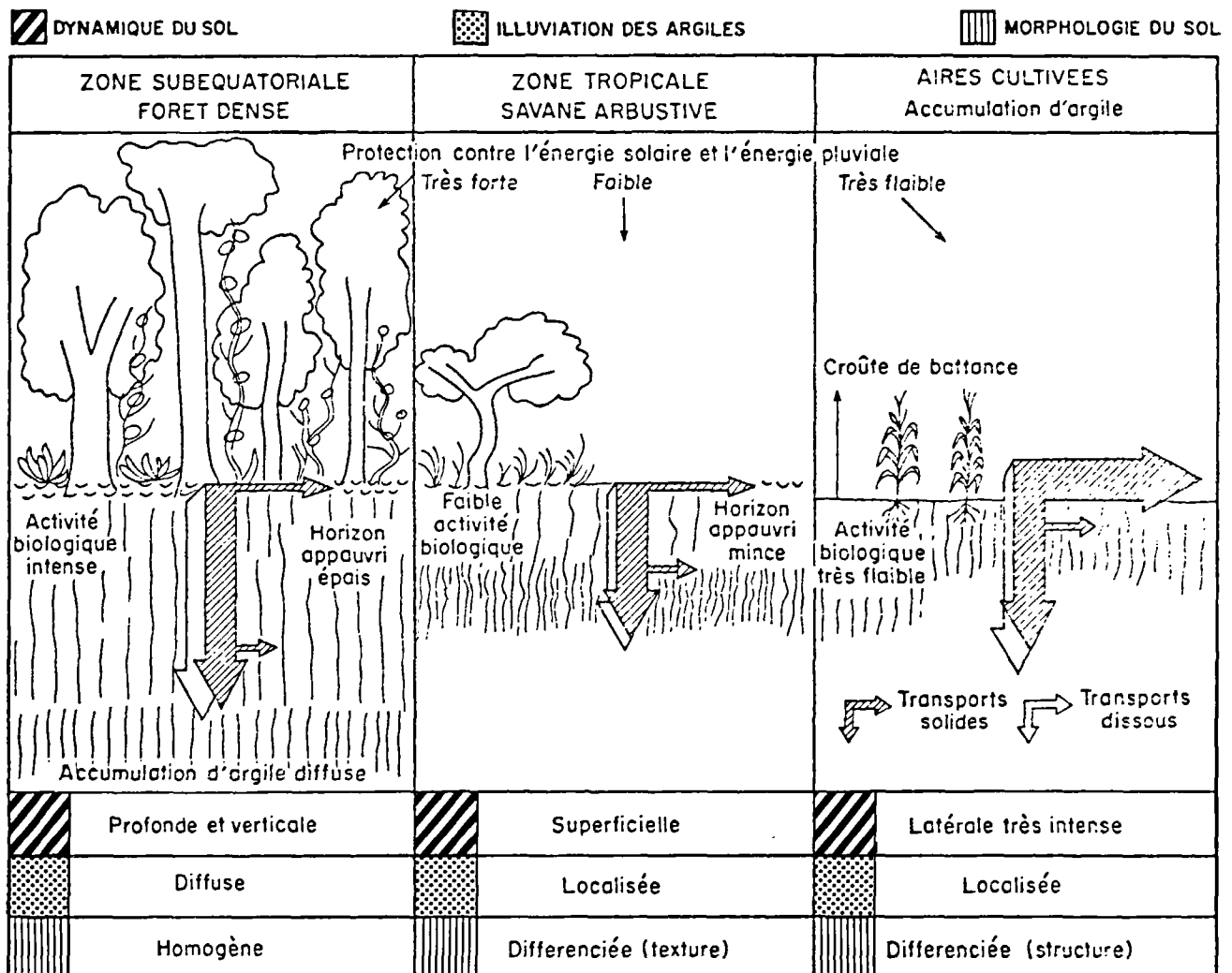
Les résultats obtenus dans cette étude ont bien permis de cerner l'influence des conditions bioclimatiques d'une part, et de la mise en culture d'autre part sur l'évolution des sols de cette région. Ils ont été résumés dans la figure ci-jointe qui atteste de l'intensité des transports sous forme *particulaire* dans *toutes* les situations, même en milieu subéquatorial réputé pourtant comme très hydrolysant. Mais la direction principale de ce transport particulier peut être variable :

- sous végétation naturelle, le transport *subvertical* de fractions fines à l'intérieur du sol (lessivage) l'emporte sur le transport latéral par érosion superficielle, sauf en ce qui concerne la zone présahélienne ;

- sous végétation dégradée ou sous culture, l'activité biologique du sol est rapidement réduite ; la structure du sol est détruite et une pellicule de battance (avec horizon compact à faible profondeur) se forme. Dans ce cas, le transport *latéral* croît de façon exponentielle, avec appauvrissement superficiel en fraction fine ou même ablation pure et simple de l'horizon de surface. *En quelques centaines d'années, sous cultures sarclées, le sol peut être appauvri ou tronqué sur plusieurs dizaines de centimètres.*

E ROOSE - (1981) • DYNAMIQUE ACTUELLE DES SOLS FERRALLITIQUES TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE. ORSTOM. TRAVAUX ET DOC. N° 130. 569 P.

POUR L'AMÉRIQUE DU SUD TROPICALE (GUYANE...), IL FAUT CONSULTER LE PROJET ECEREX : ANALYSE DE L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER TROPICAL HUMIDE ET DES MODIFICATIONS APPORTÉES PAR L'HOMME. JOURNÉES DE CAYENNE, 1983, CIRAD (CTFT), INRA, MUSEUM ET ORSTOM, RONÉO. 417 P.



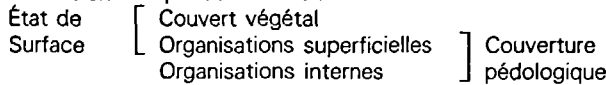
ANNEXE XI

Nature et importance des organisations superficielles dans les couvertures pédologiques du Sahel et des confins sahariens

Dans le domaine des sols, les principaux résultats obtenus au cours des opérations réalisées à l'aide des simulateurs de pluie concernent les *états de surface*. En se référant ainsi à trois composantes du milieu :

- couvert végétal ;
- organisations pédologiques superficielles ;
- organisations pédologiques internes ;

il a été possible de concevoir le diagramme général suivant en Afrique de l'Ouest :



Mais l'importance de ces différents paramètres sur le plan pédohydrique est tout à fait variable en fonction de la zone climatique considérée. Le tableau suivant dû à C. Valentin (1984) indique les paramètres principaux (**) ou importants (*) à prendre en compte dans la caractérisation des milieux superficiels.

Il en résulte que plus le milieu est sec, plus l'évolution pédohydrique est superficielle et latérale, alors qu'en milieu constamment humide la dynamique est essentiellement interne et verticale. Aussi, *dans les zones arides, la cartographie des états de surface avec prise en compte des organisations superficielles doit être privilégiée*. C'est elle qui est maintenant pronée, comme complément indispensable à la caractérisation pédologique, dans toute la zone sahéliosoudanaïenne, sahéenne et prédesertique. Un

Zone climatique	Limites pluviométriques approximatives (mm)	Couvert végétal	Couverture pédologique	
			organisation superficielles	organisations internes
Forêt tropicale	1600	-	--	●●
Savane humide	1200-1600	●●	●	●●
Savane sèche	400-1200	●(●)	●	-
Sahel	200-400	●	●●	-
Confins sahariens	200	-	●●	-

Hierarchie des caractères à prendre en compte lors de la cartographie des petits bassins versants, pour différentes zones climatiques

Hierarchy of features to be considered in mapping of small river basins for various climatic areas

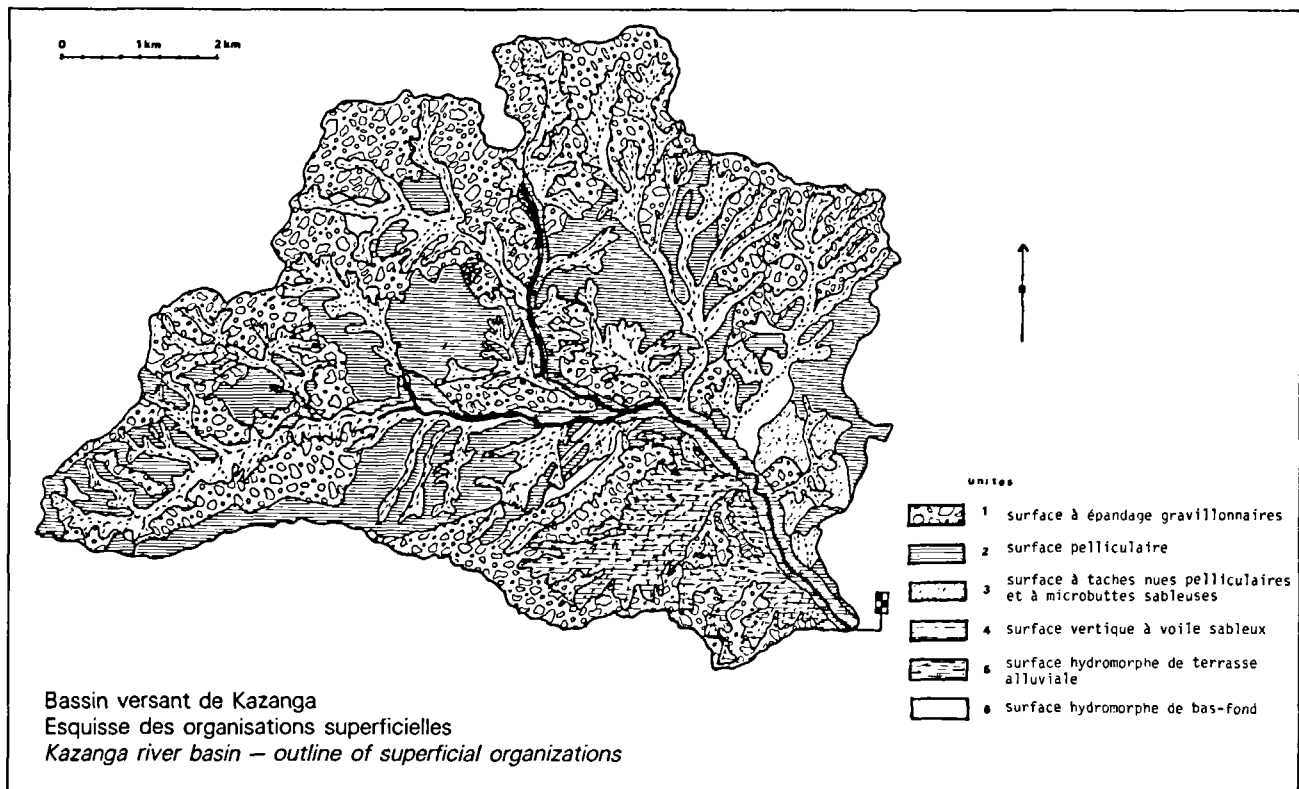
exemple est présenté à cet effet ; il concerne le bassin de Kazanga (Burkina Faso) (cf. fig).

J ALBERGEL, A CASNAVE ET C VALENTIN - (1986) • MODÉLISATION DU RUISSELLEMENT EN ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE. SIMULATION DE PLUIE ET CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE. ORSTOM. COLLOQUES ET SÉMINAIRES. JOURNÉES HYDROLOGIQUES MONTPELLIER 1985. 75-89.

C VALENTIN - (1985) • CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE.

C VALENTIN - (1983) • ORGANISATIONS SUPERFICIELLES DE KAZANGA. CARTE 1 / 50 000. ORSTOM ADIOPODOUMÉ (13 P.).

C VALENTIN - (1986) • SOIL SURFACE CRUSTING. SOME AGRONOMIC IMPLICATIONS SÉMINAIRE SUR LES LATÉRITES. DOUALA (CAMEROUN). ORSTOM-IBSRAM (SOUS PRESSE).



ANNEXE XII

Établissement d'une carte d'aptitude des sols à l'irrigation pour l'optimisation de périmètres irrigués au Niger

J. CHARROY, F. FOREST, J.C. LE GOUPIL, M. VALET, 1978-1980

L'approche analytique des normes et paramètres du fonctionnement d'un aménagement hydro-agricole (Ressources hydriques, structure du parcellaire, calibrage du réseau, conduite de l'irrigation...) était basée sur la climatologie, les besoins en eau des cultures et la *Carte d'aptitude des sols à l'irrigation*. Cette carte est établie en intégrant les caractères pédologiques du périmètre étudié (texture, profondeur) et les propriétés physiques, hydriques et hydrodynamiques qui sont étroitement liés.

Les différents types de sols existants sont ainsi regroupés en ensembles caractérisés par leur Réserve Utile (RU) c'est-à-dire, pour une profondeur donnée, leur capacité de stockage en eau accessible à la plante. De telles études furent menées au Niger, le long de la Vallée du Fleuve Niger, pour l'implantation des parcelles du périmètre irrigué de Sona en fonction des classes d'aptitude des sols à l'irrigation. Pour les périmètres irrigués, les résultats obtenus par cette méthode sont susceptibles d'être utilisés à différents niveaux :

- pour une identification rapide, le développeur disposant de données pédoclimatiques peut ainsi déterminer rapidement les déficits hydriques à combler par l'irrigation ;
- pour une étude complète, plus détaillée, s'il dispose de l'ensemble des résultats caractérisant les termes du bilan hydrique.

J CHARROY, F FOREST ET J.C. LE GOUPIL. 1978 • ÉVALUATION FRÉQUENTIELLE DES BESOINS D'IRRIGATION POUR L'OPTIMISATION D'UN PROJET D'AMÉNAGEMENT HYDRO-AGRICOLE (PÉRIMÈTRE DE SONA-NIGER, A.C.C. (DGRST). LUTTE CONTRE L'ARIDITÉ EN MILIEU TROPICAL. DGRST-GERDAT-INRAN-IRAT.

ANNEXE XIII

Les Bas-fonds en Afrique et à Madagascar

M. RAUNET, 1982-1985

Les Bas-fonds constituent des « unités de milieu » caractéristiques des paysages tropicaux recouverts par un épais manteau d'altération. Situés dans les parties amont des vallées alluviales classiques et non soumis à une dynamique hydrologique et sédimentologique brutale (contrairement aux premières), ceux-ci forment les axes de convergence et d'écoulement préférentiels des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques contenues dans les niveaux d'altération (fig. 1). Par rapport aux « interfluvies » avoisinants, mieux drainés (glacis, versants, plateaux) qui ne sont que le lieu de transit par ruissellement et infiltration des eaux pluviales, les bas-fonds sont des *sites privilégiés pour le stockage de l'eau*. Aussi peuvent-ils, ou pourraient-ils, *non seulement permettre la riziculture durant la saison humide, mais encore donner lieu à la saison sèche à des cultures de contre-*

saison : cultures maraichères, céréales... Mais jusqu'alors, pour des raisons d'ordre, soit sociologique, soit technique, ils ont été assez peu ou assez mal exploités.

Pourtant, ils représentent des surfaces non négligeables sur les socles stables et dans les zones où la pluviosité dépasse 500 mm (*du 1/10 à la moitié de la superficie totale*), puisque l'évaluation pour toute l'Afrique conduit à une valeur de 1 300 000 km² environ.

Au demeurant, leur nature peut varier en fonction des conditions bioclimatiques ; c'est ainsi qu'il a été montré qu'on pouvait distinguer quatre grands types zonaux de bas-fonds (fig. 2 et 3) :

- bas-fonds des régions sahéliennes et soudanosahéliennes (500 mm < p < 1 000 mm), qui sont larges, plats et peu encaissés ;
- bas-fonds des régions soudaniennes et soudanoguinéenne de l'Afrique de l'Ouest (1 000-1 300 mm) qui sont bien marqués, mais moins larges (< 300 m) et bordés par une frange latérale sableuse ;
- bas-fonds des régions zambésiennes de l'Afrique Orientale (1 000-1 300 mm). Larges et concaves, on les appelle des Dambos (200 m à plusieurs kilomètres de largeur) ;
- bas-fonds des régions humides guinéennes (> 1 300 mm) qui sont plats, marécageux et encaissés au sein d'interfluvies convexes en demi-orange.

M RAUNET - 1985 • BAS-FONDS ET RIZICULTURE EN AFRIQUE. APPROCHE STRUCTURALE COMPARATIVE. AGRO. TROP. VOL. 40, N° 3.

M RAUNET - 1985 • LES BAS-FONDS EN AFRIQUE ET A MADAGASCAR : GÉOMORPHOLOGIE, GÉOCHIMIE, PÉDOLOGIE, HYDROLOGIE, Z. GÉOMORPH. N.F. SUPPL. BD. 52 : 25-62.

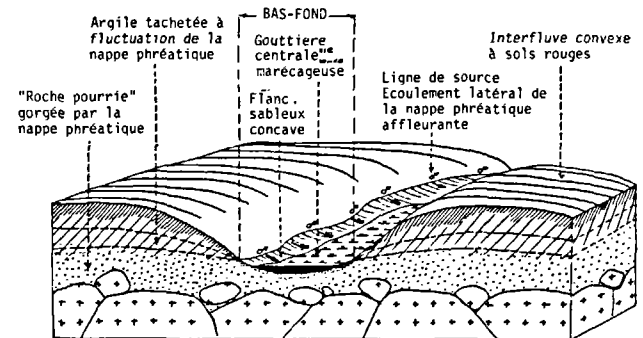



















Fig. 1. Coupe et fonctionnement schématisé d'un bas-fonds tropical
Section and schematic function of a tropical bottom land

-  Socle granito-gneissique diacrise à filons de quartz, non altéré
-  Arène argilo-sablo-micacée (roche pourrie), principal réservoir aquifère, généralement imbibée en permanence par la nappe phréatique
-  Argile tachetée ferrugino-kaolinique (pinthite), à canalicules sub-horizontaux. Zone de fluctuation et de circulation latérale de la nappe phréatique
-  Carapace ferrugineuse (pinthite indurée) ancienne zone de fluctuation de la nappe phréatique, actuellement rabotée et n'affectant plus ce matériau.
-  Cuirasse ferrugineuse (alvéolaire en profondeur, pisolithique ou conglomératique en surface) armant les buttes témoins de surfaces anciennes.
-  Nappe de gravats (= stone line =) à débris quartziteux et/ou ferrugineux, ondulée ou festonnée, mais globalement parallèle à la surface topographique.
-  Matériau de recouvrement de la « stone line », argilo-limono-sableux, colore (rouge, ocre ou jaune), d'épaisseur variable (jusqu'à 4 m). Horizon B des sols ferrallitiques, probablement remanié biologiquement (remontées par les termites).
-  Matériau sableux (souvent à sables grossiers) hydromorphe grisâtre, résultant de la dégradation, du lavage et de la décoloration de la pinthite par l'action des fluctuations et circulations latérales de la nappe phréatique.
-  Matériau sabio-gravillonnaire (sols ferrugineux tropicaux appauvris, gravillonnaires) résultant de la dégradation physico-chimique de la carapace ferrugineuse sous-jacente par les ruissellements hypodermiques, les actions des racines et des termites.

-  Matériau = planique = limono-sableux de 20 à 40 cm d'épaisseur, lavé et blanchi par dégradation de l'argile montmorillonitique sous-jacente développée sur arène sabio-micacée en place (roche pourrie). Présence d'une discontinuité texturale brutale (planosol).
-  Argile montmorillonitique de teinte grise à olive formée au sein de l'arène sabio-micacée (roche pourrie). Niveau imperméable qui maintient fréquemment en charge la nappe phréatique sous le bas-fond
-  Remblaiement colluvio-alluvial brun à grisâtre, tacheté, à dominance argileuse kaolinique
-  Niveau tourbeux, semi-tourbeux ou a hydromor, constamment engorgé
-  Nappe phréatique d'altérée à son niveau le plus bas (étaie).
-  Nappe phréatique d'altérée à son niveau le plus haut
-  Mouvements latéraux de la nappe phréatique en saison des pluies.
-  Écoulements superficiels et hypodermiques de la nappe en saison des pluies.

Nb. par souci de clarté, les épaisseurs relatives des divers matériaux, les dimensions des modèles, les pentes et les dénivellations, n'ont pas été respectées.

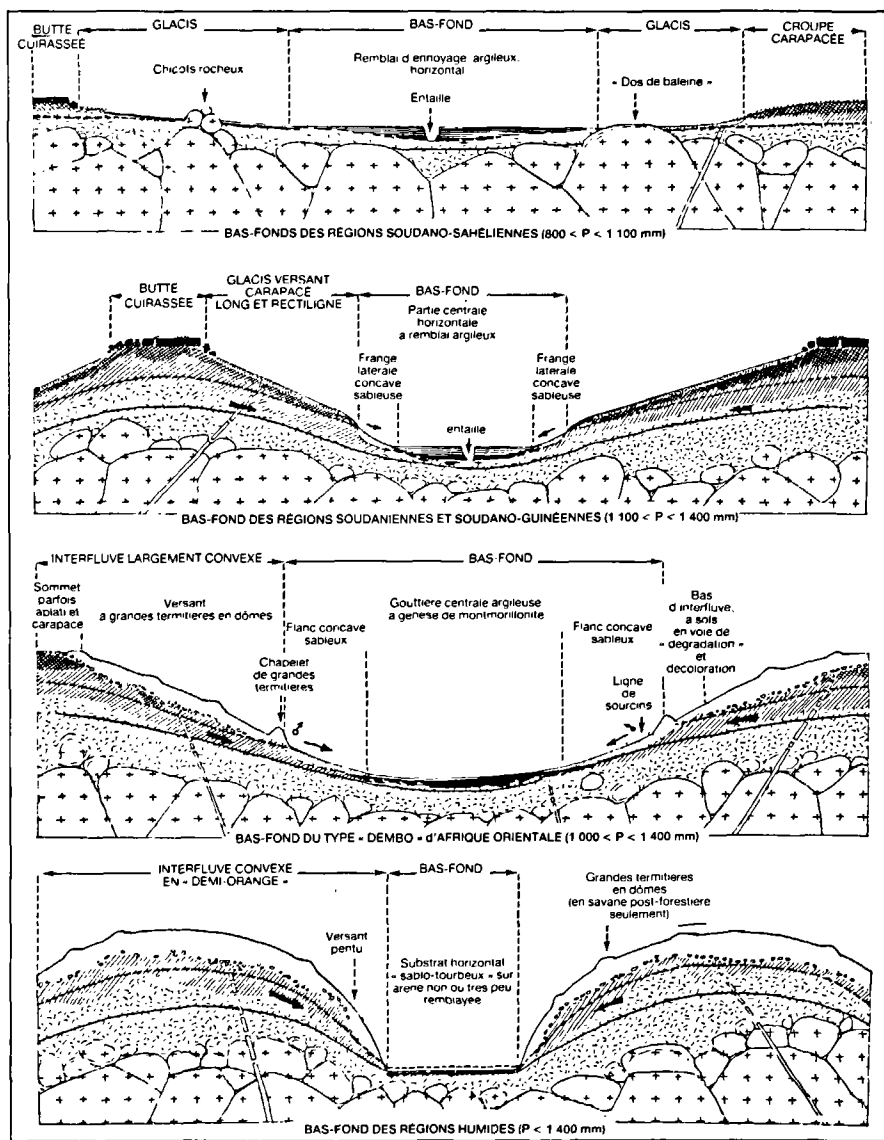


Fig. 2. Les quatre types fondamentaux de bas-fonds africains sur les surfaces d'aplanissement granito-gneissiques
The four basic types of african bottom lands on granitogneissic surfaces of peneplanation

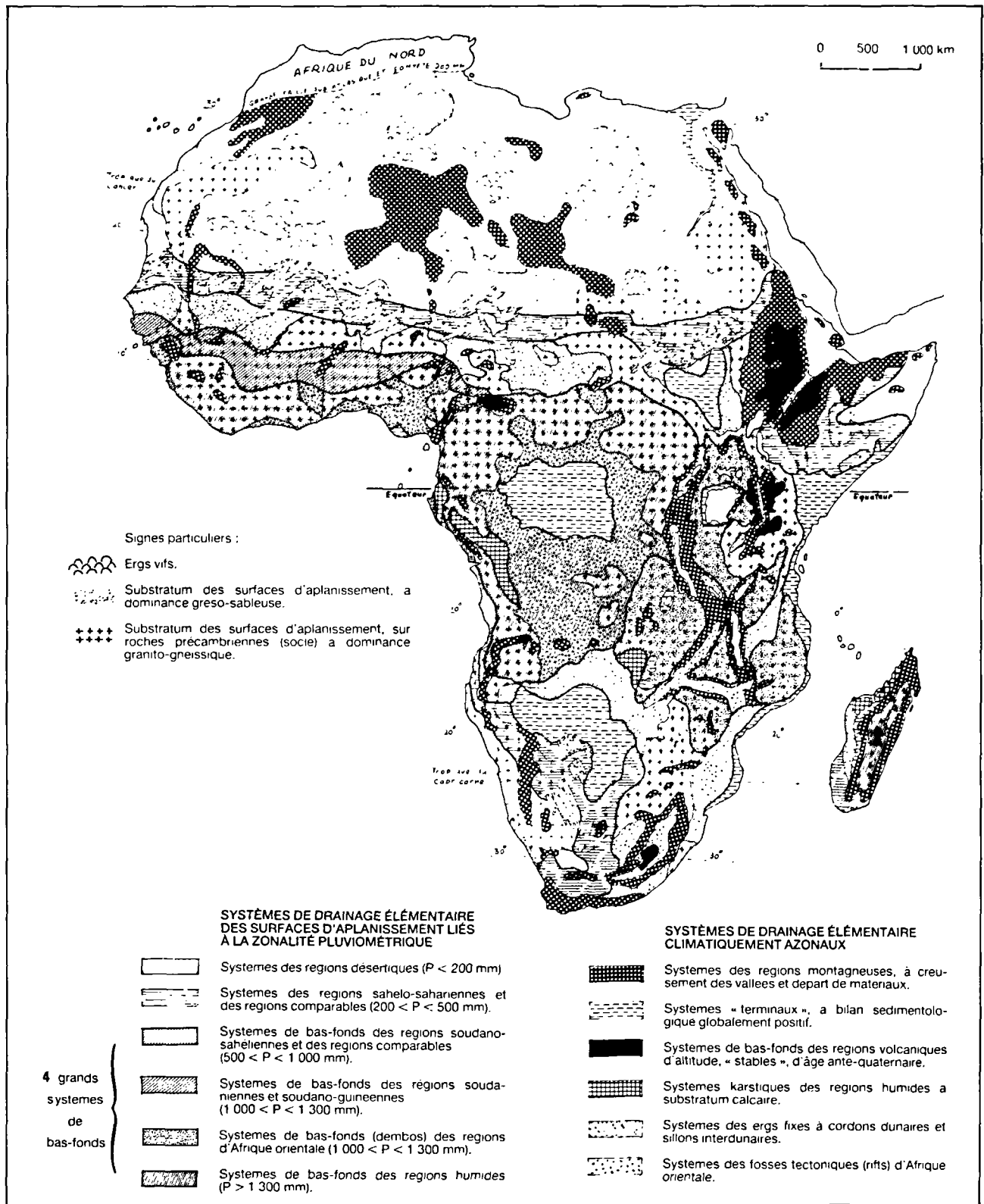


Fig. 3. Les principaux systèmes de drainage élémentaire en Afrique
The main systems of elementary drainage in Africa

ANNEXE XIV

Évaluation de composantes du Milieu naturel par Télédétection spatiale

IRAT-CEGET-IGN

L'utilisation et le traitement des données des trois meilleurs images (entre 1972 et 1982) d'une vaste région (18 700 km²) située dans le N.E. de la Thaïlande (*Sakon-Nakhon ; Udon-Thani*) a permis d'aborder l'étude des milieux agricoles à partir de ses diverses composantes et en s'appuyant sur la comparaison entre diverses périodes : variations saisonnières et modifications profondes d'une région marquée par son ouverture systématique à l'économie marchande au cours d'un long laps de temps (1972-1982).

- Dans une première étape l'établissement d'une spatio-carte, image fausse couleur de la meilleure scène (1976), améliorée et corrigée géométriquement, a permis, après une mission de terrain, de rassembler toutes les observations et mesures nécessaires aux réflexions méthodologiques ultérieures.

- La carte au 1 / 250 000 des états de surface en 1982, améliorée par une comparaison, avec les deux autres dates, a été établie dans une seconde étape. Les états de surface aux trois dates ont constitué le fichier de données nécessaires pour concevoir et déduire dans une troisième étape toutes les cartes thématiques issues de la réflexion méthodologique : évolution de composantes des milieux agricoles au 1 / 500 000 (eau et zones d'inondation, surfaces agricoles, forêts) et variations saisonnières de l'humidité superficielle au 1 / 400 000. De même, la combinaison de plusieurs états de surface a permis de cartographier au 1 / 500 000 les *paysages agro-écologiques* qui sont l'expression cartographique des relations privilégiées existant entre les activités agricoles et le milieu biophysique qui les supporte. Cette dernière carte permet d'avoir une vision plus globale des caractères de cette région agricole. Elle offre aussi une vue précise et documentée pouvant aider toute action de planification et de développement.

Cette étude a aussi mis en lumière, pour cette région, que le morcellement et la complexité dans le détail des paysages agraires, tels qu'ils sont révélés par la carte des états de surface, rendent difficile leur analyse à partir d'images Landsat. On perçoit cette limitation avec la carte de l'évolution des surfaces agricoles dans laquelle les modifications très nuancées des paysages agraires sont difficiles à percevoir parce qu'elles sont trop dispersées et concernent des étendues restreintes. Il faudrait pour accéder à une bonne connaissance de ces phénomènes une meilleure résolution au sol et une plus grande échelle. Le satellite SPOT devrait fournir des données intéressantes à cet égard.

D'autres enseignements méritent d'être soulignés :

- la carte d'évolution des forêts et les tableaux statistiques qui l'accompagnent sont un document de premier ordre que seules les analyses multi-temporelles de télédétection peuvent fournir sur la déforestation ;
- la carte des paysages agro-écologiques montre tout l'intérêt des analyses qui feront l'objet de réflexions méthodologiques poussées. Il faudra peut-être généraliser dans l'avenir ce type de traitement qui permettra une interprétation plus facile par les non spécialistes.

Enfin, il est bien regrettable qu'une image de fin de saison sèche n'ait pas été disponible, car elle aurait permis de cartographier l'état de sécheresse maximum des milieux agricoles, et surtout l'extension des feux de brousse qui sont un facteur important de la dégradation du couvert végétal.

M BRUNEAU, J KILIAN, H LEMEN, G MONGKOLSAWAT - 1986 • IDENTIFICATION ET DYNAMIQUE DES MILIEUX AGRICOLES DANS LE NORD-EST DE LA THAÏLANDE (UDON THANI-SAKON-NAKHON) DONNÉES SATELLITAIRES LANDSAT (1972-1976-1982). SÉRIE CARTOSAT N° 1. TRAVAUX ET DOCUMENTS DE GÉOGRAPHIE TROPICALE, N° 54.

Utilisation des données satellitaires pour le suivi et la dynamique de la végétation pastorale sahélienne dans le Nord Sénégal

IEMVT-INTEGRO

Sur une zone de plus de 400 000 ha, deux fragments d'images Landsat de 1979 et 1980 ont été traités pour évaluer et localiser les pâturages après avoir reçu divers traitements d'amélioration et de corrections géométriques.

A partir des mesures de phytomasses herbacées réalisées sur le terrain en 1979 et 1980, des recherches de corrélations ont été effectuées avec l'indice de végétation normalisé lorsque la végétation présentait un degré de verdeur, et l'indice de brillance dans les cas contraires.

La transformation des valeurs de l'indice de végétation normalisé et des niveaux de brillance en biomasses permet d'établir pour chaque année :

- la cartographie des classes de biomasse herbacée ;
- la production moyenne de chaque classe.

Outre ces résultats sur l'ensemble de la zone, la numérisation des limites des unités de gestion « levées » sur le terrain dans le cadre du programme « Ferlo » (Barral, 1983) a permis d'obtenir les mêmes résultats pour chaque aire de gestion.

Sur l'ensemble de la zone, la production moyenne en 1980 était de 436 kg de MS/ha contre 636 kg en 1979, soit une baisse d'ensemble de plus de 30 %. Cette diminution de la production résulte d'un accroissement des « zones » à très faible recouvrement, celles-ci atteignant 24,7 % de l'espace total en 1980 contre 6 % en 1979.

Cette action de recherche démontre les capacités des données satellitaires Landsat à évaluer et cartographier des classes de biomasse herbacée en fin de saison des pluies en zone sahélienne, à partir d'un réseau de mesures sur le terrain en répondant aux questions fondamentales : « ou » et « combien ».

Cependant, la fiabilité et la précision des résultats obtenus par l'application de telles méthodes doivent être vérifiées, avant toute généralisation, sur de plus vastes régions.

G DE WISPELAERE, L GUYOT, J P POUPARD • 1985 • ÉVOLUTION DE LA DÉSERTIFICATION AU SAHEL LIÉE AUX ACTIVITÉS DE L'HOMME - DONNÉES SATELLITAIRES LANDSAT (1972-1980).

FERTILITÉ DES SOLS ET FERTILISATION

DES CULTURES TROPICALES

L'EXPÉRIENCE DU CIRAD ET DE L'ORSTOM

CHRISTIAN PIERI
CIRAD

ROLAND MOREAU
ORSTOM

P. 69 ■ ÉLARGIR LA NOTION DE FERTILITÉ ■ P. 71 ■ LES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE ET LEURS APPLICATIONS / DES RÉSULTATS PUBLIÉS / UNE MÉTHODOLOGIE ADAPTÉE DU MILIEU D'ÉTUDE / LE DIAGNOSTIC DU MILIEU PHYSIQUE ET LA RECHERCHE DES FACTEURS LIMITANTS DE LA NUTRITION MINÉRALE DES CULTURES EN MILIEU TROPICAL / ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES : LE BILAN HYDRIQUE / DIAGNOSTIC DE TERRAIN - TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES ET ÉTUDES DE MILIEU / CARACTÉRISATION ANALYTIQUE DES SOLS ET IDENTIFICATION DE « VALEURS SEUILS » / CARACTÉRISTIQUES ET CONTRAINTES PHYSIQUES / CARACTÉRISTIQUES ET CONTRAINTES CHIMIQUES / LE ZONAGE DU MILIEU PAR ENQUÊTE SUR LE COMPORTEMENT DE CULTURES TESTS - RÉACTION DE LA PLANTE AU MILIEU / INSUFFISANCES DES DIAGNOSTICS DE MILIEUX PHYSIQUES - NÉCESSITÉ DE L'APPROCHE AGROPHYSIOLOGIQUE / BESOINS EN ENGRAIS, CONTRÔLE DE NUTRITION DES CULTURES ET PROGRAMMATION DES FUMURES / FUMURES DE REDRESSEMENT ET FUMURES D'ENTRETIEN / PALMIER À HUILE : PILOTAGE DES FUMURES PAR DIAGNOSTIC FOLIAIRE / PROGRAMMATION DES FUMURES DES AUTRES CULTURES PAR DIAGNOSTIC SOL, CONTRÔLE PAR DIAGNOSTIC FOLIAIRE / FUMURE ET ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES - VERS UNE STABILISATION DE LA PRODUCTION / ÉVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE / DESTRUCTION DES PROFILS CULTURAUX / ÉROSION / APPAUVRISSEMENT ORGANIQUE ET BILAN AZOTÉ / ACIDIFICATION ET DÉSÉQUILIBRES MINÉRAUX / CONCLUSION GÉNÉRALE ■ P. 84 ■ POTENTIEL DE RECHERCHE / LE POTENTIEL DE RECHERCHE DU CIRAD / LE POTENTIEL DE RECHERCHE DE L'ORSTOM ■ P. 86 ■ PERSPECTIVES ET PRIORITÉS DE RECHERCHE / OBJECTIFS GÉNÉRAUX DES RECHERCHES / PRIORITÉS DE RECHERCHE / ORGANISATION ■ P. 90 ■ BIBLIOGRAPHIE

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : F. 26 240 2x.3

Cpte : A

SOIL FERTILITY AND FERTILIZATION

OF TROPICAL CROPS

THE EXPERIENCE OF CIRAD AND ORSTOM

CHRISTIAN PIERI
CIRAD

ROLAND MOREAU
ORSTOM

P. 69 ■ **THE CONCEPT OF FERTILITY** ■ **P. 71** ■ **RESEARCH RESULTS AND THEIR APPLICATION / PUBLISHED RESULTS / AN ADAPTED METHODOLOGY / PHYSICAL ENVIRONMENT DIAGNOSIS / WATER NUTRITION OF CROPS / TERRAIN DIAGNOSIS / ANALYTICAL CHARACTERIZATION OF SOILS: "THRESHOLD VALUES" / PHYSICAL PROPERTIES AND CONSTRAINTS / CHEMICAL PROPERTIES AND CONSTRAINTS / ZONING USING CROP BEHAVIOR SURVEYS / SHORTCOMINGS OF PHYSICAL ENVIRONMENT DIAGNOSES / FERTILIZER NEEDS, NUTRITION CONTROL AND FERTILIZATION PROGRAMMING / CORRECTIVE FERTILIZERS / FOLIAR DIAGNOSIS / PROGRAMMING OF FERTILIZATION OF OTHER CROPS / FERTILIZATION AND WATER NUTRITION OF CROPS / EVOLUTION OF SOILS UNDER CROPPING / STRUCTURAL BREAKDOWN OF CROPPING PROFILES / EROSION / ORGANIC IMPOVERISHMENT AND NITROGEN BALANCE / ACIDIFICATION AND MINERAL IMBALANCES / GENERAL CONCLUSION** ■ **P. 84** ■ **RESEARCH POTENTIAL / RESEARCH CAPACITY OF CIRAD / RESEARCH CAPACITY OF ORSTOM** ■ **P. 85** ■ **RESEARCH PROSPECTS AND PRIORITIES / GENERAL RESEARCH OBJECTIVES / RESEARCH PRIORITIES / ORGANIZATION** ■ **P. 90** ■ **BIBLIOGRAPHY**

Fertilité des sols et fertilisation des cultures tropicales

L'EXPÉRIENCE DU CIRAD ET DE L'ORSTOM

Depuis plus de 40 ans la France a consacré d'importants moyens à la recherche agronomique tropicale (y compris aux recherches vétérinaires, zootechniques, forestières et piscicoles), à travers le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), qui regroupe désormais les instituts spécialisés, et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, plus connu sous le sigle ORSTOM.

Ces organismes ont toujours attaché une importance particulière à l'évaluation, à l'amélioration ou au maintien de la fertilité des sols, ainsi qu'à la fertilisation des cultures tropicales. L'ORSTOM a principalement porté ses efforts sur l'évaluation des *ressources en terres cultivables* et sur l'évolution de celles-ci après leur mise en culture. Les recherches du CIRAD ont été axées en priorité sur les *techniques d'amélioration et de maintien de la productivité* des agrosystèmes tropicaux dans le cadre d'une agriculture passant d'un système itinérant à un système stabilisé.

L'appréciation des potentialités des milieux tropicaux et de leur aptitude à soutenir une agriculture plus intensive de type familial ou agro-industriel, a conduit le CIRAD et l'ORSTOM à accorder une grande attention à la fertilité de ces milieux, notion dont il convient brièvement de rappeler le sens, dans la conception des pays francophones.

Élargir la notion de fertilité

Le concept de fertilité, qui paraît a priori clair, quand on se réfère à la productivité primaire des écosystèmes naturels, recouvre en réalité des notions variées dès lors que l'on se situe dans la perspective d'une utilisation agricole de ces écosystèmes.

En effet, la fertilité a longtemps été considérée comme une propriété liée essentiellement aux *facteurs chimiques* du sol, assimilé à un réservoir d'éléments minéraux. Une telle approche de la fertilité des milieux naturels par la chimie agricole, historiquement essentielle dans le développement de l'agronomie, a conduit à accréditer l'idée de la « pauvreté » des sols tropicaux, dont les échantillons analysés ne libèrent le plus souvent sous l'action des divers réactifs chimiques, que de faibles quantités d'éléments nutritifs.

Soil fertility and fertilization of tropical crops

THE EXPERIENCE OF CIRAD AND ORSTOM

For more than 40 years France has devoted large resources to tropical agronomic research (including veterinary, animal husbandry, forestry and fishery research) through specialized agencies now grouped together within the Center for International Cooperation in Agronomic Research for Development (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement — CIRAD) as well as the French Institute of Scientific Research for Development in Cooperation, better known under the acronym ORSTOM.

During that time these agencies have devoted special attention to the evaluation, improvement and maintenance of soil fertility and the fertilization of tropical crops.

ORSTOM's work has focused mainly on the evaluation of *cultivable land resources* and the evolution of such land after it has been put under cultivation. CIRAD's research has centered primarily on techniques for improving and maintaining the productivity of tropical agrosystems in a context of transition from an itinerant to a stabilized agriculture.

Assessment of the potential of tropical environments and their ability to sustain a more intensive family-type or agroindustrial agriculture has led CIRAD and ORSTOM to devote a great deal of attention to the fertility of such environments. It is appropriate briefly to recall the meaning of the concept fertility in the context of the francophone countries.

The concept of fertility

The concept of *fertility* would seem *a priori* to be clear when it is used to refer to the primary productivity of natural ecosystems. In reality, however, it covers a number of ideas when used in the context of agricultural utilization of those ecosystems.

Thus, fertility has long been regarded as a property associated essentially with the *chemical factors* of the soil, assimilated to a reservoir of mineral elements. Such an approach to the fertility of natural environments by agricultural chemistry, which has historically been essential in the development of agronomics, has given status to the idea of the "poverty" of tropical soils, analyzed samples of which usually release, under the action of the various chemical reagents, small quantities of nutritive elements.

Cette approche s'est rapidement avérée insuffisante, voire erronée, pour rendre compte de la réalité agricole (comment expliquer qu'en Afrique de l'Ouest les sols sableux, chimiquement pauvres, sont en général les sols les plus cultivés et donc les plus « fertiles » ?), et pour comprendre certains comportements culturaux (celui de la canne à sucre en Côte d'Ivoire ou au Burkina Faso qui produit de plus en plus durablement sur des sols à gravillons latéritiques jugés impropres à la culture !).

En réalité, le « *pouvoir alimentaire* » du sol résulte autant de la richesse chimique de ses constituants que de leurs conditions d'accessibilité par les cultures.

Aussi, la recherche agronomique tropicale française a-t-elle attaché une importance grandissante, d'une part à l'étude des *facteurs physiques* de la fertilité des sols (porosité, compacité, profondeur, états hydriques) qui permettent de délimiter le volume exploitable par les végétaux, et, d'autre part, à l'étude de *l'enracinement* des cultures qui, par sa densité, sa cinétique de croissance, l'environnement physico-chimique particulier qu'il crée à son voisinage (rhizosphère) joue un rôle majeur dans l'absorption et la nutrition minérale des plantes.

Il faut d'ailleurs rappeler que les fondements scientifiques de l'évaluation de la fertilité physique, chimique et biologique des sols ont été, au cours des dernières décennies, profondément enrichis par la prise en compte du rôle central de la *solution du sol*, dans les processus de nutrition minérale des plantes. On sait que les équilibres chimiques sol-solution sont fortement sous la dépendance :

- de la composition chimique et minéralogique mais aussi de l'organisation spatiale des composants minéraux et organiques de la fraction active des sols ; or les sols tropicaux à la différence des sols des régions tempérées, sont dominés par des colloïdes à charge variable qui leur confèrent un comportement physico-chimique spécifique ;
- du régime hydrique auquel sont soumis les profils de sol, régime largement influencé par les cultures et leur mode de conduite.

Ainsi l'appréciation de la fertilité des sols ne peut se résumer à la seule approche Science du Sol. Cette dernière permet de définir des contraintes à la croissance des végétaux (profondeur du sol, carence, etc.) mais pas de prévoir le comportement des cultures et les techniques d'amélioration les plus pertinentes. La fertilité d'un sol ou son pouvoir alimentaire réel, résulte à la fois de *facteurs liés à la plante et d'autres liés au sol*. Ces facteurs sont généralement interdépendants.

Il faut enfin ajouter que la notion de fertilité n'a évidemment de sens qu'en référence à un *contexte socio-économique et historique donné*, qui détermine le champ des interventions techniques possibles. Ainsi, au-delà de la notion de *potentiel* de production végétale défini par le climat d'un milieu physique donné, le concept de fertilité est toujours indissociablement lié aux notions de *coût d'extériorisation* de ce potentiel, et de *risques* (écologique, économique) induits par les techniques d'intensification agricole.

On peut dire, schématiquement, que jusqu'aux années 60 la recherche agronomique tropicale française s'est principalement axée vers la mise au point de techniques permettant d'atteindre le *potentiel de production agricole* des terres, dans des conditions jugées, par les chercheurs, accessibles aux agriculteurs. Mais dès les années 70, les aléas climatiques en Afrique (1972, première année de sécheresse grave) et la crise mondiale de l'énergie, ont conduit progressivement nos organismes ainsi que

That approach quickly proved to be inadequate, and even erroneous, for measuring the realities of an agricultural situation (how to explain that in West Africa the sandy soils, whose chemical content is very low, are generally the ones most cultivated and therefore the most "fertile"?) or to explain certain crop behaviors (that of sugar cane in Ivory Coast and Burkina Faso, which produces more, and more durably, on lateritic gravel soils considered unsuitable for farming!).

The fact is that a soil's "nutritional capacity" owes as much to the chemical richness of its constituents as to the conditions of accessibility of this mineral resource to the crops.

This explains why French tropical agronomic research has devoted increasing attention to (a) study of the *physical factors* of soil fertility (porosity, compacity, depth, water status), which are used to define the volume exploitable by plants, and (b) study of the *root system* of the crops, which by its density, its growth kinetics, and the particular physical-chemical environment it creates in its vicinity (rhizosphere) plays a major role in the plant absorption and mineral nutrition.

It also has to be borne in mind that the scientific basis of evaluation of the physical, chemical and biological fertility of soils has been profoundly enriched over the last few decades by the taking into account of the central role of *soil solution* in the process of mineral nutrition of plants. It is known that soil-solution chemical equilibria are strongly dependent on:

- the chemical and mineralogical composition, but also the spatial organization, of the mineral and organic components of a soil's active fraction; and tropical soils, unlike temperate-region soils, are dominated by variably charged colloids which confer on them a specific physical-chemical behavior;
- the water regime to which the soil profiles are subject, a regime strongly influenced by the crops management.

Thus, the assessment of soil fertility cannot be reduced to simply the Soil Science approach. The latter serves to define constraints on plant growth (soil depth, deficiencies, etc.) but not to predict the behavior of crops and the most appropriate improvement techniques. A soil's fertility or its true nutritive value result both from *factors associated with the plant* and from *other factors associated with the soil*. These factors are usually interdependent.

Finally, it must be added that the concept of fertility obviously has no meaning except by reference to a *given socioeconomic and historical context* which to some degree determines the scope of the possible technical interventions. Thus, beyond the concept of plant production *potential* as defined by the climate of a given physical environment, the concept of fertility is always indissolubly linked to the concepts of *cost of realizing* this potential and or *risks* (ecological, economic) induced by agricultural intensification techniques.

It can be stated schematically that until the 1960s French tropical agronomic research focused mainly on the development of techniques for realizing the agricultural production potential of land under conditions deemed by the researchers to be accessible to the farmers. From the 1970s, however, the climatic hazards in Africa (1972 was the first year of serious drought) and the world energy crisis progressively led our agencies and also the emerging young national institutions, to give priority to techniques for raising farm productivity durably and at lo-

les jeunes institutions nationales émergentes, à privilégier les techniques qui augmentent de façon durable et au moindre coût la productivité des agriculteurs. Or, en Afrique, cette productivité est le plus souvent limitée par la force de travail disponible sur l'exploitation, et non par la terre.

Dans ces conditions, l'agriculteur africain n'est guère motivé pour s'orienter vers des solutions amélioratrices du sol ou même conservatrices, d'autant que les techniques d'intensification le conduisent à prendre, faute de trésorerie, un risque financier qu'il juge inacceptable. Et pourtant se multiplient actuellement en Afrique des situations de saturation foncière rurale, notamment en zone de savanes et dans les régions périurbaines, situations pour lesquelles la lutte contre la dégradation des sols devrait être considérée comme la première des priorités.

Les résultats de la recherche et leurs applications

Des résultats publiés

Il est très difficile de donner un aperçu exhaustif des résultats de la recherche tropicale française portant sur l'amélioration de la fertilité des sols tropicaux et sur la fertilisation des cultures tropicales. Des ouvrages de référence ont été publiés sur ces thèmes par les chercheurs de l'ORSTOM et des Instituts spécialisés par cultures regroupés au sein du CIRAD. Les principaux sont donnés en annexe bibliographique.

Certains de ces ouvrages sont en cours de remise à jour pour y intégrer les nouveaux résultats de recherche qui sont publiés régulièrement dans les revues spécialisées, dont la liste peut être consultée aussi en annexe.

Une méthodologie adaptée du milieu d'étude

Une méthodologie d'ensemble se dégage de ces résultats, dont nous présentons les principaux pour les cultures pérennes, cultures fruitières et les cultures annuelles.

Cette démarche comporte trois phases de recherche assez classiques :

- un *diagnostic de terrain*, pour identifier les contraintes principales du milieu et établir un *zonage* de ce milieu en référence à la culture ou au système de culture dont on veut améliorer les résultats ;
- une *phase expérimentale*, notamment pour l'évaluation des besoins en engrais et amendements permettant de corriger les défauts du sol et de répondre au besoin des cultures ;
- une phase de suivi et de *contrôle de la nutrition* minérale des cultures pour *adapter les fumures*, en prenant en compte l'*évolution des sols* sous culture.

Dans son application cette démarche comporte deux particularités qui en font l'originalité et, semble-t-il, l'efficacité :

- nos travaux reposent en effet sur un réseau d'*expérimentations de longue durée*, suivies annuellement avec soin, depuis parfois plus de 25 ans, doublé d'un réseau d'observations et de *mesures dans le milieu même de la production*. Ce réseau constitue une source d'informations irremplaçables sur le comportement général des cultures

west cost. But in Africa farm productivity is usually limited by the labor force available on the farm, not by the land.

In these circumstances the African farmer is hardly motivated toward soil improvement or even conservation options, particularly since the intensification techniques mean that, for lack of ready cash, he has to take a financial risk which he considers unacceptable. And yet situations of rural land tenure saturation are currently multiplying in Africa, especially in savannah regions and peri-urban areas, and for these situations combating soil degradation ought to be accorded top priority.

Research results and their application

Published results

It is very difficult to give an exhaustive overview of the results of French tropical research on the improvement of tropical soils and the fertilization of tropical crops. Reference works have been published on these topics by the research staff of ORSTOM and the crop specialization institutes within CIRAD. The major references are listed in the appended bibliography.

Some of these works are in process of reissue after updating based on the new research results acquired by these agencies and published regularly in their specialized journals, a list of which is also appended.

An adapted methodology

From all these results taken together an overall methodology emerges. (We propose to present the most significant results with respect to perennial, fruit and annual crops).

This procedure comprises three fairly classical research phases:

- a *terrain diagnosis*, as the basis for identifying the major constraints imposed by the environment and preparing a zoning map of that environment for the crop or cropping system whose results it is desired to improve;
- an *experimental phase*, as the bases for, in particular, assessing the fertilizer and amendment needs in order to correct the defects of the soil and supply the needs of the crop;
- a *crop monitoring and mineral-nutrition control* phase in order to adapt fertilization in light of the *evolution of the soils* under cropping.

The application of this procedure includes two special features to which it owes its originality and, it would appear, its effectiveness:

- our work is based on a *long-duration experimentation* network, carefully monitored at annual intervals, in some cases for more than 25 years already, coupled with a network of observations and measurements in the actual production environment. This network constitutes a source of irreplaceable data on the general behavior of the crops in a tropical environment, the influence of climatic variations (Forest et Reyniers, 1985), the evolution of mineral needs and on the response to fertilizers (mineral and organic), and the evolution of cultivated soils;

en milieu tropical, sur l'influence des variations climatiques (Forest et Reyniers, 1985), sur l'évolution des besoins minéraux et de la réponse aux fertilisants (minéraux et organiques), ainsi que sur l'évolution des sols cultivés ;

- les Instituts du CIRAD sont engagés non seulement dans les structures de recherche nationale mais surtout dans celles de la *production agricole* en zone tropicale. Ce qui se traduit par des actions de conseil et de développement, pour l'agriculture de plantation et dans le cadre de l'agriculture paysanne reposant sur le développement de cultures annuelles textiles, fruitières, oléagineuses et céréalières. De l'Indonésie au Brésil en passant par la Côte d'Ivoire, le Tchad et le Mozambique, plus de 40 pays bénéficient de ces actions.

Grâce à cette approche, les Instituts du CIRAD sont naturellement conduits à privilégier, notamment en matière de fertilisation, les actions techniques qui intègrent les conditions réelles de la production agricole, et non des recommandations basées sur des normes (teneurs minérales des sols, des plantes...) dont on attend abusivement une application généralisée.

Il serait cependant faux de limiter cette méthodologie à une simple approche empirique, car elle se nourrit constamment des résultats des recherches de base développées par l'ORSTOM, l'INRA et la communauté scientifique internationale, recherches auxquelles les instituts du CIRAD apportent aussi une contribution significative.

Le diagnostic du milieu physique et la recherche des facteurs limitants de la nutrition minérale des cultures en milieu tropical

Nous n'évoquerons ici que le diagnostic des facteurs limitants liés au climat et au sol, sans tenir compte des conditions socio-économiques qui influent largement sur la gravité de ces limitations physiques (possibilités d'irrigation, disponibilité en produits fertilisants, existence d'un marché, etc.).

ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES : LE BILAN HYDRIQUE

Dans le domaine climatique des normes ont été établies permettant de définir les conditions de pluviosité, températures, insolation ou rayonnement, favorables au développement des principales cultures. Ces normes très générales peuvent être trouvées dans les ouvrages cités plus haut.

Une importance toute particulière a été accordée à l'évaluation du bilan hydrique sol-plante, indispensable à la conduite de la fertilisation. Différentes méthodes ont été mises en œuvre, telle celle du déficit hydrique mise au point par l'IRHO (Surre, 1968) mais qui n'est valable que dans des conditions de température et de radiations analogues à celles de l'Afrique de l'Ouest. D'autres s'appuient sur la connaissance de l'évapotranspiration potentielle, ETP, modifiée par des coefficients propres aux cultures dont on estime alors l'ETR évapotranspiration réelle (cas des cultures fruitières par exemple). La méthode la plus complète est celle du bilan hydrique simulé, dont le principe a été élaboré en collaboration par l'ORSTOM et l'IRAT (Franquin, Forest), et qui a été perfectionnée dans ses applications aux cultures pluviales par ce dernier institut (Forest et Reyniers, 1985). Cette méthode a le grand avantage d'intégrer des données météorologiques et des paramètres liés aux sols et à la culture (no-

- the CIRAD institutes are involved not only with the national research agencies but also, and even more particularly, in the tropical-zone *agricultural production* agencies. This involvement is reflected in advisory and development activities, not only in plantation agriculture but also in the framework of a small-farmer agriculture based on the development of textile, fruit, oilseed and cereal annual crops. These activities benefit more than 40 countries, from Indonesia to Brazil, via Ivory Coast, Chad and Mozambique.

This approach naturally leads the CIRAD institutes to give preference to technical activities, in the area of fertilization in particular, that integrate the actual conditions of agricultural production, in contrast to recommendations based on norms (mineral content of soils, of plants, etc.) that are wrongly expected to have general validity.

Nevertheless, it would be wrong to limit this methodology to a simple empirical approach, since it is continually nourished by the results of the basic research projects developed by ORSTOM, INRA and the international scientific community, projects to which CIRAD institutes also make a significant contribution.

Physical environment diagnosis and research into tropical-environment constraints on mineral nutrition of plants

We shall discuss here only the diagnostic study of the limiting factors associated with climate and soil, without explicit reference to the socioeconomic conditions that greatly influence the seriousness of these physical constraints (irrigation feasibility, availability of fertilizer products, existence of a market, and so on).

WATER NUTRITION OF CROPS

Climatic norms have been established defining the rainfall, temperature, insolation and radiation conditions favorable to the development of the principal crops. These norms, which are very general, will be found in the works cited above.

Many studies have been done on the satisfaction of crop water needs. They are presented in another document.

In view of the importance of these studies for fertilization practice, very special importance has been assigned to evaluating the "soil-plant" water balance, using a number of different methods. Some of these are very simple to apply, such as the water deficit method developed by IRHO (Surre, 1968), which is only valid, however, under temperature and radiation conditions similar to those of West Africa. Others are based on knowledge of potential evapotranspiration (PET), modified by coefficients specific to particular crops, whose real evapotranspiration (RET) is then estimated (as in the case of fruit crops, for example). The most complete method is the simulated water balance method, the principle of which was developed collaboratively by ORSTOM and IRAT (Franquin, Forest) and whose application to rainfed crops was perfected by IRAT (Forest and Reyniers, 1985). This method has the great advantage that it integrates meteorological data and soil and crop-linked parameters (concept of root usable reserve). It owes its existence to terrain measurements made over a period of more than ten years in the agronomic research stations of West Africa (Dancette). This water balance model is operational for a number of crops

tion de réserve utile racinaire), ce qui a été possible grâce aux mesures de terrain faites pendant plus de dix ans dans les stations de recherche agronomique d'Afrique de l'Ouest (Dancette). Ce modèle de bilan hydrique, opérationnel pour plusieurs cultures (céréales, arachide, canne à sucre), connaît un réel succès. C'est ainsi qu'au Brésil il est désormais largement utilisé pour procéder au zonage des savanes humides tropicales (« cerrados ») pour leur aptitude à la culture du riz pluvial (Steinmetz, 1985).

DIAGNOSTIC DE TERRAIN : TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES ET ÉTUDES DE MILIEU

Le diagnostic des terrains et des sols est régulièrement réalisé par les chercheurs de l'ORSTOM et du CIRAD, qui possèdent une longue expérience dans ce domaine.

Selon le niveau d'échelle considéré, on distingue deux catégories de travaux cartographiques et d'études sur le milieu :

- aux échelles moyennes et petites (1 / 50 000 à 1 / 1 000 000), ce sont des travaux d'étude générale et d'inventaire. La caractérisation des sols y est cependant le plus souvent accompagnée de considérations sur leurs possibilités d'utilisation.

Des documents cartographiques existent pour plus de 15 pays (partiellement ou totalement couverts), principalement, mais non exclusivement, en Afrique. Dans plusieurs cas, des informations complémentaires sur les potentialités culturelles font l'objet de documents particuliers (cartes, tableaux, notices...) par exemple : Burkina Faso (1 / 50 000), Ethiopie (1 / 100 000), Haute vallée de la Volta Noire (1 / 100 000) etc. ;

- aux grandes échelles, il s'agit de travaux réalisés pour des objectifs de mise en valeur spécifiques :

- installation de paysannats, défrichement, front pionnier : arachide au Sénégal, cotonnier au Cameroun... ;

- implantation de périmètres sucriers : Kenya, Tchad, Côte d'Ivoire ;

- grande hydraulique et mise en valeur régionale : Maroc (1959-1965) ; (1970-1973), Sénégal (1957, 1981), delta central du Niger au Mali (1954), région de Banfora au Burkina Faso (1967), Benoué au Cameroun (1976), Vallée du Sénégal (1966-1970), désert du Sarir-Libye, etc. ;

- petite hydraulique : campagnes 1960-1964 pour des barrages en terre au Sahel (Mauritanie, Burkina Faso, Niger), cartes des sols irrigables du Maghreb, du Sahel, de la Côte d'Afrique Occidentale, aménagement de périmètres hydro-agricoles (Niger, Arabie saoudite, Algérie) ;

- travaux associés à des projets de conservation des sols, par exemple dans les aires d'agriculture montagnarde (Maghreb, Cameroun, Equateur...), à des constitutions de réserve.

D'une manière générale, la conception des études pédologiques pour la mise en valeur agricole des terres a été progressivement adaptée pour mieux prendre en compte l'ensemble des contraintes liées à la nature et aux propriétés des sols, mais aussi à l'accessibilité des zones cultivables, aux formes de modelé et à leur dynamique (sensibilité à l'érosion) en conditions de culture (Bertrand et al., 1985 ; Nguyen Hugo Van ; J. Olivin et R. Ochs, 1984).

Signalons enfin que les agronomes du CIRAD, de l'ORSTOM, et leurs partenaires considèrent qu'il ne faut pas négliger les indications que certaines classifications vernaculaires apportent sur le comportement agronomique général des sols, et sur leur pouvoir alimentaire en particulier (cas notamment de la classification vernaculaire en

(cereals, groundnuts, sugar cane) and is proving very successful. Thus, in Brazil it is now being widely used for zoning of that country's tropical moist savannahs (*cerrados*) by reference to suitability for rainfed rice cultivation (Steinmetz, 1985).

TERRAIN DIAGNOSIS

Terrain and soil diagnosis studies are regularly carried out by ORSTOM and CIRAD researchers, who possess long experience in this field.

Two categories of mapping projects and environmental studies are distinguished, depending on the scale used:

- small and medium scale (1:50,000 through 1:1,000,000)

- these are general and inventory-type studies in which, however, the soil descriptions are usually accompanied by considerations concerning soil utilization possibilities;

- mapping documentation exists for more than 15 countries (whole or partial coverage), most (but not all) located in Africa. In a number of cases deriving from this work supplemental information on crop potential is given in special documents (maps, tables, bulletins, etc.). Examples: Burkina Faso (1:50,000), Ethiopia (1:100,000), Upper Valley of the Volta Noire (1:100,000).

- Large scale

- these are studies performed for specific land development purposes:

- settlement of farming communities, land clearance, breaking new ground: groundnuts in Senegal, cotton in Cameroon;

- installation of sugar project zones: Kenya, Chad, Ivory Coast;

- large water works and regional development projects: Morocco (1959-65, 1970-73), Senegal (1957, 1981), central delta of the Niger River in Mali (1954), Banfora region in Burkina Faso (1967), Benoué in Cameroon (1976), Senegal Valley (1966-70), Sarir desert in Libya, etc.;

- small water projects: 1960-64 earth dam programs in the Sahel (Mauritania, Burkina Faso, Niger), irrigable soil mapping (Maghreb, Sahel, West African coast), water and agriculture development zones (Niger, Saudi Arabia, Algeria);

- studies associated with soil conservation projects, e.g. in highland agriculture areas (Maghreb, Cameroon, Ecuador, etc.), with the build-up of reserves, and so on.

Generally speaking, the design of soil studies tailored to the agricultural development of land has been progressively adapted to take better account of all the constraints associated with soil nature and properties but also with the accessibility of the cultivable areas, topographic types, and dynamics (erosion sensitivity) under cropping conditions (Kilian, Bertrand, Raunet, Nguyen, Hugovan, J. Olivin and R. Ochs).

Finally, CIRAD and ORSTOM agronomists and their colleagues consider that it would be wrong to ignore the indications contributed by certain vernacular classifications concerning the agronomic behavior of soils in general and their nutritive capacity in particular (a notable example is the vernacular classification in the bambara country in Mali, which takes into account the properties of texture, organic richness, and even depth and water regime).

ANALYTICAL CHARACTERIZATION OF SOILS AND IDENTIFICATION OF "THRESHOLD VALUES"

A great many studies have been done by ORSTOM and

pays bambara au Mali, qui prend en compte les caractères de texture, de richesse organique, voire de profondeur et de régime hydrique).

CARACTÉRISATION ANALYTIQUE DES SOLS ET IDENTIFICATION DE « VALEURS SEUILS »

Les spécialistes de Science du sol de l'ORSTOM ont réalisé de très nombreux travaux sur les principaux types de sols tropicaux : ferrallitiques, fersiallitiques, hydromorphes, isohumiques, salsodiques, vertisols et plus récemment andosols, pour établir des relations entre les caractères du sol et la production végétale, afin de définir des « valeurs seuils » pour plusieurs paramètres.

Plusieurs documents de synthèse ont été rédigés sur ce thème par les pédologues de l'ORSTOM : sur un plan général à l'échelle des sols de la zone intertropicale (Boyer, 1970; Dabin, 1961, 1970), à l'échelle d'une région (cuvette tchadienne : Dabin 1969) ou d'une station (Séfa en Casamance : Cointepas, 1960 ; Niari au Congo : Martin, 1970), soit sous des aspects plus particuliers touchant à une catégorie de sol (sols ferrallitiques : Boyer, 1978 ; sulfate d'ammoniaque : Dugain, 1959), à un type de culture (coton au Nord Cameroun : Fritz et Vallerie, 1971 ; caféier en RCA : Forestier, 1960 ; caoyer : Verlière, 1981).

• Caractéristiques et contraintes physiques

Les travaux ORSTOM et CIRAD ont porté sur :

- la différenciation du profil cultural (limites d'horizon, présence de gravillons, induration... (Aubert et Moulinier, 1954 et de nombreux pédologues ORSTOM depuis) et son évolution en conditions de culture traditionnelle ou améliorée (Charreau et Nicou, 1971) ;
- la recherche des caractéristiques texturales les plus favorables aux cultures de sorgho (Sénégal), arachide (Congo), bananier (Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée), riz irrigué (Mali) ;
- la porosité et la densité des sols, en liaison avec le développement racinaire (céréales, arachide, riz pluvial, cotonnier en zones de savane, ananas, palmier à huile, etc. en zone tropicale humide).

On en retiendra notamment pour les sols à horizon de surface sableux qui sont les plus fréquents en Afrique de l'Ouest :

- leur sensibilité à la *prise en masse* qui empêche leur préparation mécanique (labour) en dehors de la saison humide (Sénégal, Burkina Faso, Côte d'Ivoire) ;
- leur *porosité naturelle moyenne à faible*, voisine de 40 % qui est le seuil en deçà duquel l'enracinement est réduit (travaux IRAT et ORSTOM) ;
- leur *perméabilité faible*, si on la compare notamment à celles de sols comparables d'Amérique du Sud (Leprun, 1985) ;
- leur sensibilité à la compaction, au litage et en définitive au ruissellement.

• Caractéristiques et contraintes chimiques

Les recherches dans ce domaine ont été abondantes. L'ORSTOM a défini des seuils de déficience minérale pour les principaux types de sol (carences absolues). L'importance des équilibres chimiques entre nutriments a été aussi mise en lumière (carences relatives). Les valeurs critiques des principaux rapports minéraux ont été précisées, et des échelles de fertilité ont été également proposées.

– Carence en azote :

La majorité des sols tropicaux paraissent carencés en azote. Les chercheurs ont observé une relation linéaire entre rendements céréaliers et teneurs en N total des sols

CIRAD soil science experts to establish relationships between soil characteristics and plant production, with a view to defining "threshold values" for a number of parameters.

Such work has been done on the principal types of tropical soils: ferrallitic, fersiallitic, hydromorphic, isohumic, salsodic, vertisols and, more recently, andosols.

A number of summarizing documents on this topic have been prepared by ORSTOM pedologists. Some of these are of general nature, on the scale of intertropical zone soils (Boyer, 1970; Dabin, 1961, 1970), of a region (Tchadien Depression: Dabin, 1969) or of a station (Séfa in Casamance: Cointepas 1960; Niari in the Congo: Martin, 1970). Others are more specific in terms either of soil category (ferrallitic soils: Boyer, 1978; ammonium sulphate: Dugain, 1959), or of crop type (cotton in Northern Cameroon: Fritz and Vallerie, 1971; coffee in Central African Republic: Forestier, 1960; cocoa: Verlière, 1981).

• Physical properties and constraints

The ORSTOM and CIRAD studies have related to the following topics:

- crop profile differentiation (horizon boundaries, presence of gravel, induration, etc.) (Aubert and Moulinier, 1954, and numerous ORSTOM pedologists since then) and its evolution under traditional or improved cropping conditions (Charrau and Nico, 1971);
- research into the most favorable texture characteristics for sorghum (Senegal), groundnuts (Congo), bananas (Cameroon, Ivory Coast, Guinea) and irrigated rice (Mali);
- soil porosity and density in liaison with root development (cereals, groundnuts, rainfed rice, cotton in savannah areas, pineapples, oil-palm, etc. in the moist tropical zone).

The following will be taken into account, in particular, for the soils of sandy surface horizon, which are the commonest soils in West Africa:

- their *sensitivity to coagulation*, which prevents their mechanical preparation (tilling) outside the wet season (Senegal, Burkina Faso, Ivory Coast);
- their *medium to low natural porosity*, close to 40 %; which is the threshold below which root development is reduced (IRAT and ORSTOM studies);
- their *low permeability* compared to, for example, comparable soils of South America (Leprun, 1985);
- their sensitivity to compaction, bedding and, finally, runoff.

• Chemical properties and constraints

Abundant research has been done in this field. ORSTOM has defined mineral deficiency thresholds for the principal soil types (absolute deficiencies). The importance of chemical equilibria between nutrients has also been elucidated (relative deficiencies). The critical values of the principal mineral relationships have been defined, and fertility scales have also been proposed.

– *Nitrogen*

Most tropical soils appear to be deficient in nitrogen, and researchers have observed a linear relationship between cereal yield and total N content of the soils of the African semiarid zone, the latter being below 0.1 % (total N).

A soil fertility scale by reference to N availability was established as a function of pH by ORSTOM (Dabin) in 1961 for the whole of the soils of West Africa.

Many studies, conducted in (for example) Senegal, Cameroon and Ivory Coast, have analyzed nitrogen dynamics in tropical soils in conjunction with rainy season phase,

de la zone semi-aride africaine, dès lors que celles-ci sont inférieures à 0,1 % (N total).

Une échelle de fertilité des sols à l'égard de leur disponibilité en N a été établie en fonction du pH en 1961 par l'ORSTOM (Dabin) pour l'ensemble des sols de l'Afrique occidentale.

De nombreux travaux conduits notamment au Sénégal, au Cameroun, en Côte d'Ivoire, ont analysé la dynamique de l'azote dans les sols tropicaux, en liaison avec les phases de la saison des pluies, les systèmes de culture et les apports organiques.

L'évolution sous culture du statut azoté du sol fait également l'objet de recherches soutenues. Les travaux plus particuliers de l'IRAT sur les formes de N dans les sols (N minéral et organique extrait par un réactif salin), ont montré qu'il était possible de mieux apprécier le pouvoir alimentaire azoté des sols tropicaux, notamment vis-à-vis des céréales (Velly, Pichot et al.).

— Méthodes de dosage du phosphore :

Les carences en phosphore de nombreux sols tropicaux ont fait l'objet d'abondants travaux.

Les méthodes de dosage en phosphore assimilable utilisées pour les sols tempérés se sont avérées inadaptées. Aussi l'ORSTOM a-t-il proposé une adaptation intéressante de la méthode Olsen (méthode Olsen-Dabin 1967).

Plus récemment le CIRAD, en liaison avec l'IMPHOS a comparé toutes les méthodes utilisées à ce jour (y compris celles utilisant 32P, des résines échangeuses d'ions, etc.). On a ainsi abouti à un classement des sols à l'égard de leur disponibilité en P et de leurs besoins en engrais phosphoriques (Imphos-Gerdat).

— Potassium, bases échangeables, pH : les teneurs seuils sont difficiles à établir.

Quelques normes à portée générale sont proposées par l'ORSTOM fixant des niveaux de carence absolue ou relative pour K, Ca, et Mg (d'après Aubert et Moulinier, 1954 les sols sont carencés en potassium lorsque $K \text{ éch} < 0,1 \text{ mé} / 100 \text{ g}$ ou bien lorsque $K \text{ éch} 2 \%$ de la somme des bases échangeables (Dabin, 1961).)

En réalité ces seuils doivent être revus en fonction des sites et des cultures, ce qui a été fait par les 2 organismes (sur le caféier en RCA, sur le cacaoyer en Côte d'Ivoire, sur le riz et diverses plantes à Madagascar, sur le palmier à huile, etc.).

Des travaux semblables ont eu lieu sur les relations entre teneurs en Aluminium et/ou Manganèse échangeable et manifestations de toxicité sur les cultures (riz à Madagascar, arachide et mil pennisetum au Sénégal, arachide au Congo).

Signalons enfin qu'en l'absence de laboratoire d'analyses, la détection des carences (en P, K, Mg et divers oligo-éléments) par le test biologique mis au point à l'IRAT (Chaminade, 1965) s'est avéré pratique d'emploi et assez précis. Il ne peut cependant donner d'indications valables pour les éléments tels que N et S dont la dynamique est régie par des processus microbiologiques fortement perturbés dans les conditions de réalisation du test (milieu confiné, forte densité racinaire de la plante test).

D'une manière générale, on peut constater que ces teneurs seuils sont assez précises lorsqu'elles se réfèrent à des sols de type ferrallitiques ou à des milieux dans lesquels la contrainte hydrique n'est par forte (ex : sols du delta central du Niger, Dabin...).

Il n'en va plus de même dans les sols à dominante sableuse de la zone semi-aride Ouest-africaine où les contraintes majeures sont d'abord liées aux propriétés

cropping system and organic dressings.

Sustained research has also been on the evolution of the nitrogen status of soils under cropping. More specific studies by IRAT concerning the forms of N in the soil (mineral and organic N extracted by a saline reagent) have shown that the nitrogen nutritive value of tropical soils can be evaluated better, particularly in relation to cereals (Velly, Pichot et al.).

— Phosphorous

A very large number of studies have been done on phosphorous, an element in which many tropical soils are deficient.

ORSTOM has proposed an interesting adaptation of the Olsen method (Olsen-Dabin method, 1967).

More recently, CIRAD and IMPHOS jointly performed a comparison of all the methods currently used (including those using 32P, ion exchange resins, etc.). The outcome was a soil classification based on P availability and phosphoric fertilizer needs (Imphos-Gerdat).

— Potassium, exchangeable bases, pH

ORSTOM has proposed a few norms of general scope setting absolute or relative deficiency levels for K, Ca and Mg: according to Aubert and Moulinier, 1954, soils are deficient in potassium when $K \text{ exch} < 0,1 \text{ me} / 100 \text{ g}$ or else when $K \text{ exch} < 2 \%$ of the sum of the exchangeable bases (Dabin, 1961).

In practice these thresholds are often revised to take account of sites and crops. Both CIRAD and ORSTOM have done work on this topic (coffee in Central African Republic, cocoa in Côte d'Ivoire, rice and miscellaneous plants in Madagascar, oil-palm, etc.).

Similar work has been done on the relationships between exchangeable aluminium and/or manganese and toxicity manifestations on crops (rice in Madagascar, groundnuts and mil pennisetum in Senegal, groundnuts in Congo).

Finally, in the absence of laboratory analyses, the detection of deficiencies (in P, K, Mg and various oligo-elements) by means of the biological test developed at IRAT (Chaminade, 1965) has proved to be usable in practice and fairly precise. However, it cannot give valid indications for elements such as N and S, whose dynamics are governed by microbiological processes that are greatly disrupted under the test conditions (confined environment, heavy root density of the test plant).

Generally speaking, it can be stated that these threshold values are fairly precise when they relate to ferrallitic soils or to environments in which the water constraint is not great (e.g. soils of the central delta of the Niger, Dabin, etc.).

The same cannot be said of the sandy dominant soils of the West African semiarid zone, where the major constraints are associated primarily with the physical and water properties of the soils. The chemical indices that it has been possible to propose (Bouyer) are then valid only in the locality where they were determined.

ENVIRONMENTAL ZONING USING TEST CROP BEHAVIOR SURVEYS

In the case of zones already under crops, CIRAD combines the soil limiting factors characterization approach with the *crop behavior* survey methods (facies, root development, yield, foliar diagnosis) and of the impact of current cropping practices, so as to obtain a more comprehensive diagnosis of the constraints on improving land productivity and on mineral nutrition of the crops.

physiques et hydriques des sols. Les indices chimiques proposés (Bouyer) n'ont alors de valeur que dans le lieu de leur établissement.

LE ZONAGE DU MILIEU PAR ENQUÊTE SUR LE COMPORTEMENT DE CULTURES TESTS : RÉACTION DE LA PLANTE AU MILIEU

Dans le cas de zones déjà mises en culture, le CIRAD associe l'approche de caractérisation des facteurs limitants des sols, aux méthodes d'enquête sur le *comportement des cultures* (faciès, enracinement, DF) et sur l'impact des pratiques culturales actuelles, pour obtenir un diagnostic plus global des contraintes à l'amélioration de la productivité des terres et à la nutrition minérale des cultures.

C'est ainsi qu'en zone bananière camerounaise, l'IRFA (Delvaux et al.) a pu identifier, par enquête, cinq zones pédo-agronomiques dans un périmètre de 5 500 ha. Chaque zone regroupe des ensembles sol-plante suffisamment homogènes (caractéristiques des sols et comportement ; statut nutritionnel des bananiers), pour justifier d'une programmation de fumure particulière.

De même en zone cotonnière l'IRAT et l'IRCT montrent qu'une relation étroite existe entre, d'une part le modelé des terrains cultivés, les techniques culturales et le développement d'érosion laminaire, et d'autre part le mauvais *enracinement* de cotonniers qui manifestent des symptômes de toxicité aluminique et de déficience potassique (Ange, 1984).

Que ce soit pour le zonage climatique ou le zonage agropédologique la *réaction de la plante au milieu* reste donc dans l'approche du CIRAD, comme de l'ORSTOM, le *critère de différenciation de plus haut niveau*, avec en pratique une attention toute particulière portée à l'observation et à la mesure du développement, de la morphologie et de la densité de l'enracinement (Chopart, 1980).

INSUFFISANCES DES DIAGNOSTICS DE MILIEUX PHYSIQUES : NÉCESSITÉ DE L'APPROCHE AGROPHYSIOLOGIQUE

Ces diagnostics permettent d'identifier des contraintes, d'orienter dans une certaine mesure les expérimentations, mais rarement d'aller jusqu'à la proposition technique précise, c'est-à-dire jusqu'à la programmation de fumure pour rester dans le cadre du sujet traité.

La méthode du « diagnostic sol » mise au point par l'IRCC (Jadin, 1975 ; Jadin et Snoeck, 1985) en basse Côte d'Ivoire est peut-être une exception. Les besoins en engrais sont en effet calculés de façon à obtenir dans l'horizon de surface des sols, des équilibres minéraux s'avérant expérimentalement les plus favorables à la croissance et à la production des cacaoyers.

Ces équilibres sont les suivants :

- * N total / P total : 1,5 à 2,0 avec une teneur en P ass (méthode Dyer) voisine de 0,04 % ;
- * K - Ca - Mg, dans le rapport 8 %, 68 %, 24 % de leur somme, et ce pour une saturation en bases de la capacité d'échange cationique (mesurée à pH 7) égale ou supérieure à 60 %.

Dans la plupart des cas, cette approche « *milieu physique* » est insuffisante car elle ne prend en compte ni l'extrême diversité des situations agricoles ni la faible marge de manœuvre dont dispose la majorité des agriculteurs des pays en voie de développement.

Pour répondre à la fois à cette diversité propre aux milieux peu artificialisés, ainsi qu'à cette précarité de situation, l'approche « *agrophysiologique* » (connaissance

Thus, in the banana areas of Cameroon IRFA (Delroux et al.) has been able to identify by survey five pedo-agronomic zones within a perimeter of 5,500 ha. Each zone groups together soil-plant sets that are sufficiently homogeneous in terms of soil properties and banana-tree behavior (nutritional status) to justify a special fertilization program.

Similarly, in the cotton areas IRAT and IRCT have shown that a close relationship exists between (a) the topography of the lands cultivated, the cultivation techniques used and the development of sheet erosion and (b) the poor *root development* of the cotton trees, which exhibit symptoms of aluminum toxicity and potassium deficiency (Ange, 1984).

Thus, in CIRAD's approach, as in that of ORSTOM, whether it be for purposes of climatic zoning or of agropedological zoning, the *reaction of the plant to the environment* remains the *highest level criterion for differentiation*, with in practice very special attention to observation and measurement of development, morphology and rooting density (Chopart, 1980).

SHORTCOMINGS OF PHYSICAL ENVIRONMENT DIAGNOSES

Such diagnostic studies make it possible to identify constraints and to orient experimentation up to a point, but rarely to go so far as to propose a precise technique, i.e. — to remain within the topic under discussion — to establish a fertilization program.

The "soil diagnosis" method developed by IRCC (Jadin, 1975; Jadin and Snoeck, 1985) in the Lower Ivory Coast is perhaps an exception. Fertilizer needs are in fact calculated so as to obtain mineral balances in the surface horizon of the soil that have been shown experimentally to be the most favorable to cocoa-tree growth and production.

These balances are the following:

- * Total N/total P: 1.5-2.0 with a P content (Dyer method) close to 0.04 %
- * K - Ca - Mg, in the ratio 8-68-24 % of their total, and this for a base saturation of cation exchange capacity (measured at pH 7) equal to or greater than 60 %.

In most cases this "*physical environment*" approach is inadequate, since it fails to take into account either the extreme diversity of farming situations or the low room for manœuvre of most developing-country farmers.

To respond both to this diversity inherent in environments that have undergone little artificial conversion and to this precarity of situation, the "*agrophysiological approach*" of crop functioning (knowledge of the mechanisms by which crops adapt physiologically to their physical environment) is an indispensable complement to identification of the true constraints of the environment and to optimizing amending actions.

Thus, knowledge of a crop's sensitive phases to a stress condition can lead to substantial savings in the improvement techniques to be proposed. An example is afforded by the behavior of soya in an acid soil, which exhibits sensitivity to the aluminum ion only in the very early stage of infection of the roots by *rhizobium japonicum*. In Madagascar, simple dressing of seeds with 40 kg/ha of dolomite, making the toxic aluminum insoluble in the immediate vicinity of the seeds for about ten days, has the same yield-improvement effect as classical liming with 4 tons/ha (Samson, 1986).

This detailed knowledge of the functioning of a crop can thus lead to the development of a true alerting sys-

des mécanismes de l'adaptation physiologique des cultures à leur environnement physique) du fonctionnement des cultures est un complément indispensable à l'identification des vraies contraintes du milieu et à l'optimisation des interventions.

Ainsi, la connaissance des phases sensibles d'une culture à une condition de stress peut entraîner de substantielles économies dans les techniques d'amélioration à proposer. Tel est le cas du comportement du soja en sol acide, qui ne manifeste de sensibilité à l'ion aluminium qu'au stade très précoce d'infection des racines par le *rhizobium japonicum*. A Madagascar, un simple enrobage de semences avec 40 kg/ha de dolomie, insolubilisant l'aluminium toxique au voisinage immédiat des graines pendant une dizaine de jours, a le même effet améliorateur du rendement que le chaulage classique à 4 t/ha (Samson, 1986).

Cette connaissance détaillée du fonctionnement d'une culture peut aussi déboucher sur un véritable système d'avertissement aux interventions, comme l'IRFA l'a réalisé pour la protection phytosanitaire des bananiers aux Antilles (Ganry, 1978) et bientôt pour leur fertilisation.

Cette approche agrophysiologique s'appuie sur l'étude en milieu contrôlé et en *expérimentation au champ* du comportement des cultures, expérimentation par ailleurs indispensable dans tous milieux physiques pour tester les innovations (espèces ou techniques nouvelles).

Ces deux approches complémentaires atteignent leur pleine efficacité lorsqu'elles sont enrichies par l'inventaire et la compréhension *des pratiques paysannes* qui débouchent sur une simplification de la diversité des situations agricoles grâce à une *typologie des exploitations*, telle qu'elle a été réalisée au Sénégal (Benoit-Cattin, 1977) au Burkina Faso (Billaz, Dugue), au Cameroun (Leplaideur), au Brésil (Seguy), etc.

Besoins en engrais, contrôle de nutrition des cultures et programmation des fumures

FUMURES DE REDRESSEMENT ET FUMURES D'ENTRETIEN

La mise au point des fumures correctives des sols, afin de satisfaire les besoins minéraux des cultures, a donné lieu par le passé à de très nombreuses expérimentations basées sur le principe de la courbe de réponse à un élément (les autres étant apportés en abondance) ou sur celui de l'élément manquant (dispositif expérimental fréquemment utilisé par l'IRCT en culture cotonnière).

Dans le cas des sols ferrallitiques désaturés (oxisols) de Madagascar et d'Afrique, par des essais simples de courbe de réponse au champ et cultures annuelles (maïs, riz...) à des éléments minéraux déficients (détectés par le test biologique en vase de végétation), l'IRAT a montré qu'il était possible d'établir en 2 ou 3 ans les bases d'une fertilisation. Celle-ci comprend une fumure corrective de carences minérales des sols, dite fumure de redressement, et une fumure dite d'entretien qui permet de satisfaire aux besoins des cultures tout en maintenant le sol dans son état « corrigé » (Chaminade 1965, 1971).

L'IRHO procède selon le même principe (Ollagnier et Ochs 1977, 1981) pour les cultures pérennes afin d'identifier et de corriger les carences minérales : carence en potassium très fréquente sur palmier à huile et cocotier en Afrique de l'Ouest, en Phosphore dans le bassin amazonien, en N, P et Mg, à Sumatra,...

tem for amending actions, of the kind that IRFA has been able to create for plant-health protection of banana trees in the Antilles (Ganry, 1978) and will soon create for their fertilization.

This agrophysiological approach is based on study in a controlled environment and in *field experimentation* of crop behavior, experimentation which is in fact indispensable in all physical environments for testing innovations (whether new species or new techniques).

These two complementary approaches achieve their full efficacy when they are enriched by an inventory and an understanding of *small farmer practices* and consequent simplification of the diversity of farming situations by means of *farming typology*, as has been done in Senegal (Tourte, Ange), Burkina Faso (Billaz, Dugue), Cameroon (Leplaideur), Brazil (Seguy), etc.

Fertilizer needs, nutrition control of crops and fertilization programming

CORRECTIVE FERTILIZERS

The development of fertilizers that correct soils so that they meet the mineral needs of crops has been the subject of a great deal of experimentation in the past, based on the principle of the curve of response to a particular element (the others being contributed in abundance) or that of the lacking element (an experimental device frequently used by IRCT in cotton-growing).

IRAT has shown that, in the case of the desaturated ferrallitic soils (oxisols) of Madagascar and Africa, it is possible, by means of simple field tests of the response curve of annual crops (maize, rice, etc.) to deficient mineral elements detected by the vegetation pot biological test, to establish, in two or three years, the bases for fertilization comprising a fertilizer that corrects the mineral deficiencies of a soil (an "amending fertilizer") and a "maintenance fertilizer" which enables the needs of the crops to be met while maintaining the soil in its "amended" state (Chaminade, 1965, 1971).

In the case of perennial crops IRHO proceeds in accordance with the same principle (Ollagnier and Ochs, 1977, 1981) in order to identify and correct mineral deficiencies: potassium deficiency very common in oil palm and coconut trees in West Africa, phosphorous deficiency in the Amazon basin, N, P and Mg deficiency in Sumatra, and so on.

CIRAD has observed that when attention is turned to soils other than very desaturated ferrallitic soils, of the "Gibbsiumox" type, the distinction between amending fertilizer and maintenance fertilizer adapted to the crop is artificial.

Hence the importance attached by CIRAD to the method of assessment and control of mineral nutrition of crops.

FOLIAR DIAGNOSIS: EXAMPLE OF OIL PALM

CIRAD has always accorded priority to control of nutrition of tropical crops so as to manage fertilizers with a view to their maximum effectiveness and minimum cost.

The work "*L'Analyse Végétale dans le Contrôle de l'Alimentation des Plantes Tempérées et Tropicales*" (Plant analysis in nutritional control of temperate and tropical plants), published in 1984, points out the significance, and operational utilization, of foliar diagnosis of *more than 20 tropical crops*, based on the findings accumulated by

Dès que l'on considère des sols autres que ferrallitiques très désaturés, type « Gibbsiumox », le CIRAD a observé que la distinction entre fumure de redressement et fumure d'entretien adaptée aux cultures était artificielle.

PALMIER A HUILE : PILOTAGE DES FUMURES PAR DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Le contrôle de la nutrition des cultures tropicales, pour gérer les fumures avec la plus grande efficacité et au moindre coût, a toujours été considéré comme une priorité au CIRAD.

L'Analyse végétale dans le contrôle de l'Alimentation des plantes tempérées et tropicales publié en 1984 fait le point sur la signification et les voies de la mise en œuvre opérationnelle du diagnostic foliaire de plus de vingt cultures tropicales, d'après les résultats accumulés depuis plus de 25 ans par les chercheurs du CIRAD.

L'IRHO a exposé dans de nombreuses publications les bases théoriques et pratiques de la gestion de la nutrition minérale et de la programmation des fumures pour les plantations de palmier à huile et de cocotier. Le diagnostic foliaire y joue un rôle majeur, dont la justification pratique et théorique doit être recherchée dans l'existence concomitante d'un réseau d'expérimentations, dites de référence, parfaitement contrôlées et réalisées selon un plan rigoureux au sein même des plantations (une expérimentation de référence pour 5 à 10 000 ha selon l'hétérogénéité du lieu).

Le recours systématique au diagnostic foliaire, dès la phase de correction des caractéristiques chimiques des sols, a permis à l'IRHO d'identifier des carences inconnues encore récemment, telle la carence en chlore sur palmier et sur cocotier, ou des carences connues mais moins fréquentes comme celle en cuivre et en zinc dans les sols du bassin amazonien, voire la carence en B non détectable par analyse de sol mais se manifestant dans des sites (Colombie, Pérou) où la croissance des jeunes palmiers est forte.

Par contre, la mise au point des fumures d'entretien d'une plantation en cours de production, repose sur un système plus élaboré qui repose plus sur les relations existant entre le rendement et l'état nutritionnel annuel des cultures apprécié par diagnostic foliaire sur expérimentation de référence et, par sondage, sur l'ensemble de la plantation.

Des niveaux critiques (K, Mg, Cl) ou des équilibres critiques (N et P) ont été établis par l'IRHO. Ils servent, par référence aux expérimentations pérennes, à évaluer les doses d'engrais à apporter annuellement pour s'approcher de l'optimum de nutrition minérale dans les conditions précises de sol et de climat de la plantation suivie, et pour des rapports de prix (engrais, production) connus.

Ce système de pilotage de la fumure du palmier à huile et du cocotier en plantation de l'IRHO présente l'avantage d'être parfaitement opérationnel et d'un coût très modeste face aux plus-values de rendement ou aux économies d'engrais qu'il permet d'obtenir. Il suffit d'une économie de 10 kg/ha/an d'engrais (sur 600 kg en moyenne) ou d'une plus-value de rendement de 20 kg/ha/an de régimes (pour une production moyenne de 20 tonnes) pour le rentabiliser (Ochs, 1984).

Ce pilotage des fumures par le diagnostic foliaire a pu faire l'objet de nombreuses critiques. Certes, il existe des variations considérables des teneurs seuils en fonction de l'environnement et des concentrations relatives des autres éléments dans la feuille.

CIRAD researchers over more than 25 years.

IRHO has published the theoretical and practical bases of mineral nutrition management and fertilization programming for oil palm and coconut plantations in a number of documents. In this, foliar diagnosis plays a major role, the practical and theoretical justification for which has to be sought in the existence of a network of "reference" trials perfectly controlled and conducted in accordance with a rigorous schedule within the plantations themselves (one reference trial for every 5-10,000 ha, depending on how heterogeneous the site is).

Systematic recourse to foliar diagnosis right from the phase of correction of the chemical characteristics of the soil has enabled IRHO to identify deficiencies that were unknown until very recently, such as chlorine deficiency in palm and coconut trees, and also known but less common deficiencies, such as copper and zinc deficiencies in the soils of the Amazon basin, even B deficiency, not detectable by soil analysis but manifesting itself at the localities (Colombia, Peru), where the growth of the young palm trees is strong.

On the other hand, development of the maintenance fertilizers of a producing plantation is based on a more elaborate system which assigns an essential role to the relationships between crop yield and nutritional status, assessed by foliar diagnosis in a reference trial and by sampling over the entire plantation.

IRHO has established critical levels (K, Mg, Cl) or critical balances (N and P). They serve, by reference to the perennial-crop trials, to evaluate the fertilizer dosages to be applied annually in order to approximate optimum mineral nutrition under the precise soil and climate conditions of the plantation monitored and for known price relationships (fertilizer, production).

This control of fertilization through foliar diagnosis has been the subject of numerous critical reviews. Substantial variation undoubtedly occurs in threshold contents, depending on the environment and the relative concentrations of the other elements in the leaf. Some critical levels, such as that of chlorine, have not yet been definitively determined, though it is known that in situations in which the foliar content is below 0.1 % an improvement in yields will almost certainly be obtained in coconut trees by the application of chlorated fertilizer (optimum around 0.5-0.6 %).

Other observations can be made concerning the validity and significance of foliar diagnosis. However, all these criticisms become pointless when it is considered that foliar diagnosis is used as a tool not to establish an absolute standard of the plant's internal needs but solely, through fertilization, to bring the contents of the crops on the plantation into line with those measured in the best combination observed in the reference trials.

IRHO's system of controlling oil palm and coconut fertilization on the plantation offers the advantage that it is perfectly operational and its cost is very modest compared with the resulting incremental yields or fertilizer savings. A saving of 10 kg/ha/year of fertilizer (out of an average of 600 kg), or an incremental yield of 20 kg/ha/year of fruit, is sufficient (Ochs, 1984).

PROGRAMMING OF FERTILIZATION OF OTHER CROPS

For the other fruit, stimulant (coffee, cocoa), textile (cotton) and food crops, foliar diagnosis is as a rule used more to check the adequacy of fertilization, *a posteriori*, than to program it.

Certains niveaux critiques comme celui du chlore ne sont pas encore définitivement établis bien que l'on sache que dans les situations où la teneur foliaire est inférieure à 0,1 % on obtiendra une amélioration de rendements quasi certaine sur cocotier par application d'engrais chloruré (optimum voisin de 0,5 à 0,6 %).

Pendant l'emploi de l'outil DF n'a pas pour finalité d'établir un standard absolu des besoins internes de la plante, mais a pour seule ambition d'aligner, par la fumure, les teneurs des cultures en plantation, sur celles mesurées dans la meilleure combinaison observée sur les expérimentations de référence.

PROGRAMMATION DES FUMURES DES AUTRES CULTURES PAR DIAGNOSTIC SOL, CONTRÔLE PAR DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Pour les autres cultures fruitières, stimulantes (café, cacao), textiles (cotonnier), vivrières, le diagnostic foliaire est généralement plus utilisé *a posteriori* comme un moyen de contrôle de l'adéquation d'une fumure que de programmation de cette dernière.

C'est ainsi que, dans le cas des plantations de bananes, les programmes de fumure phosphatée, calcique et magnésienne sont établis par « diagnostic sol » et contrôlés par diagnostic foliaire.

Les fumures azotée et potassique de cette culture, comme celle de l'ananas, sont par contre essentiellement évaluées en utilisant comme base de calcul les immobilisations minérales par la plante et les exportations réelles par les récoltes, les quantités ainsi calculées sont majorées pour tenir compte de la lixiviation d'une fraction des engrais épandus. Des coefficients de majoration ont ainsi été établis tenant compte de la quantité et de la répartition des pluies annuelles et des caractéristiques du sol (Godefroy et al., 1985).

Selon les évaluations faites au Cameroun et en Côte d'Ivoire, grâce à des lysimètres et l'emploi de traceur isotopique ^{15}N , l'IRFA est amené à préconiser des doses d'engrais augmentées de 20 à 30 % pour compenser les pertes par lixiviation sous ananas et bananiers.

Le cas du cotonnier est intéressant à souligner. De nombreux travaux ont été conduits par l'IRCT, pour établir des bases fiables et opérationnelles d'un diagnostic foliaire et pétiolaire de cette culture, en vue d'en optimiser la nutrition dans les conditions du milieu où elle est conduite (Braud, 1964 et 1984 ; Richard, 1976). Par cette technique, combinée aux résultats obtenus aux champs dans un réseau expérimental dense et de longue durée, des propositions de fumure précise ont été faites et sont appliquées avec succès en Afrique de l'Ouest comme en Amérique centrale et en Amérique du Sud.

Mais pour cette culture annuelle, comme d'ailleurs pour toutes les cultures vivrières annuelles de céréales et de légumineuses, la fertilisation doit être programmée en tenant compte de l'évolution très rapide des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols soumis à une *intensité culturale* (labour, buttage, sarclage, etc.) plus importante que dans le cas des cultures pérennes. Le diagnostic foliaire du cotonnier est d'ailleurs un bon indicateur biologique (Braud, 1981) d'évolution de ces caractéristiques qui affectent le pouvoir alimentaire des sols.

FUMURE ET ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES : VERS UNE STABILISATION DE LA PRODUCTION

Il est important de faire une dernière remarque concer-

Thus, the phosphate, calcium and magnesium fertilization programs for banana plantations are established by "soil diagnosis" and controlled by foliar diagnosis.

On the other hand, nitrogen and potassium fertilization of banana trees, as of pineapples, is essentially evaluated using calculations based on the mineral quantities locked up by the plant and the actual quantities extracted by harvesting, the resulting figure being augmented to take account of leaching of a fraction of the fertilizer applied. Augmentation coefficients are established in this way that take account of annual rainfall quantity and distribution and soil characteristics (Godefroy et al., 1985).

In light of evaluations made in Cameroon and Ivory Coast using lysimeters and the isotopic tracer ^{15}N , IRFA recommends fertilizer dosages increased by 20-30 % to compensate for leaching losses under pineapple and banana plantations.

The case of cotton is particularly interesting. IRCT has done many studies to establish reliable and operational bases for foliar and petiolar diagnosis of this crop with the object of optimizing nutrition under the conditions of a particular environment where it is grown (Braud, 1964, 1984; Richard, 1976). Using this technique combined with the field results of a dense and long-duration experimentation network, precise fertilization proposals have been made and are being applied successfully in West Africa as well as in Central and South America.

But for this annual crop, just as for all annual food grain and legume crops, fertilization programming has to take account of the very rapid evolution of the physical, chemical and biological characteristics of soils when subjected to *more intensive cultivation* (tilling, ridging, hoeing, etc.) than in the case of perennial crops. Now these soil characteristics very largely determine the nutritional power of the soils, for which the maintenance of mineral equilibria is only one aspect of a larger problem of fertility evolution; monitoring of that aspect can moreover be usefully performed or clarified through the practice of foliar diagnosis on cotton trees (Braud, 1981) in the area of extension of that crop.

FERTILIZATION AND WATER NUTRITION OF CROPS

A final important comment needs to be made concerning fertilization programming in semiarid tropical zones.

Whatever the results obtained by soil diagnosis and plant diagnosis, it must not be forgotten that random rainfall distribution is a determining factor of the efficiency and profitability of fertilization. This can lead to the recommendation of reduced fertilization. This prevents the full potential of the crop from being expressed within the framework of the technical system applied locally. It is, however, economically acceptable in the short run, and more reassuring for the farmer, who will obtain a stable production over the medium run (results obtained in Burkina Faso).

Conversely, a supplemental application of an element may be recommended even if the latter produces only a small incremental yield, in that, as in the case of potassium fertilization of millet in Senegal, a flattening of inter-annual production levels is observed (Pieri, 1983).

Evolution of soils under cropping

ORSTOM and CIRAD have done a very great deal of work on this topic, which is one of prime importance in tropical zones.

nant la programmation des fumures en zone tropicale semi-aride.

Quels que soient les résultats obtenus par le diagnostic sol et le diagnostic plante il ne faut pas oublier que la distribution aléatoire des pluies est une condition déterminante de l'efficacité et de la rentabilité d'une fumure. On peut donc être amené à préconiser des fumures réduites. Celles-ci ne permettent pas d'exprimer tout le potentiel de la culture dans le cadre du système technique où elle est pratiquée. Elles s'avèrent cependant économiquement acceptables à court terme, et plus sécurisantes pour l'agriculteur, qui obtiendra une production stable sur le moyen terme (résultats obtenus au Burkina Faso).

A l'inverse on peut être amené à préconiser un apport complémentaire en un élément même si celui-ci n'apporte qu'une faible plus-value de rendement, dans la mesure où, comme dans le cas de la fumure potassique du mil au Sénégal, on observe une réduction de fluctuations interannuelles des niveaux de production (Pieri, 1983).

Évolution des sols sous culture

De très nombreux travaux ont été menés par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD sur ce thème dont l'importance est primordiale en zone tropicale.

Cela mériterait de longs développements qui mettraient notamment en évidence la grande diversité des situations agricoles et des risques de dégradation des terres agricoles : la démographie et la pression foncière (surface cultivée/surface cultivable), les flux migratoires très importants en Afrique de l'Ouest, la concentration périurbaine, la demande en bois de chauffe et la déforestation, le surpâturage et toutes les autres conditions de l'environnement socio-économique sont, en effet, susceptibles de rendre non reproductibles les systèmes traditionnels de gestion de l'espace.

Ces travaux ont porté sur les systèmes suivants :

- systèmes traditionnels ou semi-mécanisés en cultures vivrières : au Sénégal, en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso, au Niger, au Cameroun, au Togo, en RCA, en Guyane, en Haïti, en Amazonie équatorienne, etc. ;
- cultures industrielles : bananier en Côte d'Ivoire, canne à sucre au Burkina Faso, à l'île Maurice, dans les Caraïbes (en cours), cotonnier en Côte d'Ivoire ;
- systèmes sylvicoles : au Congo, en Côte d'Ivoire, au Sénégal ;
- systèmes agro-pastoraux, en région sahélienne.

Toutes ces études ont montré que les systèmes traditionnels manuels, basés sur la culture itinérante et les longues jachères, sont évidemment moins perturbateurs des états du sol que les systèmes en cours de modernisation.

Cependant, en agriculture de plantation les travaux effectués par l'IRHO et l'ORSTOM permettent de conclure à une évolution vers un nouvel équilibre biologique favorable à la culture, sans dégradation irréversible de l'environnement (Olivin, 1980), bien qu'il faille pallier les effets de tassement mécanique des sols (IRHO). Sous hévéa, la situation serait encore plus favorable, cette culture pouvant même être considérée comme régénératrice de la fertilité des sols (IRCA).

Par contre la situation est beaucoup plus préoccupante dans les conditions d'une agriculture paysanne stabilisée (Charreau, 1972). Sans parler de catastrophe ou de « banqueroute » de l'environnement, des manifestations évidentes de dégradation des terres existent, dès que la densité de population rurale dépasse 40 à 60 hab/km².

This is a subject that deserves protracted treatment. It would highlight, for example, the great diversity of farming situations and of the land degradation risks in the farming world, having regard to: population and land pressure (cultivated/cultivable area); the very large migration flows in West Africa; peri-urban concentration, firewood demand and deforestation; overgrazing, and all the other aspects of the socioeconomic environment that can render traditional space management systems non-reproducible.

The work referred to has covered the following systems:

- traditional or semimechanized systems in food-crop cultivation: in Senegal, Ivory Coast, Burkina Faso, Niger, Cameroon, Togo, Central African Republic, Guyana, Haiti, Equatorial Amazonia, etc.;
- industrial crops: bananas in Ivory Coast sugar cane in Burkina Faso, Mauritius, Caribbean (in process), cotton in Ivory Coast;
- forestry systems: Congo, Ivory Coast, Senegal;
- crops/pasture combination, in the Sahel region.

All these studies have shown that the traditional manual systems, based on itinerant cultivation and long fallowing, apparently disturb soil conditions less than do the systems in process of modernization.

However, in plantation agriculture the studies done by IRHO and ORSTOM point to an evolution toward a new biologic equilibrium favorable to cropping, without irreversible degradation of the environment (Olivin, 1980), although it is necessary to alleviate the effects of mechanical compacting of the soil (IRHO). The situation would be even more favorable under hevea, a crop that can even be regarded as a soil fertility regenerator (IRCA).

On the other hand, the situation is much more worrying under the conditions of stabilized small-farmer agriculture (Charreau, 1972). Without speaking of catastrophe, or of "bankruptcy" of the environment, clear manifestations of land degradation appear as soon as the rural population density exceeds 40-60 persons/km².

Four processes underlie this degradation:

- breakdown of soil structure (soil destruction);
- erosion;
- organic impoverishment;
- acidification and mineral imbalances.

STRUCTURAL BREAKDOWN OF CROPPING PROFILES

Structure and structural stability are among the properties most sharply altered by cropping, generally being accompanied by degradation of physical properties in relation to the natural state — porosity, density, permeability, etc. — with very sharp variations in the value of these parameters in the cropping profile.

While the ferruginous soils appear to be most fragile ones (Fauck, Moureaux and Thomann, 1960), the ferralitic soils are also affected (Boyer and Combeau, 1960; De Blic and Moreau, 1979; Cointepas and Makilo, 1982). Irrigation accentuates the process (Combeau and Monnier, 1961). Structural stability is related to the rate of organic material contained in the soil (Martin, 1963; Combeau and Quantin, 1964), which decreases under the effect of cropping. But simple *breaking up or loosening* of the soil also increases the sensitivity of the aggregates to the action of infiltration water, leading to very rapid structural degradation, in savannah and forest soils of Ivory Coast (Moreau, 1978). The iron-clay linkages favor aggregation (Martin, 1963; Chauvel and Monnier, 1967; Combeau, 1964). It has been shown that the sudden alternation of

Quatre processus sont surtout à l'origine de cette dégradation :

- la destructuration des sols ;
- l'érosion ;
- l'appauvrissement organique ;
- l'acidification et les déséquilibres minéraux.

DESTRUCTURATION DES PROFILS CULTURAUX

La structure et sa stabilité comptent parmi les caractéristiques les plus fortement modifiées par la mise en culture, s'accompagnant généralement d'une dégradation des propriétés physiques par rapport à l'état naturel : porosité, densité, perméabilité..., avec des variations brutales de la valeur de ces paramètres dans le profil cultural.

Les sols *ferrugineux apparaissent les plus fragiles* (Fauck, Moureaux et Thomann, 1960) mais les sols ferralitiques sont également affectés (Boyer et Combeau, 1960 ; De Blic et Moreau, 1979 ; Cointepas et Makilo, 1982). L'irrigation accentue le phénomène (Combeau et Monnier, 1961). La stabilité structurale se trouve en relation avec le taux de *matière organique* du sol (Martin, 1963 ; Combeau et Quantin, 1964) qui diminue sous l'effet de la mise en culture. Mais le simple *ameublissement* du sol accroît aussi la sensibilité des agrégats à l'action de l'eau d'infiltration, conduisant à une dégradation très rapide de la structure, dans des sols de savane et forestiers de Côte d'Ivoire (Moreau, 1978). Les liaisons fer-argile favorisent l'agrégation (Martin, 1963 ; Chauvel et Monnier, 1967 ; Combeau, 1964). Il a été montré que l'alternance brutale d'humectation et dessiccation consécutive au défrichage, particulièrement dans les zones forestières à climat contrasté, entraînent la rupture des *liaisons fer-argile* (ultradessiccation), la destruction des agrégats et l'effondrement des structures (Chauvel, 1977).

Toutes ces données expliquent la grande difficulté d'améliorer de façon durable la stabilité structurale dans les sols cultivés. On ne peut qu'essayer de la maintenir à un niveau acceptable en renforçant le rôle favorable de certains facteurs (matière organique, activité racinaire) et en limitant au mieux les processus de dégradation (bonne couverture du sol, limitation du travail du sol...)

Le *labour* agit favorablement sur le rendement, en particulier pour les sols de la zone soudano-sahélienne les plus mal structurés (Charreau et Nicou, 1971 ; Dabin, 1969) ; il favorise également l'enracinement des plantes dans les sols dégradés des zones plus humides (ananas en basse Côte d'Ivoire, par exemple). Du fait de l'augmentation de perméabilité, l'érosion se trouve temporairement réduite par le labour (quelques semaines), mais le phénomène se trouve plutôt accru par la suite ; toutefois, la première période peut être mise à profit pour l'installation d'une culture qui protégera ensuite le sol (Roose, 1981). A condition de respecter certaines règles, le danger relatif à l'érosion résultant d'un labour à la charrue n'apparaît pas plus grand que dans le cas du travail manuel (Verney et Willaime, 1965 ; Dabin, 1954). Cependant la mécanisation accentue les risques de dégradation structurale et de compaction dans le profil cultural pouvant entraîner localement des phénomènes d'asphyxie (Ange, 1984).

ÉROSION

L'importance du phénomène d'érosion a très tôt retenu l'attention des chercheurs de l'ORSTOM et du CIRAD. Dès les *années 50*, a commencé l'installation d'un *réseau de dispositifs de mesure* (cases d'érosion puis lysimètres,

humectation and desiccation following upon land clearance, particularly in contrasted-climate forest zones, entails rupture of *iron-clay linkages* (ultra-desiccation), destruction of aggregates and collapse of structures (Chauvel, 1977).

These data together explain the great difficulty of durably improving structural stability in cultivated soils. One can only try to maintain it at an acceptable level by strengthening the favorable role of certain factors (organic material, root activity) and limiting the degradation processes so far as possible (ensuring good coverage and limited working of the soil, and so on).

Tilling has a favorable effect on yields, particularly for the most poorly structured soils of the Sudan-Sahel zone (Charreau and Nicou, 1971 ; Dabin, 1969). It also promotes root development of the plants in the degraded soils of the more moist zone (pineapples in Lower Ivory Coast, for example). By increasing permeability, tilling reduces erosion temporarily (for a few weeks) but the process tends to accentuate subsequently. However, advantage can be taken of the first period to plant a crop that will later protect the soil (Roose, 1981). Provided that certain rules are respected, the erosion risk appears to be no greater with plowing than with manual work (Verney and Willaime, 1965 ; Dabin, 1954). However, mechanization accentuates the risks of structural degradation and compacting in the cropping profile and can locally generate asphyxiation processes (Ange, 1983).

EROSION

The attention of ORSTOM and CIRAD researchers was attracted to the erosion phenomenon at a very early stage. From the 1950s, the installation began of a *network of measuring devices* (erosion frames, then lysimeters, measurement of oblique drainage, etc.), which has been extended to the various bioclimatic zones of West Africa (Dabin and Leneuf, 1958 ; Cointepas, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967 a and b). Following observations extending over many years, these studies have been published in long compilations, of which we can only briefly summarize some of the results (Roose, 1973, 1977, 1981, 1983 ; Fauck and Charreau, 1976).

The potential erosivity of the environment (rainfall aggressivity) is 3-60 times as high in West Africa as in temperate regions. Erosion remains low under natural vegetation but can be multiplied up to 1,000-fold when the land is put under crops. Under similar climatic conditions it is higher in West Africa than in Brazil, a fact connected with the more mediocre physical properties of the African soils (Leprun, 1985).

Erosion impoverishes the soil principally in its fine-particles phase, which is the true support of soil fertility (organic matter, mineral elements); phosphorous losses (apart from P withdrawal by crops) are due essentially to erosion. Biological anti-erosion techniques (associated with the state of coverage of the soil) appear to be more efficacious and less costly than mechanical methods in limiting erosion, particularly in moist zones (Roose, 1981). Various possibilities have been studied. The role of tilling in erosion control has already been mentioned.

With the aid of *rainfall simulators*, ORSTOM is currently extending its work on the behavior of watered soils and their erosion resistance in relation to cultivation practices in the Mediterranean area and in Latin America (Brazil, Mexico, Ecuador).

mesure du drainage oblique...) qui s'est étendu aux différentes zones bioclimatiques de l'Afrique de l'Ouest (Dabin et Leneuf, 1958 ; Cointepas, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967 a et b).. Après de longues années d'observations, ces travaux ont fait l'objet de larges synthèses dont on ne peut qu'évoquer succinctement quelques résultats (Roose, 1973, 1977, 1981, 1983 ; Fauck et Charreau, 1970).

L'érosivité potentielle du milieu (agressivité des pluies) est de 3 à 60 fois supérieure en Afrique de l'Ouest qu'elle n'est en région tempérée. L'érosion reste faible sous végétation naturelle mais peut être multipliée par un coefficient de l'ordre de 1 000 à la suite de la mise en culture. Sous conditions climatiques semblables, elle s'avère plus élevée en Afrique de l'Ouest qu'au Brésil, en liaison avec les caractéristiques physiques plus médiocres des sols africains (Leprun, 1985).

L'érosion appauvrit le sol préférentiellement en particules fines, réel support de la fertilité (matière organique, éléments minéraux) ; ainsi les pertes en phosphore, autres que les exportations par les cultures, sont essentiellement dues à l'érosion. Les techniques anti-érosives biologiques (liées à l'état de la couverture du sol) apparaissent plus efficaces et moins onéreuses que les méthodes mécaniques pour limiter l'érosion, particulièrement en zone humide (Roose, 1981). Différentes possibilités ont été étudiées dans ce domaine. Le rôle du labour pour contrôler l'érosion a déjà été évoqué plus haut.

A l'aide de *simulateurs de pluie* l'ORSTOM étend actuellement ses travaux sur le comportement des sols à l'eau et leur résistance à l'érosion en relation avec les pratiques culturales, en zone méditerranéenne et en Amérique latine (Brésil, Mexique, Equateur).

APPAUVRISSMENT ORGANIQUE ET BILAN AZOTÉ

D'importantes données ont été obtenues sur la connaissance quantitative et qualitative de la matière organique du sol et celle des conditions et facteurs de son évolution en milieu tropical. Plusieurs ouvrages et travaux de synthèse ont été publiés : Dommergues, 1970 ; Perraud, 1971 ; Bachelier, 1972, 1973, 1978 ; Mouraret, 1965 ; Rinaudo, 1973.

Sous l'effet de la mise en culture le stock organique diminue rapidement au cours des premières années pour atteindre un palier plus ou moins élevé selon les conditions de milieu et le mode d'exploitation (Fauck, Moureaux et Thomann, 1969 ; Feller et Milleville, 1977 ; Cointepas et Makilo, 1982). Sous culture intensive, les pertes peuvent facilement dépasser 50 % du stock initial, tandis qu'elles sont beaucoup plus modérées ou même inexistantes sous culture traditionnelle itinérante en zone forestière (Moreau, 1983 ; Turenne, 1977). Ces pertes en matière organique découlent du déséquilibre biologique auquel s'ajoutent les exportations par érosion, lessivage et minéralisation accrues (augmentation de température, alternances dessiccation/humectation, variation de pH, travail du sol : Bachelier, 1968 ; Dommergues, 1960 a et b ; Moureaux, 1967). Elles expliquent, au moins pour une bonne part, la dégradation de plusieurs caractéristiques importantes du sol liées à la matière organique : stabilité structurale, capacité d'échange.

Les études expérimentales réalisées par l'IRAT (Ganry, Pichot, Chabalière, Gigou) et l'IRCT sur le maintien de la fertilité azotée et organique des sols cultivés en zone de savane ouest-africaine soulignent l'intérêt des fumures organiques et minérales associées, ce qui soulève le délicat

ORGANIC IMPOVERISHMENT AND NITROGEN BALANCE

Important quantitative and qualitative data have been gathered on organic matter in soil and the conditions and factors that govern its evolution in a tropical environment. A number of studies and compilations have been published: De Boissezon et al., 1973; Dommergues, 1970; Perraud, 1971; Bachelier, 1972, 1973, 1978; Mouraret, 1965; Rinaudo, 1983.

Under the effect of cropping, the stock of organic material decreases rapidly during the first few years then stabilizes at a more or less high level depending on environmental conditions and type of farming (Fauck, Moureaux and Thomann, 1969; Feller and Milleville, 1977; Cointepas and Makilo, 1982). Under intensive cropping the losses can easily exceed 50 % of initial stock, whereas they are much more moderate or even zero in forest areas in the absence of traditional shifting cultivation (Moreau, 1983; Turenne, 1977). The losses of organic material stem from biologic imbalance, aggravated by withdrawals due to incremental erosion, leaching and mineralization (temperature increase, desiccation/humectation alternations, pH changes, tilling: Bachelier, 1968; Dommergues, 1960 a and b; Moureaux, 1967). These losses explain, at least in large part, the degradation of certain important soil characteristics linked to organic matter: structural stability, exchange capacity.

Experimental studies have been conducted by IRAT (Ganry, Pichot, Chabalière, Gigou) and IRCT concerning maintenance of the nitrogen and organic fertility of cultivated soils in the savannah zone of West Africa. They highlight the value of combined organic and mineral fertilization; this raises the delicate problem of the combination farming/stockraising (Burkina Faso, Mali, Senegal).

On the other hand, simple burial of green fertilizer, harvest residues and fallow grasses does not suffice to maintain a soil's humic stock, at least under annual-crop conditions: in the absence of a long fallowing period, the mineralization-humification balance shifts systematically toward mineralization.

An ORSTOM and CIRAD/IRAT team has been doing research for a number of years on *biologic nitrogen fixation*.

These studies concern ways of optimizing nitrogen fixation in order to reduce nitrogen fertilizer consumption. Research is already well advanced on two types of symbiotic associations on which pre-extension trials are being conducted in the field:

- use of cauline nodulation legumes (Sesabania and Aeschynomene-Rhizobium) in rice cultivation in Casamance and in the Senegal River region;
- inoculation and selection of nitrogen-fixing trees (casuarinaceae frankia) in tropical forestry in the Dakar region.

For food legumes that need specific rhizobium inoculation, IRAT-CIRAD has developed a fermenter with which inocula for legumes can be obtained under good conditions (soya, beans, cowpeas, etc.), which is currently being distributed with FAO assistance in more than 12 tropical countries (Bangladesh, Butan, Brazil, Burundi, Colombia..., Viet Nam, Zaire).

In conclusion, *an essential component of maintenance of the fertility of tropical soils is maintenance of their humic status.*

Satisfactory results have been obtained in the moist tropical zone, particularly in plantation agriculture (see IRHO and IRCA studies), through the use of cover plants

problème de l'association agriculture élevage (Burkina Faso, Mali, Sénégal, Tchad).

Par contre les simples enfouissements d'engrais vert, résidus de récolte et herbes de jachère ne permettent pas le maintien du stock humique des sols, du moins dans les conditions de cultures annuelles : en l'absence de longues périodes de jachère l'équilibre minéralisation-humification est systématiquement déplacé vers le pôle minéralisation.

Depuis quelques années des recherches sont réalisées dans le domaine de la *fixation biologique de l'azote* par une équipe de l'ORSTOM et du CIRAD/IRAT.

Ces travaux portent sur les moyens d'optimiser la fixation d'azote pour réduire la consommation d'engrais azoté. D'ores et déjà les recherches sont suffisamment avancées pour 2 types d'associations symbiotiques qui font l'objet d'expérimentations de pré vulgarisation au champ :

- utilisation des légumineuses à nodulation caulinaire (Sesbania et Aeschynomene - Rhizobium) en riziculture, en Casamance et dans la région du fleuve Sénégal ;
- inoculation et sélection d'arbres fixateurs d'azote (caesariinacées - frankia) en foresterie tropicale, dans la région de Dakar.

Pour les légumineuses alimentaires nécessitant une inoculation de rhizobium spécifique, l'IRAT-CIRAD a mis au point un fermenteur permettant d'obtenir dans de bonnes conditions des inoculum pour légumineuses (soja, haricot, niébé, etc.) qui est diffusé actuellement dans plus de 12 pays tropicaux avec le concours de la FAO (Bangladesh, Buthan, Brésil, Burundi, Colombie, Viet Nam, Zaïre...).

En conclusion, le *maintien du statut humique des sols tropicaux est une composante essentielle* du maintien de la fertilité édaphique.

Or, si en zone tropicale humide, et particulièrement en agriculture de plantation, des résultats satisfaisants ont été obtenus (voir travaux IRHO et IRCA) grâce à des plantes de couverture et aux restitutions organiques, il n'en est pas de même en zone semi-aride. Les travaux du CIRAD montrent qu'un tel équilibre ne peut être obtenu qu'à la condition d'associer *fertilisation minérale, restitutions organiques* (fumiers, compost) et *amélioration de la fixation biologique N₂* par des légumineuses.

ACIDIFICATION ET DÉSÉQUILIBRES MINÉRAUX

Par rapport au milieu naturel, la mise en culture induit un déséquilibre des bilans hydrique et minéraux. En absence de fertilisation les bilans minéraux sont évidemment toujours négatifs (Fauck, Moureaux et Thomann, 1969 ; Charreau et Fauck, 1970 ; Roose, 1981 ; Cointepas et Makilo, 1982). L'eau de drainage, dont la quantité peut s'accroître sous culture (diminution de l'ETR, efficacité de la lutte anti-érosive limitant le ruissellement), entraîne les éléments les plus mobiles : N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄, avec une tendance à l'*acidification* d'autant plus rapide que les engrais utilisés ont eux-mêmes une action acidifiante (azote, sulfates, chlorures). Ceci s'observe même en conditions de climat semi-aride où l'intensité de la minéralisation de la matière organique libérant des quantités élevées de nitrates en début de saison des pluies, peut fortement accroître les pertes par lixiviation (Pieri 1983).

Les sols tropicaux (ferralitique, ferrugineux) retiennent mal les engrais à l'exception des phosphates (en raison de leur nature minéralogique : kaolinite, oxy-hydroxydes de fer et d'alumine), particulièrement dans les zones humides. Ainsi en bananeraies fortement fertilisées les pertes

and organic restitution. The same cannot be said, however, of the semiarid zone. CIRAD's studies have shown that such an equilibrium can be obtained only with a combination of *mineral fertilization, organic restitution* (manure, compost) and *improvement of biologic N₂ fixation* by legumes.

ACIDIFICATION AND MINERAL IMBALANCES

In relation to the natural environment, putting land under crops disrupts the water and mineral balances. In the absence of fertilization, mineral balances are evidently always negative (Fauck, Moureaux and Thomann, 1969; Charreau and Fauck, 1969; Roose, 1981; Cointepas and Makilo, 1982). The drainage water, whose quantity can increase under crops (reduction in real evapotranspiration, effectiveness of anti-erosion measures for limiting runoff) washes away the most mobile elements (N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄) with a tendency to acidification, a tendency that is all the more rapid since the fertilizers used themselves have an acidifying action (nitrogen, sulphates, chlorates). This is observed even under semiarid climatic conditions, in which the intensive mineralization of organic matter, releasing large quantities of nitrates at the beginning of the rainy season, can sharply increase leaching (Pieri, 1984).

The tropical soils (ferralitic, ferruginous) do not retain fertilizers well, except for phosphates (by reason of their mineralogical nature — kaolinite, iron and aluminum hydroxides), particularly in moist zones. Thus, in highly fertilized banana plantations the leaching losses can widely exceed 50 % of the applications for nitrogen, potassium and the amendments Ca and Mg (lime, dolomite) but do not exceed 10 % for phosphorous (Roose and Godefroy, 1968; Roose, 1981). Fertilization must therefore be based on the application of low, frequently repeated, doses of fertilizer adapted to the conditions of the various crops, without neglecting the element Ca and Mg in order to counter the disadvantages of acidification over the more or less long term.

General conclusion

The French tropical agronomic research agencies have built up a stock of knowledge and know-how which has been applied directly at the development level and has resulted in substantial improvements in production and yields for all the crops concerned: oil palm/coconut, tropical citrus and other fruits, coffee, cocoa, cotton, food plants, sugar cane, and so on.

Fertilization has been one of the "levers" of that production growth. IRHO's recommendations are being applied on a million hectares of land all over the world, and those of IRFA and IRCC on several hundred thousand hectares; IRCT's fertilization calculations are being followed on 78 % of Africa's cottonlands; and so on. In the case of food crops the most significant results have been obtained by IRAT on rainfed rice in Brazil and on maize in a number of African countries and Madagascar, though with difficulties associated with lack of market and very unfavorable price relationships for these on-farm consumption products.

Thanks to their long-duration trial and observation networks and to their insertion into the very fabric of agricultural production (and) development research, these agen-

par lixiviation peuvent largement dépasser 50 % des apports pour l'azote, le potassium et les amendements Ca et Mg (chaux, dolomie) mais n'excèdent pas 10 % pour le phosphore (Roose et Godefroy, 1968 ; Roose, 1981). La fertilisation doit donc être basée sur l'apport de faibles doses d'engrais souvent répétées, adaptées aux conditions des différentes cultures, sans négliger les éléments Ca et Mg afin de s'opposer aux inconvénients de l'acidification à plus ou moins long terme.

Conclusion générale

Les organismes français de recherche agronomique tropicale ont accumulé un capital de connaissances et de savoir faire qui a été directement appliqué au niveau du développement et a entraîné des améliorations de production et de rendements substantiels pour l'ensemble des cultures concernées : palmier à huile-cocotier, fruits et agrumes tropicaux, café, cacao, cotonnier, plantes vivrières, canne à sucre...

La fertilisation a été un des leviers de cet accroissement de production. Les recommandations de l'IRHO sont appliquées sur un million d'hectares dans le monde, celles de l'IRFA et de l'IRCC sur plusieurs centaines de milliers d'hectares, 78 % des superficies cotonnières en Afrique reçoivent une fumure calculée d'après les recommandations de l'IRCT, etc. Dans le domaine des cultures vivrières les résultats les plus significatifs ont été obtenus par l'IRAT sur le riz pluvial au Brésil et sur maïs en plusieurs pays d'Afrique et de Madagascar, avec cependant des difficultés liées à l'absence de marché et aux rapports de prix très défavorables pour ces spéculations autoconsommées.

Grâce à leurs réseaux d'expérimentation et d'observations de longue durée, grâce à leur insertion dans le tissu même de la production agricole, de la recherche au développement, ces organismes ont privilégié la diffusion de techniques adaptées aux conditions réelles de la production et aux possibilités d'évolution de ces dernières.

Mais ces réseaux ont très tôt attiré l'attention des agronomes et spécialistes de science du sol, *moins sur la pauvreté des sols*, somme toute très relative et en tout cas facilement améliorable par amendements et engrais minéraux, que sur *leur fragilité*, dès que l'on entre dans une agriculture stabilisée sans possibilité de jachère de longue durée.

L'érosion est la manifestation la plus catastrophique de cette fragilité, l'appauvrissement organique le plus insidieux car il facilite l'érosion par dégradation des propriétés physiques des sols, il entraîne une baisse d'efficacité des engrais minéraux et de l'activité microbiologique des sols. Or les voies de la stabilisation du statut humique à un niveau favorable ne sont pas évidentes à suivre, tout particulièrement dans les agricultures paysannes où dominent les cultures annuelles sans élevage intégré aux exploitations.

Potentiel de recherche

Le potentiel de recherche du CIRAD

L'effectif actuel du CIRAD en Agronomie et Connaissance et Amélioration du milieu est de 206 chercheurs

ciés have fostered the dissemination of techniques adapted to actual production conditions and to their possible evolution over time.

However, these networks very soon drew the attention of agronomists and soil science experts *less to the poorness of the soils*, which after all is very relative and in any case can easily be improved by amendments and mineral fertilizers, than to *their fragility* as soon as they come under a stabilized agriculture without the possibility of long following times.

Erosion is the most disastrous manifestation of this fragility, and organic impoverishment the most insidious, since it facilitates erosion by degrading the physical properties of the soil and impairs the efficiency of mineral fertilizers and of the microbiologic activity of the soils. It is not yet clear by what means the soil's humic status can be stabilized at a favorable level, particularly in small-farmer agricultures in which annual crops without integrated stockraising predominate.

Research capacity

Research capacity of CIRAD

As of October 1985 CIRAD's Environmental Agronomics, Knowledge and Improvement staff numbered 206 researchers. To these must be added about 100 national researchers, most of them African, who participate on the same footing as expatriates in the formulation and execution of research programs.

Of the CIRAD researchers, 75 % are in post overseas, the large majority in West Africa. Their distribution by research specialty is as follows: Bioclimatology / 10. Soil science / 27. Agronomics / 169. (Total 206).

It is considered that the soil science research staff spend 75 % of their time on soil studies relating to crop suitability and fertility evolution. The rest of their time (the equivalent of 20 researcher units) is devoted to methodology and soil inventory studies.

Similarly, while all the agronomists concern themselves with fertility maintenance and the development of crop-specific fertilization, CIRAD possesses:

- 22 chemical and organic soil fertility specialists;
- 9 physical fertility specialists;
- 2 teams of 4 researchers in microbiology applied to annual crops and forest species;
- a large group of researchers (20) who work part-time on the development of cropping systems that are economical in inputs, including two specialists in the manufacture of new fertilization products who work in collaboration with people in industry;
- the equivalent of 4 researcher units specializing in the combating of erosion.

There is a large team engaged in research on "water economics and utilization." The other agronomists all devote the bulk of their work to crop management.

Thus, in the area of fertility and fertilization under cropping conditions CIRAD deploys about 75 researcher units, to which must be added more than 30 researcher units from the African and Malagasy national institutes working in these fields.

However, this relatively large total has to be interpreted in relation to the 20 or so major crops on which the (Oct. 1985) auquel il convient d'ajouter environ

100 chercheurs nationaux, à majorité africains, qui participent au même titre que les expatriés à l'élaboration et à la réalisation de programmes de recherches.

75 % des chercheurs CIRAD sont en poste Outre-Mer, avec une forte majorité localisée en zone ouest-africaine. Leur répartition par spécialité de recherche est la suivante : Bioclimatologie /10. Science du sol /27. Agronomie /169. (total 206).

On considère que les chercheurs en Science du Sol interviennent à 75 % de leur temps dans des études relevant de la caractérisation des aptitudes culturales des sols et de l'évolution de leur fertilité, le reste du temps étant consacré à des études méthodologiques et à des inventaires pédologiques : soit l'équivalent de 20 unités chercheurs.

De même si l'ensemble des agronomes se préoccupe dans leurs actions de maintien de fertilité et de mise au point de fumure adaptée aux cultures, le CIRAD dispose de :

- 22 spécialistes de la fertilité chimique et organique des sols ;
- 9 spécialistes de la fertilité physique ;
- 2 équipes de 4 chercheurs en microbiologie appliquée aux cultures annuelles et aux espèces forestières ;
- un groupe important de chercheurs (20) travaillant à temps partiel sur la mise au point de systèmes de cultures économes en intrants, dont deux spécialistes de la fabrication de nouveaux produits fertilisants, travaillant en relation avec des industriels ;
- ainsi que de l'équivalent de 4 unités chercheurs spécialisés dans la lutte anti-érosive.

Outre l'équipe importante existant dans le domaine de recherche relatif à « l'économie et à la valorisation de l'eau », les autres agronomes consacrent l'essentiel de leur activité à la phytotechnie par culture (crop management).

Ainsi en matière de recherche sur la fertilité et la fertilisation en conditions de culture le CIRAD mobilise environ 75 unités chercheurs auxquelles doivent être ajoutées plus de 30 unités chercheurs issues des instituts de recherches nationaux africains et malgache travaillant dans ces domaines.

Ce total relativement important doit être cependant interprété en relation avec la vingtaine de cultures principales sur lesquelles les instituts du CIRAD travaillent (Mil, Sorgho, Maïs, Canne à sucre, Riz, Cultures maraîchères, Hévéa, Café, Cacao, Cotonnier, Bananier, Ananas, fruitiers divers, Palmier à huile, Cocotier, Arachide, Soja) et la multiplicité de ses implantations géographiques permanentes (18 pays africains, 3 pays d'Asie du Sud Est, 6 pays d'Amérique Latine, 6 DOM-TOM français).

Cette répartition géographique présente l'avantage de permettre des comparaisons fondées sur des milieux physiques similaires où se réalisent des expérimentations identiques. Le pilotage de ces dernières suppose une concentration de moyens analytiques puissants. C'est le rôle du Centre de Montpellier où sont également réunis des moyens de formation à la recherche et où s'achève la construction du plus grand centre documentaire européen sur l'agriculture des régions chaudes du globe.

Outre les implantations anciennes de l'INRA, et du CNRS, l'installation en cours de deux départements de l'ORSTOM - bioclimatologie et Science du sol - vient encore renforcer le potentiel scientifique de ce campus montpelliérain.

CIRAD institutes work (millet, sorghum, maize, sugar cane, rice, vegetables, hevea, coffee, cocoa, cotton, bananas, pineapples, miscellaneous fruits, oil palm, coconut, groundnuts, soya) and its large network of permanent field installations (18 countries in Africa, 3 in Southeast Asia and 6 in Latin America, plus 6 French Overseas Departments and Territories).

This geographical distribution offers the advantage that it permits comparisons based on similar physical environments where identical trials are being conducted. Powerful analytical resources have to be brought to bear on the guidance and monitoring of these experiments. This is the role of the Montpellier Center, which also houses research training facilities and where construction is nearing completion of Europe's biggest documentation center on agriculture in the warm regions of the world.

In addition to the old facilities of INRA and CNRS, the installation, now in progress, of two ORSTOM departments, Bioclimatology and Soil Science, will further reinforce the scientific capacity of the Montpellier campus.

Research capacity of ORSTOM

ORSTOM's current soil fertility and soil evolution research staff is as follows:

- 44 researchers, including 5 researchers on loan (Congo, Ivory Coast) and 9 foreign associate researchers (Venezuela, Ecuador);
- 11 engineers, technicians and research fellows.

At the present time, 19 researchers are working in Africa, 14 in Latin America (Venezuela, Ecuador, Mexico), 13 in the Overseas Departments and Territories (Martinique, New Caledonia) and 9 in metropolitan France. Schematically, these researchers may be considered to devote 70 % of their time to the field of activities under discussion here.

Research prospects and priorities

CIRAD and ORSTOM are convinced of the importance of soil fertility and crop fertilization research, which is more than ever decisive to raising intertropical zone farm production. Devising more intensive farming systems that are both reproducible (without degradation of the environment) and economical in the use of inputs (to comply with socioeconomic conditions in that zone) is a task that continues to strongly challenge French scientists.

General research objectives

In the area of *knowledge of soil fertility and its trends*, ORSTOM intends to strengthen research into the current functioning of soils in relation to farming constraints, so as to gain a better knowledge of the processes and mechanisms of transformation of soil status and its repercussions on the short- and long-term evolution of productive capacity. In view of the importance and rapidity of the transformations that affect the status of cultivated soils, preferential attention is given to two principal components: structural organization and organic matter.

For CIRAD, the main focus is on the *development of productive and reproducible farming systems* adapted to

Le potentiel de recherche de l'ORSTOM

Dans le domaine de recherche sur la fertilité et l'évolution des sols l'ORSTOM dispose actuellement du potentiel humain suivant :

- 44 chercheurs dont 5 chercheurs étrangers sur crédit (Congo, Côte d'Ivoire), 9 chercheurs étrangers associés (Vénézuéla, Equateur) ;
- 11 ingénieurs, techniciens et allocataires de recherche.

Actuellement 19 chercheurs travaillent en Afrique, 14 en Amérique Latine (Vénézuéla, Equateur, Mexique), 13 dans les DOM-TOM (Martinique, Nouvelle Calédonie) et 9 en France métropolitaine. On peut schématiquement considérer que les recherches conduites par ces chercheurs relèvent à 70 % du domaine d'activités ici évoqué.

Perspectives et priorités de recherche

Le CIRAD et l'ORSTOM sont persuadés de l'importance qu'il faut accorder aux recherches sur la fertilité des sols et la fertilisation des cultures, qui plus que jamais conditionnent l'accroissement de productivité agricole de la zone intertropicale. Or l'obtention de systèmes d'exploitation plus intensifs, qui soient à la fois reproductibles – sans dégradation du milieu – et économes en intrants – pour être adaptés aux conditions socio-économiques de cette zone – est un défi qui continue à interpeller fortement le monde scientifique français.

Objectifs généraux des recherches

Dans le domaine de la connaissance de la fertilité des sols et de son devenir, l'ORSTOM entend renforcer les recherches sur le fonctionnement actuel des sols en relation avec les contraintes d'exploitation, visant à mieux connaître les processus et mécanismes de transformation de l'état du sol et ses conséquences sur l'évolution de la capacité de production à court et long termes : l'importance et la rapidité des transformations qui affectent l'état des sols cultivés conduisent à privilégier deux composantes principales, l'organisation structurale et la matière organique.

Pour le CIRAD, l'orientation centrale est la mise au point de systèmes d'exploitation productifs et reproductibles, adaptés aux objectifs d'un développement rural intégré.

Cet objectif général se traduit dans la majorité des Départements par la poursuite des cinq objectifs corollaires suivants :

- accroître l'efficacité des facteurs de la production : économie et valorisation de l'eau et des éléments nutritifs ;
- améliorer les conditions de la production pour adapter, au moindre coût d'extériorisation, les systèmes cultureaux aux contraintes du milieu : techniques culturales améliorant l'enracinement, l'efficacité de la fixation biologique de l'azote, la fertilité d'ensemble des terres ;
- accroître et stabiliser la production agricole face aux risques encourus par les agriculteurs : risques climatiques (sécheresse), édaphiques (érosion, dégradation de la fertilité physique et chimique des terres), parasitaires, économiques ;

the goals of integrated rural development.

This general objective is reflected in most Departments in the pursuit of five corollary objectives:

- to enhance *productive-factor efficiency*: economics and efficient utilization of water and nutrients;
- to improve *production conditions* in order to adapt the cropping systems, at lowest exteriorization cost, to the *constraints of the environment*: cropping techniques that improve root development, efficiency of biologic nitrogen fixation, and overall fertility of the land;
- to increase and *stabilize agricultural production in the face of the risks* run by farmers: climatic (drought), edaphic (erosion, degradation of physical and chemical fertility of the land), parasitic, economic;
- to *exploit local resources and inputs*: local phosphates and ores, water reserves (surface and underground), organic residues, industrial waste;
- to *protect the environment*: watershed management; equilibrium between cropfarming, stockraising and forest exploitation.

Research priorities

The following seven research priorities have been adopted:

- *restoration and maintenance of the physical properties* of soils, within the framework of a stabilized agriculture:
 - structural organization and porosity trends;
 - anti-compaction techniques, particularly in semi-mechanized systems and on plantations, primarily in Burkina Faso, Ivory Coast, Congo, Mauritius and Réunion;
 - erosion mechanisms and correctives measures: West Africa, Algeria, Ecuador;
- *restoration and maintenance of the humic status* of cultivated soils:
 - research, by major ecologic zones, of the threshold values and forms of organic matter that permit sustained agriculture over time: Senegal, Ivory Coast, Caribbean area, Brazil, Venezuela;
 - techniques of stabilizing the humic status of soils, primarily in semiarid zones: Senegal, Northern Ivory Coast, Cameroon, Mali, Chad;
- improvement of *methods of nutritional control of crops*: reliability of sampling and analyses, operational organization of control procedures in rural areas, particularly for annual crops: African savannah zone, Benin, Amazonia;
- improvement of the *efficiency of mineral fertilization through an integrated approach to water and mineral balance* analysis: reduction of leaching, runoff and volatilization losses: Senegal, Ivory Coast, Brazil, New Caledonia;
- improvement of the efficiency of *biologic fixation of nitrogen* by annual and perennial species.

In parallel, research will be developed into *biologic fertility* from the standpoint of "soil fatigue" (Congo), particularly under sugar cane (Burkina Faso, Ivory Coast);

- research into the *rhizospheric activity* of cereals (rainfed rice) and perennials (oil palm) under *humic stress conditions* (African savannah zone, Benin, Brazil, etc.) and/or in an *acid environment* (Brazil, Cameroon, Madagascar, France);
- development of *low-cost mineral fertilizers* (partial acidification, compacting) that utilize *natural phosphates*: France, Togo, Burkina Faso, Senegal, Indonesia.

- valoriser les *ressources et intrants locaux* : phosphates et minerais locaux, réserves hydriques (de surface et souterraines), résidus organiques, déchets industriels ;
- *protéger l'environnement* : aménagements de bassins versants, équilibre entre les systèmes d'exploitation culturelle, animale et forestière.

Priorités de recherche

Les sept priorités de recherches suivantes sont retenues :

- *restauration et maintien des propriétés physiques* des sols dans le cadre d'une agriculture stabilisée :
 - évolution de l'organisation structurale et de la porosité ;
 - techniques de lutte contre la compaction notamment en systèmes de culture semi-mécanisée et en plantation en priorité au Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Congo, Ile Maurice, La Réunion ;
 - mécanismes de l'érosion et mesures correctives : Afrique de l'Ouest, Algérie, Equateur ;
- *restauration et maintien du statut humique* des sols cultivés :
 - recherche par grandes zones écologiques des seuils et formes de matière organique autorisant une agriculture soutenue dans le temps : Sénégal, Côte d'Ivoire, Caraïbes, Brésil, Venezuela ;
 - techniques de stabilisation du statut humique des sols, en priorité dans la zone semi-aride : Sénégal, Nord Côte d'Ivoire, Cameroun, Mali, Tchad ;
- *amélioration des méthodes de contrôle nutritionnel* des cultures : fiabilité des échantillonnages et des analyses, organisation opérationnelle des méthodes de contrôle en milieu rural, notamment pour les cultures annuelles : zone de savane africaine, Bénin, Amazonie ;
- *amélioration de l'efficacité de la fumure minérale* par une approche intégrée de l'analyse des *bilans hydrique et minéraux* : réduction des pertes par lixiviation, ruissellement et volatilisation : Sénégal, Côte d'Ivoire, Brésil, Nouvelle Calédonie ;
- *amélioration de l'efficacité de la fixation biologique* de N_2 pour les espèces annuelles et pérennes. Parallèlement des recherches seront développées sur le thème de la *fertilité biologique*, sous l'angle de la « fatigue des sols » (Congo) notamment sous canne à sucre (Burkina Faso, Côte d'Ivoire) ;
- recherche sur l'*activité rhizosphérique* des céréales (riz pluvial) et des plantes pérennes (palmier à huile) en condition de *stress hydrique* (zone de savane d'Afrique, Bénin, Brésil...) et/ou en *milieu acide* (Brésil, Cameroun, Madagascar, France) ;
- mise au point d'*engrais minéraux à faible coût* de fabrication (acidification partielle, compactage) permettant de valoriser les *phosphates naturels* : France, Togo, Burkina Faso, Sénégal, Indonésie.

Organisation

L'approche des problèmes de fertilisation *par filière* de production sera maintenue à son niveau actuel

Dans le domaine de l'évolution de la fertilité dans le temps, les recherches privilégient naturellement l'approche *par système d'exploitation* considérant les effets combinatoires et cumulatifs des différentes contraintes et pratiques culturelles, plutôt que l'approche par filière de pro-

Organization

The "product-specific" approach to problems will be maintained on its present scale.

In the area of fertility trends over time, research naturally gives preference to the *farming-system* approach, considering the combinatory and cumulative effects of the various constraints and cropping practices, rather than the more sectoral and restrictive "product-specific" approach.

With this in mind, it will be sought to profit from the geographical diversity of ORSTOM's and CIRAD's facilities, especially CIRAD's *long-duration experimentation network*, to facilitate comparative studies and enrich the scientific analysis of soil evolution as a function of farming environments and modes. To that end the participation of *international programs and networks* (EEC, IAEA, CIMMYT, ICRISAT, IRRI, IITA, IBSRAM, FAO, UNESCO, etc.) will be strengthened; CIRAD has in fact, with the assistance of ORSTOM and of French Cooperation, just initiated a research network on drought resistance (R³S) following a recent conference in Dakar.

Francophone Africa, Brazil and the Guayana-Antilles group, and to a less degree Indonesia and New Caledonia, are the main geographical foci of the current and future activity of the CIRAD-ORSTOM complex.

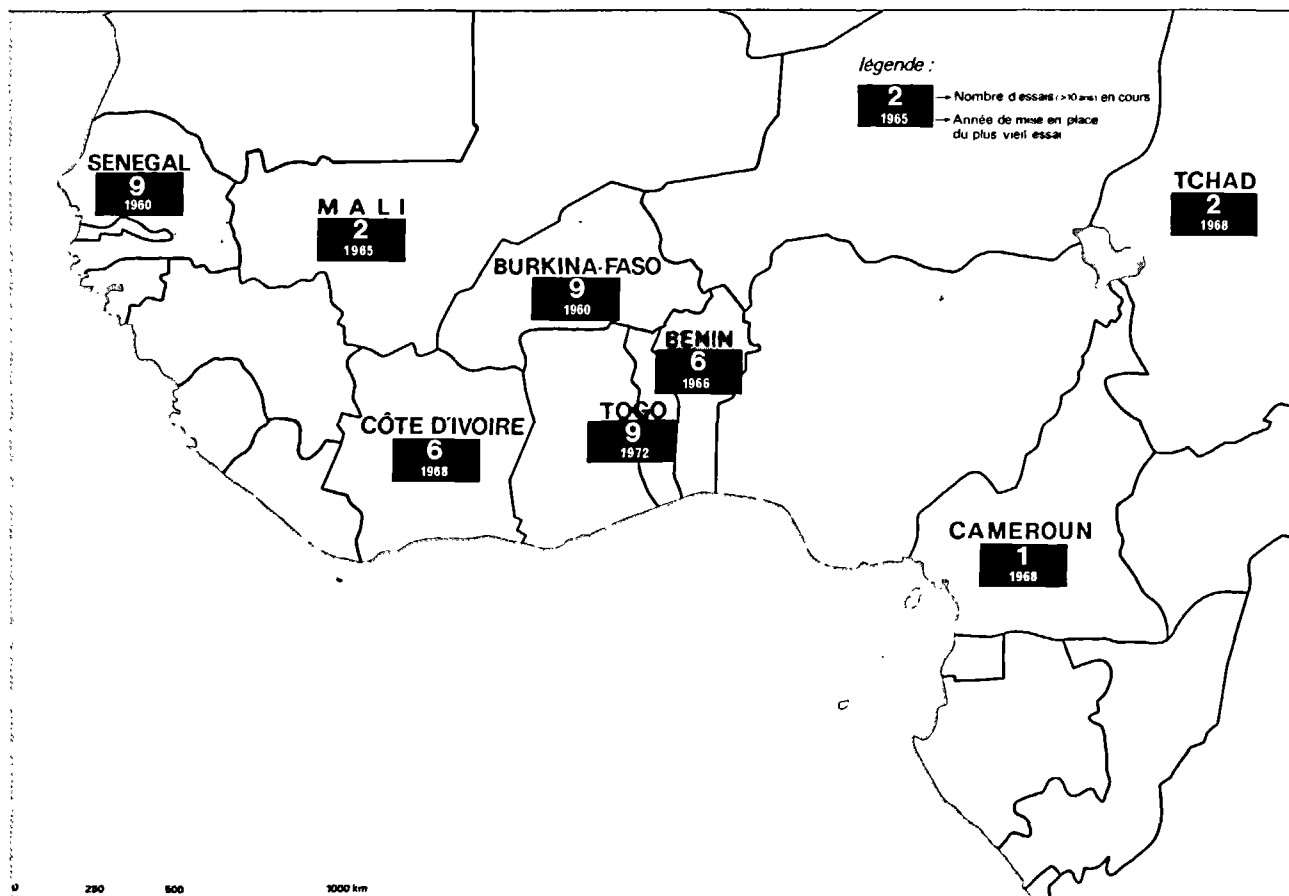
duction plus sectorielle et restrictive.

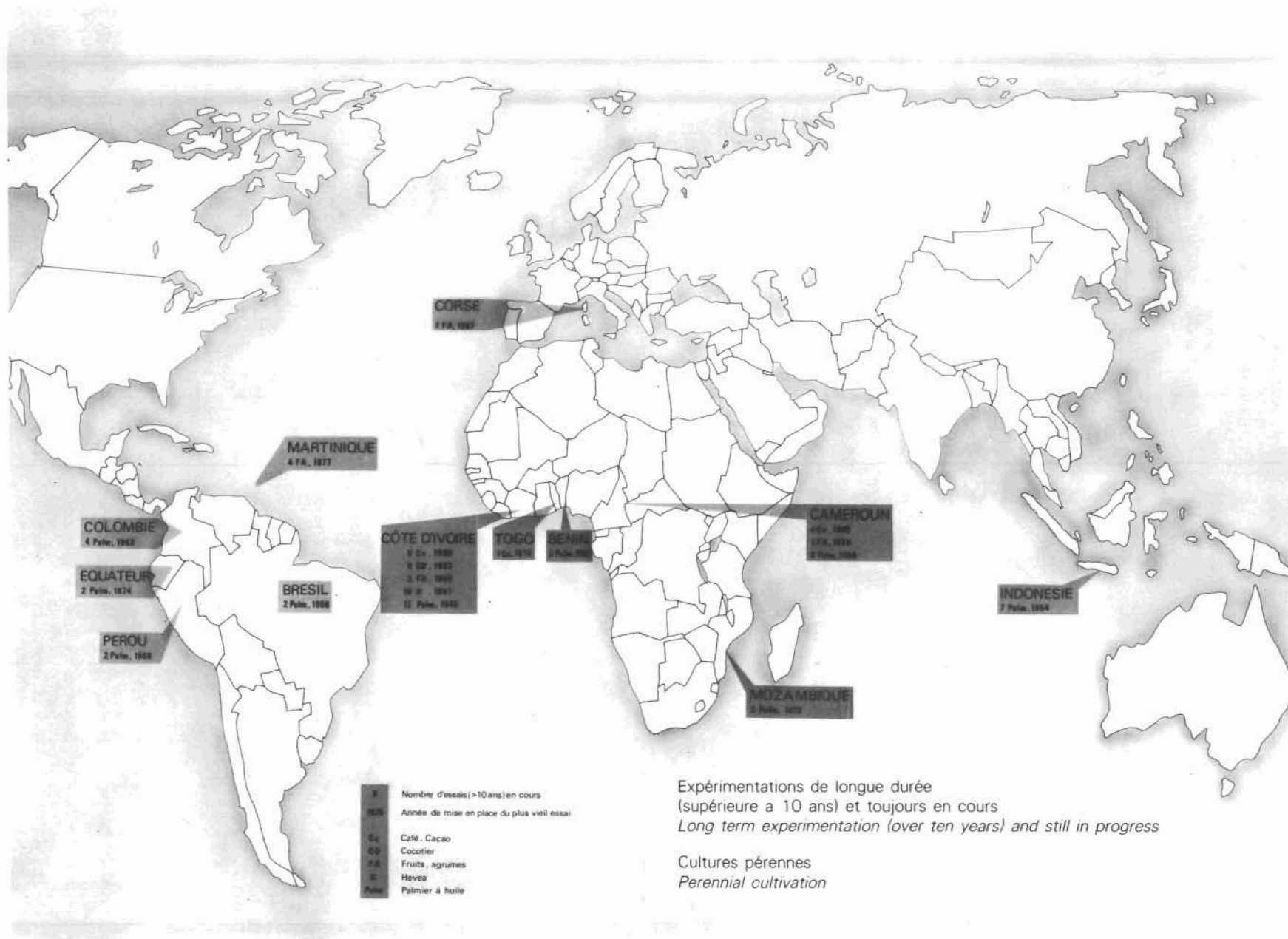
Dans cette optique, on s'efforcera de tirer parti de la diversité des implantations géographiques de l'ORSTOM et du CIRAD, et notamment des *dispositifs expérimentaux de longue durée* du CIRAD, pour faciliter les études comparatives et enrichir l'analyse scientifique sur l'évolution des sols en fonction des milieux et modalités d'exploitation. A ce titre la participation à des *programmes et réseaux internationaux* (CEE, IAEA, CIMMYT, ICRISAT, IRRI, IITA, IBSRAM, FAO, UNESCO...) sera renforcée, le CIRAD avec le concours de l'ORSTOM et de la Coopération française venant d'initier un réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse (R³S) à la suite d'un récent colloque réuni à Dakar.

L'Afrique francophone, le Brésil et l'ensemble Guyane-Antilles, enfin dans une moindre mesure l'Indonésie et les archipels du Pacifique sud, sont les points d'appui géographiques essentiels de l'activité actuelle et future de l'ensemble CIRAD-ORSTOM, qui a significativement accru sa présence en Océanie et dans l'ensemble de l'Amérique Latine au cours des dernières années.

Expérimentations de longue durée
(supérieure a 10 ans) et toujours en cours
Long term experimentation (over ten years) and still in progress

Cultures annuelles céréales, cotonnier, arachide
Yearly cultivation of cereals, cotton and peanuts





Liste des références bibliographiques citées dans le texte

ÉTABLIE PAR LES SERVICES DE DOCUMENTATION DU CENTRE DE RECHERCHES CIRAD-MONTPPELLIER (GERDAT, IRAT, IRFA, IRHO)

- ANGE A • 1984 • LES CONTRAINTES DE LA CULTURE COTONNIÈRE DANS LE SYSTÈME AGRAIRE DE HAUTE CASAMANCE AU SÉNÉGAL. THÈSE DE DOCTORAT, GÉOLOGIE APPLIQUÉE, INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE, PARIS, 458 P., 301 P. ET ANNEXES.
- AUBERT G / MOULINIER H • 1954 • OBSERVATIONS SUR QUELQUES CARACTÈRES DES SOLS DE CACAÏÈRES EN CÔTE D'IVOIRE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 9, (4) : 428-438.
- BACHELIER G • 1968 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE. PARIS, ORSTOM, 76 P. (MÉMOIRES ORSTOM, 30).
- BACHELIER G • 1972 • ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ACTION DES ANIMAUX SUR L'HUMIFICATION DES MATÉRIEAUX VÉGÉTAUX. T. I. : EXPÉRIENCES ET CONCLUSIONS PRÉLIMINAIRES. PARIS, ORSTOM, 76 P. (TRAVAUX ET DOCUMENT, 14).
- BACHELIER G • 1973 • ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ACTION DES ANIMAUX SUR L'HUMIDIFICATION DES MATÉRIEAUX VÉGÉTAUX. T. II : ACTION DES ANIMAUX MORTS ET DES ACIDES AMINÉS. CONCLUSIONS GÉNÉRALES. PARIS, ORSTOM, 80 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 30).
- BACHELIER G • 1978 • LA FAUNE DES SOLS. SON ÉCOLOGIE ET SON ACTION. PARIS, ORSTOM, 392 P., 52 FIG., 4 PL. (INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES, 38).
- BENOIT-CATTIN M • 1977 • TYPOLOGIES D'EXPLOITATIONS AGRICOLES. IN : BILAN ET PERSPECTIVES DES RECHERCHES SUR LE DÉVELOPPEMENT RURAL MENÉES DANS LES UNITÉS EXPÉRIMENTALES. SÉMINAIRE ORGANISÉ AU CNRA DE BAMBEY (SÉNÉGAL), 16-21 MAI 1977 : 8 P. MULTIGR.
- BERTRAND R ET AL • 1985 • LA CONNAISSANCE DES SYSTÈMES DE PAYSAGES NATURELS UN PRÉALABLE A LA PROTECTION DU MILIEU ; L'APPROCHE MORPHOPÉDOLOGIQUE. IN : COLLOQUE INTERNATIONAL DÉVELOPPEMENT AGRICOLE ET LA CONSERVATION DU PATRIMOINE NATUREL DANS LES PAYS DU TIERS-MONDE, GEMBLOUX, BELGIQUE, 9-11 OCTOBRE 1985, 13 P.
- BILLAZ R • 1981 • DOSSIER D'ÉTUDES YATENGA (CAMEROUN) CHAP. IV : SABOUNA, LES EXPLOITATIONS AGRICOLES, CHAP. V : LES SYSTÈMES DE CULTURE. MONTPELLIER, IFARC ; OUAGADOUGOU : IPDAOS/INSTITUT PANAFRICAIN POUR LE DÉVELOPPEMENT AFRIQUE DE L'OUEST ET SAHEL. 31 P. NON PAG.
- BLIC P DE / MOREAU R • 1979 • STRUCTURAL CHARACTERISTICS CHANGES IN FERRALLITIC SOILS UNDER MECHANICAL CULTIVATION IN THE MARGINAL FOREST AREAS OF THE IVORY COAST. IN: SOIL PHYSICAL AND CROP PRODUCTION IN THE TROPICS; CHICHESTER, WILEY: 111-122.
- BOYER J • 1970 • ESSAI DE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACQUISES SUR LES FACTEURS DE FERTILITÉ DES SOLS EN AFRIQUE INTERTROPICALE FRANCOPHONE. PARIS, ORSTOM, 175 P.
- BOYER J • 1978 • LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM DANS LES SOLS DES RÉGIONS TROPICALES HUMIDES ET SUBHUMIDES. PARIS, ORSTOM, 174 P. (INITIATIONS - DOCUMENTS TECHNIQUES, 35).
- BOYER J • 1982 • LES SOLS FERRALLITIQUES. T. X : FACTEURS DE FERTILITÉ ET UTILISATION DES SOLS. PARIS, ORSTOM, 300 P., 23 FIG., 100 TABL., 1 000 RÉF. (INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES, 52).
- BOYER J / COMBEAU A • 1960 • ÉTUDE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE DE QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES DE LA RÉPUBLIQUE CENTRE AFRICAINE. SOLS AFRICAINS, 5, (1) : 6-42.
- BRAUD M • 1964 • LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE, GUIDE DE LA FERTILISATION MINÉRALE DU COTONNIER. IN : 1^{er} COLLOQUE EUROPÉEN SUR LE CONTRÔLE DE LA NUTRITION MINÉRALE ET FERTILISATION, MONTPELLIER : 299-308.
- BRAUD M • 1981 • L'INTÉRÊT DU COTONNIER, SUPPORT DE TESTS BIOLOGIQUES POUR CONTRÔLER L'ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ D'UN SOL. COTON ET FIBRES TROPICALES, 36, (4) : 305-312, 11 RÉF.
- BRAUD M • 1984 • LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE SUR LE COTONNIER. IN : L'ANALYSE VÉGÉTALE DANS LE CONTRÔLE DE L'ALIMENTATION DES PLANTES TEMPÉRÉES ET TROPICALES - COORDONNATEURS : P. MARTIN-PREVEL, J. GAGNARD, P. GAUTIER ; PARIS, LAVOISIER, 1984 : 559-576, 41 RÉF.
- CHAMINADE R • 1965 • BILAN DE TROIS ANNÉES D'EXPÉRIMENTATION EN PETITS VASES DE VÉGÉTATION. MISE AU POINT TECHNIQUE - RÉSULTATS - L'AGRONOMIE TROPICALE 20 (11) : 1101-1162.
- CHAMINADE R • 1971 • ASPECTS AGRONOMIQUES DE LA RENTABILITÉ DE LA FERTILISATION. L'AGRONOMIE TROPICALE, 26 (2) : 265-269.
- CHARREAU C • 1972 • NÉCESSITÉ AGRONOMIQUE D'UNE INTENSIFICATION DES SYSTÈMES AGRICOLES DANS LES PAYS DE ZONE TROPICALE SÈCHE : L'EXEMPLE DU SÉNÉGAL. IN : SÉMINAIRE D'ÉTUDE DE PROBLÈMES INTERTROPICAUX, GEMBLOUX, BELGIQUE, 11-15 SEPTEMBRE. NOGENT SUR MARNE, IRAT : 204-212.
- CHARREAU C / FAUCK R • 1970 • MISE AU POINT SUR L'UTILISATION AGRICOLE DES SOLS DE LA RÉGION DE SEFA (CASAMANCE). L'AGRONOMIE TROPICALE, 25 (2) : 151-191, 39 REF.
- CHARREAU C / NICOU R • 1971 • L'AMÉLIORATION DU PROFIL CULTURAL DANS LES SOLS SABLEUX ET SABLO-ARGILEUX DE LA ZONE TROPICALE SÈCHE OUEST-AFRICAINE ET SES INCIDENCES AGRONOMIQUES (D'APRÈS LES TRAVAUX DES CHERCHEURS DE L'IRAT EN AFRIQUE DE L'OUEST). NOGENT-SUR-MARNE, IRAT, 254 P. (BULLETIN AGRONOMIQUE, N° 23)
- CHAUVEL A • 1977 • RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES. PARIS, ORSTOM, 532 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 62).
- CHAUVEL A / MONNIER A • 1967 • SUR LA SIGNIFICATION GÉNÉRALE DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE EN PÉDOLOGIE. EXAMEN DES PROBLÈMES POSÉS PAR LA CARACTÉRISATION DE LA TEXTURE DE CERTAINS SOLS TROPICAUX. COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES, 264 : 1969-1972.
- CHOPART J L • 1980 • ÉTUDE AU CHAMP DES SYSTÈMES RACINAIRES DES PRINCIPALES CULTURES PLUVIALES AU SÉNÉGAL (ARACHIDE, MIL, SORGHO, RIZ PLUVIAL). THÈSE DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE, PRODUCTIONS VÉGÉTALES ET QUALITÉ DES PRODUITS, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 160 P. ET ANNEXES.
- COINTEPAS J P • 1956 • PREMIERS RÉSULTATS DES MESURES D'ÉROSION EN MOYENNE CASAMANCE (CASAMANCE). IN : 6^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA SCIENCE DU SOL, PARIS, VI, (15) : 569-576.
- COINTEPAS J P • 1960 • BILAN DES ÉTUDES CHIMIQUES ET PÉDOLOGIQUES ENTREPRISES A LA STATION EXPÉRIMENTALE DE SEFA. ORSTOM, 110 P.
- COINTEPAS J P / MAKILO R • 1982 • BILAN DE L'ÉVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURES INTENSIVES DANS UNE STATION EXPÉRIMENTALE EN MILIEU TROPICAL HUMIDE (CENTRE AFRIQUE). CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 19, (3) : 271-282.
- COMBEAU A • 1964 • REMARQUES SUR LES FACTEURS DE VARIATION DES LIMITES D'ATTERBERG. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 2 (4) : 29-39.
- COMBEAU A / MONNIER G • 1961 • MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE. APPLICATION AUX SOLS TROPICAUX. SOLS AFRICAINS, 6, (1) : 5-62.
- COMBEAU A / QUANTIN P • 1964 • OBSERVATION SUR L'ÉVOLUTION A LONG TERME DE LA STABILITÉ STRUCTURALE DE CERTAINS SOLS TROPICAUX SOUS CULTURE ET SOUS JACHÈRE. IN : 8^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA SCIENCE DU SOL, BUCAREST.
- DABIN B • 1954 • LES PROBLÈMES DE L'UTILISATION DES SOLS A L'OFFICE DU NIGER. IN : 1^{er} CONFÉRENCE INTERAFRICAINNE DES SOLS, LÉOPOLDVILLE, II, (92) : 1162-1176.
- DABIN B • 1961 • LES FACTEURS DE LA FERTILITÉ DES SOLS DE RÉGIONS TROPICALES EN CULTURE IRRIGUÉE. BULLETIN SPÉCIAL AFES : 108-130.
- DABIN B • 1969 • ÉTUDE GÉNÉRALE DES CONDITIONS D'UTILISATION DES SOLS DE LA CUVETTE TCHADIENNE. PARIS, ORSTOM, 199 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 2).
- DABIN B • 1970 • LES FACTEURS CHIMIQUES DE LA FERTILITÉ DES SOLS. IN : TECHNIQUES RURALES EN AFRIQUE, PÉDOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT. PARIS, ORSTOM, B.D.P.A., 278 P.
- DABIN B / LENEUF N • 1958 • ÉTUDE DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT EN BASSE CÔTE D'IVOIRE. PARIS, ORSTOM, 20 P. MULTIGR.
- DANCETTE C / FOREST F • 1982 • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE DE L'ARACHIDE EN VUE D'UNE MEILLEURE ADAPTATION DE CETTE CULTURE AUX CONDITIONS TROPICALES. BAMBEY, IRAT, 34 P.

- DANCETTE C / HAMMOUTENE M • BILAN HYDRIQUE SIMULÉ (MÉTHODE F. FOREST) ET TENTATIVE D'EXPLICATION DU RENDEMENT POUR LE MIL ET LE SORGHO : PREMIERS RÉSULTATS. IN : COLLOQUE, RÉUNION DE PLANIFICATION ICRIAT-OMM SUR L'AGROMÉTÉOROLOGIE du SORGHO ET DU MILLET DANS LES ZONES TROPICALES SEMI-ARIDES, HYDERABAD, INDE, 15-19 NOVEMBRE, 8 P.
- DOMMERGUES Y • 1960 • A. INFLUENCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LA TENEUR EN AZOTE MINÉRAL ET SUR QUELQUES CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES DES SOLS. L'AGRONOMIE TROPICALE, 15, (4) : 377-389.
- DOMMERGUES Y • 1960 • B. MINÉRALISATION DE L'AZOTE AUX FAIBLES HUMIDITÉS. IN : 7TH INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, MADISON, WISC, USA, III : 672-678.
- DOMMERGUES Y / MANGENOT F • 1970 • ÉCOLOGIE MICROBIENNE DU SOL. PARIS, MASSON, 769 P.
- DUGAIN F • 1959 • LE SULFATE D'AMMONIAC DANS LE SOL EN CULTURE BANANIÈRE DE BAS-FONDS. FRUITS, 14, (4) : 163-169.
- FAUCK R / MOUREAUX C / THOMANN C • 1969 • BILANS DE L'ÉVOLUTION DES SOLS DE SEFA (CASAMANCE, SÉNÉGAL) APRÈS 15 ANNÉES DE CULTURE CONTINUE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 24, (3) : 263-301.
- FELLER C / MILLEVILLE P • 1977 • ÉVOLUTION DES SOLS DE DÉFRICHE RÉCENTE DANS LA RÉGION DES TERRES NEUVES (SÉNÉGAL ORIENTAL). 1^{re} PARTIE : PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE ET ÉVOLUTION DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 15, (3) : 291-302.
- FOREST F / LIDON B • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE POUR L'EXPLICATION DU RENDEMENT ET L'APPUI AUX PRODUCTEURS. IN : LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE., ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR-NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA PARIS, CILF, 1985 : 55-65, 4 RÉF.
- FOREST F / REYNIERS F N • 1985 • PROPOSITIONS DE CLASSIFICATION EN TERMES DE BILAN HYDRIQUE DES SITUATIONS AGROCLIMATIQUES DE RIZICULTURE PLUVIALE. IN : 2^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LE RIZ PLUVIAL, JAKARTA, INDONÉSIA, 4 MARS, 17 P.
- FORESTIER J • 1960 • FERTILITÉ DES SOLS DE CAFÉIÈRES EN RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 15, (1) : 9-37.
- FOURNIER F • 1967 • LA RECHERCHE EN ÉROSION ET CONSERVATION DU SOL DANS LE CONTINENT AFRICAIN. SOLS AFRICAINS, 12, (1) : 5-52.
- FRANQUIN P / FOREST F • 1978 • UN PROGRAMME DE SIMULATION DE L'IRRIGATION COMPLÉMENTAIRE AUX PLUIES. L'AGRONOMIE TROPICALE, 33, (4) : 377-380.
- FRANQUIN P / MARTIN G • 1962 • BILAN D'EAU ET CONSERVATION DU SOL AU NIARI. RÉPUBLIQUE DU CONGO. COTON ET FIBRES TROPICALES. 1962, 17, (3) : 345-356.
- FRITZ A / VALLERIE M • 1971 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES DÉFICIENCES MINÉRALES SOUS CULTURE COTONNIÈRE DU NORD-CAMEROUN. COTON ET FIBRES TROPICALES, 26, (10) 609-616.
- GODEFROY J / PENEL J P • 1985 • BILAN DE L'ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ D'UN SOL FERRALLITIQUE SOUS VERGER D'AGRUMES EN MILIEU TROPICAL. FRUITS, 40, (7-8), 475-484
- JADIN P • 1975 • L'UTILISATION DU « DIAGNOSTIC SOL » POUR L'ESTIMATION DES BESOINS EN ENGRAIS DES CACAÏÈRES IVOIRIENNES. CAFÉ CACAO THÉ, 19, (3) : 203-220, 5 RÉF.
- JADIN P / SNOECK J • 1985 • LA MÉTHODE DU DIAGNOSTIC SOL POUR CALCULER LES BESOINS EN ENGRAIS DES CACAÏERS. CAFÉ CACAO THÉ, 19, (4) : 255-266.
- LEPLAIDEUR A • 1985 • LES SYSTÈMES AGRICOLES EN ZONE FORESTIÈRE LES PAYSANS DU CENTRE ET DU SUD CAMEROUN. MONTPELLIER : UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC : 614 P. ET ANNEXES (THÈSE 3^e CYCLE : MONTPELLIER I ; ÉCONOMIE RURALE).
- LEPRUN J C • 1985 • ÉTUDE COMPARÉE DES FACTEURS ET DES EFFETS DE L'ÉROSION DANS LE NORD-EST DU BRÉSIL ET EN AFRIQUE DE L'OUEST. RIO DE JANEIRO, EMBRAPA-ORSTOM : 8 P. MULTIGR. (SOUS PRESSE).
- MARTIN G • 1963 • DÉGRADATION DE LA STRUCTURE DES SOLS SOUS CULTURE MÉCANISÉE DANS LA VALLÉE DU NIARI. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 1, (2) : 8-14.
- MARTIN G • 1970 • SYNTHÈSE AGROPÉDOLOGIQUE DES ÉTUDES ORSTOM DANS LA VALLÉE DU NIARI EN RÉPUBLIQUE DU CONGO. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 8, (1) : 63-79.
- MOREAU R • 1978 • INFLUENCE DE L'AMEUBLEMENT MÉCANIQUE ET DE L'INFILTRATION D'EAU SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE D'UN SOL FERRALLITIQUE DANS LE CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE. CAHIERS ORSTOMS, SÉRIE PÉDOLOGIE, 16, (4) : 413-424.
- MOREAU R • 1983 • ÉVOLUTION DES SOLS SOUS DIFFÉRENTS MODES DE MISE EN CULTURE EN CÔTE D'IVOIRE FORESTIÈRE. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 20, (4) : 311-326.
- MOURARET M • 1965 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACTIVITÉ DES ENZYMES DU SOL : L'ASPARAGINASE. PARIS, ORSTOM, 112 P. (MÉMOIRES ORSTOM, 9).
- MOUREAUX C • 1967 • INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ SUR LES ACTIVITÉS BIOLOGIQUES DE QUELQUES SOLS OUEST AFRICAINS. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 5, (4) : 393-420.
- NGUYEN HUGO VAN OLIVIN J / OCHS R • 1984 • SOLS A PALMIERS A HUILE ET A COCOTIERS EN AFRIQUE DE L'OUEST. IN : OLÉAGINEUX, 39, (3), 117-126 ; 39, (4), 189-198, 33 RÉF.
- OCHS R • 1984 • STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DU CONTRÔLE NUTRITIONNEL DES PLANTES PÉRENNES. CRÉATION DE LA NUTRITION MINÉRALE. PROGRAMMATION DES FUMURES. OLÉAGINEUX, 40, (12), 583-590, 10 RÉF.
- OCHS R / OLLAGNIER M • 1977 • EFFET DES ENGRAIS SUR LA COMPOSITION DES LIPIDES PRODUITS PAR DES OLÉAGINEUX TROPICAUX PÉRENNES ET SUR LEUR RENDEMENT OLÉAGINEUX, 32, (10) : 409-422, 38 RÉF.
- OLIVIN J • 1980 • RELATION ENTRE ÉCOLOGIE ET AGRICULTURE DE PLANTATION. OLÉAGINEUX, 35, (2) : 65-78.
- OLLAGNIER M / OCHS R • 1981 • GESTION DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTATIONS INDUSTRIELLES DE PALMIERS A HUILE. ÉCONOMIES D'ENGRAIS. OLÉAGINEUX, 36, (8-9) : 409-417.
- PERRAUD A • 1971 • LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS FORESTIERS DE LA CÔTE D'IVOIRE. THÈSE, UNIVERSITÉ DE NANCY, 134 P.
- PIERI C • 1982 • LA FERTILISATION POTASSIQUE DU MIL PENNISSETUM ET SES EFFETS SUR LA FERTILITÉ D'UN SOL SABLEUX DU SÉNÉGAL. REVUE DE LA POTASSE, 27, (4) : 1-12, 9 RÉF.
- PIERI C • 1983 • BILANS MINÉRAUX DES SOLS CULTIVÉS EN ZONE DE SAVANE HUMIDE DE MADAGASCAR ET D'AFRIQUE DE L'OUEST. IRAT, DIVISION D'AGRONOMIE, 34 P
- REYNIERS F N • CRITÈRES DE TOLÉRANCE A LA SÉCHERESSE DU RIZ PLUVIAL EN FONCTION DU MILIEU EDAPHO-CLIMATIQUE. IN : LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE. ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA, PARIS, CILF, 1985 : 199-212, 11 RÉF.
- RICHARD L • 1976 • DIAGNOSTIC PÉTIOLAIRE DE LA NUTRITION AZOTÉE DU COTONNIER. COTON ET FIBRES TROPICALES, 31, (4) : 429-437, 7 RÉF.
- RINAUDO G • 1973 • FIXATION HÉTÉROTROPHE DE L'AZOTE DANS LA RHIZOSPHÈRE DU RIZ. PARIS, ORSTOM, 214 P. 29 FIG.
- ROCHE P / GRIERE L / BABRE D / CALBA H / FALLAVIER P (IMPHOSGERDAT) • 1980 • LE PHOSPHORE DANS LES SOLS INTERTROPICAUX : APPRÉCIATION DES NIVEAUX DE CARENCE ET DES BESOINS EN PHOSPHORE. PARIS, INSTITUT MONDIAL DU PHOSPHATE, 48 P., 57 RÉF.
- ROOSE E • 1967 • A. QUELQUES EXEMPLES DES EFFETS DE L'ÉROSION HYDRIQUE SUR LES CULTURES. IN : COLLOQUE SUR LA FERTILITÉ DES SOLS TROPICAUX, 19-25 NOV., II : 1385-1404.
- ROOSE E • 1967 • B. DIX ANNÉES DE MESURE DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT AU SÉNÉGAL. L'AGRONOMIE TROPICALE, 22, (2) : 123-152.
- ROOSE E • 1973 • DIX-SEPT ANNÉES DE MESURES EXPÉRIMENTALES DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT SUR UN SOL FERRALLITIQUE SABLEUX DE BASSE CÔTE D'IVOIRE. CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN MILIEU INTERTROPICAL. ABIDJAN, ORSTOM., 125 P. (THÈSE DOCT. ING. FAC. SCI. ABIDJAN, N° 20).
- ROOSE E • 1977 • ÉROSION ET RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST : VINGT ANNÉES DE MESURE EN PETITES PARCELLES EXPÉRIMENTALES. PARIS, ORSTOM, 108 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 78).

- ROOSE E • 1981 • DYNAMIQUE ACTUELLE DE SOLS FERRALLITIQUES ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TRANSFERTS HYDROLOGIQUES ET BIOLOGIQUES DE MATIÈRES SOUS VÉGÉTATIONS NATURELLES OU CULTURÉES. PARIS, ORSTOM, 569 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 130).
- ROOSE E • 1983 • RUISSELLEMENT ET ÉROSION AVANT ET APRÈS DÉFRICHEMENT EN FONCTION DES TYPES DE CULTURES EN AFRIQUE OCCIDENTALE. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 20, (4) : 327-339.
- ROOSE E / GODEFROY J • 1968 • LESSIVAGE DES ÉLÉMENTS FERTILISANTS EN BANANERAIE. IN : FRUITS, 23, (11), PP. 580-584.
- SAMSON C • 1986 • EFFETS DE L'ACIDITÉ DU MILIEU DE CULTURE SUR LE SOJA ET SUR LA SYMBIOSE SOJA-RHIZOBIUM JAPONICUM. ÉBAUCHES DE SOLUTIONS AGRONOMIQUES. MONTPELLIER : ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE : 74 P. (THÈSE DE DOCTEUR INGÉNIEUR, PHYSIOLOGIE DE LA NUTRITION DES VÉGÉTAUX).
- SEGUY L / BOUZINAC S • 1981 • MISE AU POINT DE MODÈLES D'EXPLOITATION EN CULTURE MANUELLE, UTILISABLES PAR LES PETITS PRODUCTEURS DE LA RÉGION DU COCAIS (MARANHÃO, NORD-EST DU BRÉSIL). CONVENTION EMAP/IRAT. 105 P. MULTIGR. (MARANHÃO, EMPRESA MARANHENSE DE PESQUISA AGROPECUARIA - PARIS, INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES ET DES CULTURES VIVRIÈRES).
- STEINMETZ S / REYNIERS F N / FOREST F • EVALUATION OF THE CLIMATIC RISK ON UPLAND RICE IN BRAZIL. IN: LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE. ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA. PARIS, CILF, 1985 : PP. 43-45, 13 RÉF.
- SURRE C • 1968 • LES BESOINS EN EAU DU PALMIER A HUILE. CALCUL DU BILAN DE L'EAU ET SES APPLICATIONS PRATIQUES (C N° 71). OLÉAGINEUX, 23 (3) : 165-167.
- TURENNE J F • 1977 • SHIFTING, CULTIVATION AND FOREST FALLOW IN FRENCH GUYANA. DYNAMICS OF ORGANIC MATTER. IN: IV^e SYMPOSIUM DE ECOLOGIA TROPICAL, 7-11 MARZO. PANAMA, 17 P. MULTIGR.
- VELLY J / EGOUMENIDES C / PICHOT J • 1980 • L'AZOTE EXTRACTIBLE PAR UNE SOLUTION DE KCl ET LA FOURNITURE D'AZOTE A LA PLANTE DANS 40 SOLS TROPICAUX. L'AGRONOMIE TROPICALE 35, (4): 374-380.
- VERLIERE G • 1981 • ÉTUDE PAR LA MÉTHODE DU DIAGNOSTIC FOLIAIRE DE LA FERTILISATION ET DE LA NUTRITION MINÉRALE DU CACAoyer. PARIS, ORSTOM, 276 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 131).
- VERNEY P / WILLAIME P • 1965 • RÉSULTATS DES ÉTUDES DE L'ÉROSION SUR PARCELLES EXPÉRIMENTALES ENTREPRISES AU DAHOMEY. IN : SYMPOSIUM ON THE MAINTENANCE AND IMPROVEMENT OF SOIL FERTILITY, KHARTOUM: 43-53.

L'ÉVALUATION ET L'UTILISATION

DES RESSOURCES EN EAU

DES RÉGIONS SEMI-ARIDES

ET INTERTROPICALES

P. DUBREUIL
ORSTOM-CIRAD

P. 95 ■ INTRODUCTION ■ P. 96 ■ LES RÉSEAUX HYDROMÉTRIQUES - CONCEPTION - GESTION - MÉTROLOGIE / CONCEPTION ET PLANIFICATION / GESTION / MÉTROLOGIE ■ P. 98 ■ ÉLABORATION ET GESTION DES FICHIERS DE DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES / LES FICHIERS PLUVIOMÉTRIQUES / LES FICHIERS HYDROMÉTRIQUES / AUTRES FICHIERS / RENFORCEMENT DES SERVICES HYDROLOGIQUES NATIONAUX ■ P. 100 ■ ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DES GRANDS ET MOYENS BASSINS / LA MÉTHODE / LES ACQUIS ■ P. 102 ■ LES RESSOURCES EN EAU DES PETITS BASSINS DU MILIEU RURAL / LES BASSINS REPRÉSENTATIFS / LES SYNTHÈSES RÉALISÉES / L'EXTRAPOLATION AUX BASSINS NON OBSERVÉS ■ P. 104 ■ L'UTILISATION DES EAUX A DES FINS MULTIPLES - LES MODÈLES HYDROLOGIQUES / MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DES CRUES EXCEPTIONNELLES / MODÈLES HYDROLOGIQUES / MODÈLES DE SIMULATION DE SYSTÈMES D'EAU ■ P. 108 ■ L'UTILISATION DES EAUX POUR LES PRODUCTIONS AGRICOLES ET FORESTIÈRES / MÉTHODE DE CALCUL DE L'ÉVAPORATION / LA RESSOURCE EN EAU ET L'OCCUPATION DU SOL / L'AMÉNAGEMENT DE BASSIN À DES FINS AGRICOLES ET FORESTIÈRES / LES RESSOURCES BIOTIQUES ■ P. 111 ■ ESTIMATION ET EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES / LA CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES / LES CONTRAINTES DE L'EXPLOITATION ■ P. 114 ■ L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DISPONIBLE ■ P. 115 ■ LA FORMATION DES HYDROLOGUES / FORMATION À LA RECHERCHE / PARTICIPATION À L'ENSEIGNEMENT / LES FORMATIONS SPÉCIALISÉES ■ P. 117 ■ LE POTENTIEL ACTUEL D'INTERVENTION ■ P. 118 ■ LES PROBLÈMES ACTUELS ET LES PERSPECTIVES D'AVENIR ■ P. 121 ■ RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SÉLECTIONNÉES ET CLASSÉES ■ P. 137 ■ ANNEXES ■ P. 137 ■ I • ENQUÊTES SUR LES RÉSEAUX (P. CHAPERON) ■ P. 138 ■ II • LE PROJET HYDRO-NIGER ■ P. 139 ■ III • LE RÉSEAU ARGOS EN AMAZONIE BRÉSILIENNE ■ P. 141 ■ IV • SYSTÈMES CHLOË, SYSTÈMES OEDIPE (ORSTOM/ELSYDE) ■ P. 149 ■ V • ANNUAIRES HYDROLOGIQUES ■ P. 149 ■ VI • ÉTAT DES MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM (P. CHAPERON) ■ P. 150 ■ VII • LISTE RESTREINTE D'AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES ÉTUDIÉS ■ P. 150 ■ VIII • L'HYDROLOGIE ET LA TÉLÉTRANSMISSION DANS LE PROGRAMME DE LUTTE CONTRE L'ONCHOCERCOSE DANS LE BASSIN DE LA VOLTA (PHILIPPON, LE BARBÉ, LE BERRE) ■ P. 153 ■ IX • BIBLIOGRAPHIE HYDROLOGIQUE ORSTOM 1950-84

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : F 24241 24.3

Cpte : A

**ASSESSMENT AND UTILIZATION OF
WATER RESOURCES IN SEMI-ARID
AND INTERTROPICAL AREAS**

**P. DUBREUIL
ORSTOM-CIRAD**

**P. 95 ■ INTRODUCTION ■ P. 96 ■ THE HYDROMETRIC NETWORKS - DESIGN -
MANAGEMENT AND METROLOGY / DESIGN AND PLANNING / MANAGE-
MENT / METROLOGY ■ P. 98 ■ DEVELOPMENT AND MANAGEMENT OF
HYDROMETEOROLOGICAL DATA RECORD / PLUVIOMETRIC RECORDS /
HYDROMETRIC RECORDS / OTHER RECORDS / STRENGTHENING THE NA-
TIONAL HYDROLOGICAL SERVICES ■ P. 100 ■ ASSESSMENT OF WATER
RESOURCES OF THE LARGE AND MEDIUM-SIZED BASINS / METHOD /
RESULTS ■ P. 102 ■ WATER RESOURCES FOR SMALL RURAL BASINS /
REPRESENTATIVE BASINS / SYNTHESSES OF RESULTS / EXTRAPOLATION FOR
NOT GAUGED BASINS ■ P. 104 ■ MULTI-PURPOSE USE OF WATER, HYDROLOGI-
CAL MODELS / METHODOLOGY FOR STUDYING FLOODS / HYDROLOGICAL
MODELS / WATER SYSTEMS SIMULATION MODEL ■ P. 108 ■ USE OF WATER FOR
AGRICULTURAL PRODUCTION AND FORESTRY / METHODS FOR CALCULATING
EVAPORATION / WATER RESOURCES AND LAND-USE / BASIN DEVELOPMENT
FOR AGRICULTURE AND FORESTRY / BIOTIC RESOURCES ■ P. 111 ■ ASSES-
MENT AND EXPLOITATION OF AQUIFERS / MAPPING OF RESOURCES / CON-
STRAINTS OF EXPLOITATION ■ P. 114 ■ AVAILABLE TECHNICAL AND SCIEN-
TIFIC INFORMATION ■ P. 115 ■ TRAINING HYDROLOGISTS / TRAINING OF
RESEARCHERS / PARTICIPATION AT UNIVERSITY LECTURES / SPECIALIZED
TRAINING ■ P. 117 ■ THE POTENTIAL FOR ASSISTANCE AT THE CURRENT
TIME ■ P. 118 ■ MAJOR PROBLEMS AT THE PRESENT TIME AND OUTLOOK FOR
THE FUTURE ■ P. 121 ■ CLASSIFIED AND SELECTED BIBLIOGRAPHICAL
REFERENCES P. 137 APPENDICES (*) ■ P. 137 ■ I • NETWORK SURVEYS
(P. CHAPERON) ■ P. 138 ■ II • THE NIGER-HYDRO PROJECT ■ P. 139
■ III • THE ARGOS NETWORK IN THE BRAZILIAN AMAZON ■ P. 141
■ IV • CHLOÉ SYSTEMS, OEDIPE SYSTEMS (ORSTOM/ELSYDE) ■ P. 149
■ V • HYDROLOGICAL YEARBOOKS ■ P. 149 ■ VI • STATUS OF ORSTOM
HYDROLOGICAL MONOGRAPHS (P. CHAPERON) ■ P. 150 ■ VII • PARTIAL LIST
OF HYDRAULIC IMPROVEMENTS STUDIED ■ P. 150 ■ VIII • HYDROLOGY AND
REMOTE TRANSMISSION IN THE ONCHOCERCOSIS CONTROL PROGRAM IN THE
VOLTA BASIN (PHILIPPON, LE BARBÉ, LE BERRE) ■ P. 153 ■ IX • ORSTOM
HYDROLOGICAL BIBLIOGRAPHY 1950-1984**

(*) ONLY IN THE FRENCH VERSION OF THE REPORT.

A partir de 1945, la France a entrepris d'importants travaux d'infrastructure dans les pays francophones d'Afrique occidentale, d'Afrique centrale et à Madagascar. Parmi ces travaux, la production d'énergie hydro-électrique, le dimensionnement des ouvrages de franchissement des cours d'eau pour les voies routières et ferroviaires, l'alimentation en eau des agglomérations comme celles des aménagements hydro-agricoles nécessitaient une connaissance précise des ressources en eau.

Il n'y avait alors qu'un réseau assez lâche de pluviomètres installés au cours de la première partie du xx^e siècle et quelques stations d'observation des niveaux des grands fleuves navigables (Sénégal, Niger, Chari, Oubangui, Congo...).

Tout, ou presque tout, était à faire. Un service hydrologique était créé à l'ORSTOM, en collaboration avec Électricité de France.

Des réseaux hydrométriques ont été implantés dans la plupart des pays. Des méthodes de mesures appropriées ont été élaborées. Le rassemblement des données d'observation et de mesure a été organisé de manière homogène, coordonnée et centralisée au départ, ce qui a permis dès le milieu des années 60 le passage au traitement des données sur ordinateur.

Les méthodes statistiques classiques ont été adaptées au cas particulier des données hydrométéorologiques pour en réaliser l'analyse. L'évaluation des ressources en eau des grands et moyens cours d'eau s'est appuyée sur ces méthodes.

Une technologie particulière de terrain, celle des bassins représentatifs, a été adaptée et intensément développée pour permettre l'estimation des ressources en eau des petits bassins, ceux du monde rural.

Parallèlement à ces observations, mesures et traitement de données, d'importantes et nombreuses études d'hydrologie appliquée aux calculs des aménagements hydrauliques ont été réalisées pour résoudre les problèmes posés par les travaux d'infrastructures, mentionnés en début d'introduction.

La connaissance fondamentale des phénomènes hydro-météorologiques progressait de pair avec ces travaux. Les modèles hydrologiques permettaient de la représenter et d'évaluer les impacts des aménagements. Des modèles de simulation des systèmes d'eau venaient ensuite pour démêler la complexité des grands aménagements régionaux à buts multiples. Une attention particulière est portée à l'utilisation des eaux pour la production agricole et au rôle de la forêt.

Les chapitres de cette note vont traiter successivement de ces méthodes techniques et acquis développés logiquement et accumulés au cours de ces 40 années : les ré-

Beginning in 1945, France became involved in some major infrastructure projects in the French-speaking countries of West and Central Africa and in Madagascar. The projects included hydroelectric energy production, determination of layouts for railroad and road structures used for crossing waterways, and water supply for rural and urban requirements. All required a precise understanding of water resources.

However, only one unsatisfactory network of rain gages was installed in the early 20th century. There were a few observation stations for measuring levels of the major navigable rivers, such as the Senegal, Niger, Chari, Oubangui, Congo, etc. The work would have to start from scratch, or almost. ORSTOM set up a hydrological department in cooperation with Electricité de France.

Hydrometric networks were installed in most of the countries. Methods for taking appropriate measurements were developed. Observations, measurements and data collection were organized following a uniform procedure. There was coordination and centralization from the start, making it possible to begin to process the data on computers as early as the mid 1960's.

Traditional statistical methods were adapted to the special case of hydrometeorological data in order to analyze them. These methods were used for assessment of water resources for large and medium-sized waterways.

A special field technology known as representative basins was adapted and intensive development made it possible to estimate small basin water resources in rural areas.

Along with the observations, measurements and data processing, a large number of major hydrology studies were performed and then applied to the calculations of hydraulic improvements in order to solve problems posed by infrastructure projects mentioned earlier in the introduction.

Basic understanding of hydrometeorological phenomena grew along with these activities. Hydrological models were used to demonstrate the knowledge and to evaluate the impacts of the improvements. Models that simulated water systems came along later to break down the complexity of large regional multipurpose improvements. Special attention was paid to the use of water for agricultural production and to the role of the forest.

The chapters in this document will examine the technical methods developed and the experience gained from logic that have accumulated over the last 40 years: hydrometeorological networks, data records, evaluation of water resources for major waterways and small basins, hydrology applied to improvements and modelling, and use of water for agricultural production.

seaux hydrométéorologiques, les fichiers de données, l'évaluation des ressources en eau des grands cours d'eau et des petits bassins, l'hydrologie appliquée aux aménagements et la modélisation, l'utilisation des eaux pour la production agricole.

Pour être complets, nous consacrerons un chapitre particulier aux eaux souterraines dont évaluation et possibilités d'utilisation font appel à des méthodes et techniques spécifiques.

Les chapitres suivants présenteront l'information scientifique et technique, les activités de formation et les capacités actuelles d'intervention.

La conclusion évoquera les grands problèmes actuels et les perspectives.

Les réseaux hydrométéorologiques. Conception, gestion et métrologie

L'expérience acquise concerne essentiellement les réseaux hydrométriques et, dans une moindre part, liées au développement des bassins représentatifs (p. 102), les observations pluviométriques et les stations bioclimatologiques (p. 108). On traitera ici spécialement des réseaux hydrométriques.

Conception et planification

L'empirisme a présidé à la mise en place des premiers réseaux hydrométriques africains (M. Roche, 1965 ; J. Rodier, 1976).

Des contraintes spécifiques propres aux pays en développement s'imposent en effet à toute mise en œuvre basée sur une conception théorique. Ces contraintes sont :

- l'accessibilité aux stations de mesure rendue précaire par l'insuffisance du réseau routier et les conditions difficiles de circulation en saison des pluies ;
- les ressources financières notoirement insuffisantes devant l'étendue territoriale pour les modestes budgets nationaux ;
- la disponibilité en techniciens hydrométristes locaux.

Les réseaux hydrométriques créés dès les années 50 étaient encore 20 ans après d'une densité de stations trop faible, souvent inférieure aux normes conseillées par l'OMM.

La plupart des stations étaient surveillées par des observateurs locaux. L'introduction des appareils enregistreurs (limnigraphes) s'est faite petit à petit en fonction des ressources et a suivi la formation des techniciens nationaux (p. 113).

Une réflexion développée sur le propre réseau hydrométrique de la France (Dubreuil, 1970) permettait d'ébaucher quelques critères de conception et d'organisation des réseaux. Une méthode de planification en était déduite afin de rendre plus efficace dans leurs produits les réseaux à faibles densités (Dubreuil, Guiscafne, 1971). Elle reposait sur la conception d'assimilation des régions hydrologiques homogènes aux régions physico-climatiques homogènes, et à la répartition des stations en fonction des régions hydrologiques homogènes. Elle fut appliquée au Nord-Est du Brésil (plus de 1 M de km²) pour y implanter un ensemble de bassins représentatifs.

A special chapter will be devoted to subterranean water resources of which assessment and utilization technics are depending of specific methods.

The following chapters will deal with technical and scientific information, training activities and current capabilities for assistance. The conclusion will discuss major problems at the current time and the outlook for the future.

Hydrometeorological network, design, management and metrology

The experience acquired was mainly in the area of hydrometric networks, and to a lesser degree, rainfall observations and bioclimatological stations (p. 102), both linked to the development of representative basins (p. 108). Special attention will be paid to hydrometric networks, in this chapter.

Design and planning

Empiric reasoning prevailed for installing the first hydrometric networks in Africa (M. Roche, 1965 - J. Rodier, 1976).

Specific constraints peculiar to developing countries must be dealt with for all installations based on theoretical design. They are:

- accessibility of measurements stations made tenuous by an insufficient network of roads and by difficult travel conditions during the rainy season;
- financial resources that are notoriously insufficient given the vast amount of land to be covered under small national budgets;
- availability of local hydrometric technicians.

The stations set up as part of the hydrometric networks during the 1950's were still too few and far between twenty years later. Frequently, they are below the standards suggested by the WMO Local observers monitored most of the stations. Recording devices called limnigraphs were introduced little by little based on resources. They came on the scene after the national technicians were trained (p. 113).

A philosophy that had developed in France's own hydrometric network (Dubreuil, 1970) made it possible to begin to prepare a few criteria for network design and organization. One planning method was deduced from this in order to improve the efficiency and results of the too highly dispersed networks (Dubreuil, Guiscafne, 1971). The planning method was based on the concept of combining hydrologically homogeneous regions with physicoclimatically homogeneous regions and on distributing stations based on hydrologically homogeneous areas.

It was applied to Northeast Brazil in an area greater than 1 M. sq. km in order to develop a set of representative basins. Despite these conceptual efforts, the specific constraints remain and will not decrease markedly until the economies of the countries involved develop.

Management

Empirical management procedures and others were used with ORSTOM acting alone and/or in cooperation

Quels que soient ces efforts conceptuels, les contraintes spécifiques demeurent et ne s'atténueront nettement qu'avec le développement des économies des pays concernés.

Gestion

Des procédures de gestion empiriques et variées ont été utilisées, l'ORSTOM agissant tantôt seul, tantôt en collaboration avec un service local ou national.

L'évolution historique de la gestion des réseaux hydro-métriques est donnée dans la figure 1, qui discrimine les différentes procédures d'intervention :

- gestion directe par l'ORSTOM sur budget propre ;
- gestion directe en association avec un service national ;
- direction du service national assurée contractuellement par l'ORSTOM ;
- conseil de gestion au service national.

On y remarquera l'engagement important de l'ORSTOM en Afrique occidentale et surtout centrale en 1958 ; l'accroissement de cet engagement au cours de la décennie suivante, avec activités en Afrique du Nord, enfin une tendance récente au désengagement, malgré quelques nouveaux liens noués en Amérique Latine.

L'enquête sur les réseaux (Annexe 1) dresse un bilan exact des engagements actuels (début 1985) et montre que l'on passe naturellement et logiquement d'une gestion directe (procédures A et B) à des conseils à la gestion (procédures C et D).

Au cours des dix dernières années, l'ORSTOM a facilité la création de services hydrologiques nationaux. Le souhait de l'ORSTOM est de leur rétrocéder la gestion des réseaux. Formation des hommes sur le terrain et transfert des moyens informatiques de traitements des données permettent peu à peu l'émergence de services compétents. Les ressources financières leur manquent hélas bien souvent pour assurer une exploitation et une maintenance correctes des équipements de terrain (p. 98, 100).

Métriologie

Devant les difficiles conditions d'exploitation des réseaux, il a fallu réaliser des prouesses technologiques d'adaptation des matériels à celles-ci. Des méthodes originales de mesure des débits ont été conçues soit pour les très larges fleuves (jaugeages au cercle hydrographique) soit pour les cours d'eau à variation très rapide du niveau d'eau (jaugeages continus, par intégration...).

Le développement industriel d'enregistreurs relativement fiables aux USA et en Europe (Dubreuil, Hlavek, 1970) a permis l'introduction et l'adaptation de ces équipements en milieu tropical, en étroite collaboration avec les fabricants. Une méthodologie simple était également mise au point pour les transports solides en rivières (Nouvelot, 1972).

Les progrès de l'électronique et l'apparition des satellites de communication ont permis dans les récentes années le début d'une révolution technique dans l'acquisition et la transmission des données. L'intérêt des satellites orbitaux était vérifié au cours des tests de terrain (Callede, 1980, 1983). L'utilisation du satellite Argos devenait opérationnelle sur l'ensemble du bassin du Niger; en amont du Nigeria grâce au Projet Hydro-Niger PNUD-OMM (Cf. Annexe II). Elle devait permettre le fonctionne-

ment avec une organisation locale ou nationale.

Figure 1 fait la distinction entre les différents types de gestion et illustre le développement historique de la gestion des réseaux hydro-métriques :

- A: gestion directe par l'ORSTOM sur budget propre;
- B: gestion en coopération avec un service national;
- C: directeur du service national assuré contractuellement par l'ORSTOM;
- D: ORSTOM conseiller du service national.

Une caractéristique importante est l'engagement de l'ORSTOM en Afrique occidentale, et particulièrement en Afrique centrale en 1958, suivi d'une augmentation de son engagement au cours de la décennie suivante, incluant des activités en Afrique du Nord, et enfin une tendance récente à se désengager, malgré quelques nouveaux liens noués en Amérique Latine.

Le sondage des réseaux (Annexe 1) fournit un compte rendu détaillé des engagements actuels (début 1985) et montre qu'il y a une tendance naturelle et logique à passer de la gestion directe (procédures A et B) à un rôle de conseiller (procédures C et D).

Over the last ten years, ORSTOM facilitated setting up national hydrological organizations. ORSTOM would like to see network management transferred back to them. Slowly but surely, field training and transferring computerized data processing capabilities will enable competent organizations to emerge. Unfortunately, they often lack the financial resources to operate and properly maintain field equipment (p. 98, 100).

Métriologie

Considering the difficult conditions of operating the networks, technological feats were necessary to adapt the equipment to the conditions. Some original methods for measuring flows were designed for wide rivers, (such as measurements using a hydrographic sextant), or for small waterways with rapid variations in water levels (integrated continuous measurements of velocities).

The industrial development of relatively dependable recorders in USA and in Europe (Dubreuil, Hlavek, 1970), and close cooperation with the manufacturers made it possible to introduce and adapt the devices to tropical areas. A simple methodology was also developed for suspended sedimentload in rivers (Nouvelot, 1972).

In recent years, progress in electronics and the arrival of communications satellites have helped set off a technical revolution in collecting and transmitting data. The advantages of orbital satellites were confirmed during field tests (Callede, 1980, 1983). The Argos satellite became operational and was used throughout the Niger Basin above the Nigeria through the WMO-UNDP Niger-Hydro Project (see Appendix II). It was to be used to enable operation of a flow rate forecasting system (p. 104). The same remote data transmission technique via Argos is now being installed in the Amazon Basin in Brazil (see Appendix III). These data collection capabilities make it advantageous to adapt the field recorders so that they are compatible with one another. A new system, the Chloé limnigraph, has been designed, combining a piezoelectric pressure sensor, a clock with adjustable programming and a high capacity static memory. Chloé is also able to record water temperature and conductivity. A

ment d'un système de prévision des débits (p. 104).

La même technique de télétransmission des données par Argos est en cours d'implantation sur le bassin brésilien de l'Amazone (Cf. Annexe III).

Avec de telles conditions de collecte de l'information, il devient intéressant d'adapter les enregistreurs de terrain pour les rendre compatibles. Un nouveau système, limnigraphique Chloé a été conçu, associant un capteur de pression piézo-électrique, une horloge à programmation réglable et une mémoire statique de grande capacité. Chloé peut aussi enregistrer températures et conductivités des eaux. Un système pluviographique Oedipe associant un capteur classique à la même mémoire statique a également été conçu.

Ces matériaux adaptés aux climats tropicaux extrêmes ont été testés en diverses conditions (rivières équatoriales en air à 100 % d'humidité, égoûts de Paris, etc.) Ils sont produits par Elsyde sous licence ORSTOM (Annexe IV, IV bis). La télétransmission via Argos est possible pour ces matériels ; elle le sera bientôt via Meteosat.

Élaboration et gestion des fichiers de données hydrométéorologiques

Au milieu des années 60, soit quelques 15 années après le début de la création des réseaux hydrométriques, le volume des informations collectées était devenu tel que la poursuite du traitement manuel n'était plus possible. Il devenait également urgent de procéder à des évaluations régionales des ressources en eau (p. 100). Les ordinateurs commençaient à être accessibles aux scientifiques.

L'ORSTOM décida alors, vers 1966, de moderniser son système centralisé de saisie, de stockage et de traitement des données. Une procédure automatique applicable aux données hydrométriques et pluviométriques était élaborée (M. Roche, 1968) et mise en œuvre progressivement sur l'information issue des réseaux gérés.

Le gouvernement français ayant demandé à l'ORSTOM de rassembler et de publier l'ensemble des données pluviométriques relevées depuis la création des stations en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale, la priorité fut accordée à ce secteur.

Les fichiers pluviométriques

Le rassemblement et la compilation des données pluviométriques historiques devaient rapidement révéler d'importantes anomalies dans des observations confiées à des bénévoles pratiquement sans contrôle : changement de site, défaut d'appareillage, erreurs d'observations, de copies, etc. Une critique des données brutes était indispensable. L'expérience devait permettre d'élaborer une méthode consistante mais laborieuse. La conception du vecteur régional – comparaison des valeurs modales d'une station à celles d'un ensemble régional de stations (emploi d'un algorithme plus puissant que celui des courbes comparées de valeurs cumulées ou « double-mass curves »), et sa mise en œuvre par logiciel de traitement sur ordinateur (Hiez, 1977) devait fournir un outil fiable et performant. Son emploi s'est généralisé ces dernières années pour la production de données pluviométriques dites homogénéisées.

pluviographic system (Oedipe) that combines a traditional sensor with the same static memory has also been designed.

These devices, adapted to extreme tropical climates, were tested under diverse conditions, such as equatorial rivers where the air humidity measures 100 %, Paris sewers, etc. They are produced by Elsyde under a license from ORSTOM (Appendices IV, IVa). These devices are able to transmit data via Argos and data transmission via Meteosat will soon begin.

Development and management of hydrometeorological data records

In the mid 1960's, some 15 years after hydrometric networks were first set up, the volume of data collected became such that manual processing was no longer possible. Furthermore, there was an urgent need to evaluate regional water resources (p. 100). Finally, scientists were beginning to have access to computers. Thus, in about 1966 ORSTOM decided to upgrade its centralized system for acquiring, storing and processing data. An automatic procedure applicable to hydrometric and pluviometric data was developed (M. Roche, 1968). Based on data from the operating networks, the procedure was progressively placed into service. This sector was granted high priority because the French government asked ORSTOM to collect and publish all of the pluviometric data recorded since the inception of the West and Central African stations.

Pluviometric records

Once historical pluviometric data were collected and compiled they quickly revealed major anomalies in observations made by volunteers who were subject to little or no monitoring. The anomalies included site changes, equipment breakdowns, errors in observations, and copies, etc.

The raw data had to be criticized. Experience made it possible to develop a consistent yet cumbersome method. The regional vector concepts, comparing the modal values of one station to those of all stations in a region, (use of an algorithm more powerful than that of double-mass curves), and installing it using computer processing software (Hiez, 1977), was to supply an effective and dependable tool. It has been more and more widely used over recent years to produce what are known as "homogenized" pluviometric data.

During the 1970's, the pluviometric data records that were prepared could be printed directly as they left the computer in the form of complete summary tables of "Daily Precipitation from the Beginning of the Stations through 1965". Volumes were published by the member countries of the Inter-African Committee for Water Studies (Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (CIEH), including Senegal, Mauritania, Mali, Burkina Faso, Ivory Coast, Togo, Benin, Niger, Chad, Cameroon, Congo and Gabon. Since that time the records have been updated periodically, either by ASECNA (Agency for Aircraft Security in Africa), or directly by the countries that collect the data.

Concurrently, pluviographic data processing software that uses variable time intervals has been designed to

Au cours des années 70, les fichiers de données pluviométriques élaborés ont permis l'impression directe en sortie d'ordinateur des tableaux récapitulatifs complets des « Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965 » inclus. Des volumes par pays membre du Comité interafricain d'études hydrauliques CIEH (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Togo, Bénin, Niger, Tchad, Cameroun, Congo et Gabon) ont été publiés.

La mise à jour régulière des fichiers depuis lors s'effectue soit à travers l'ASECNA (Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique), soit directement avec les États collecteurs de données.

Parallèlement, des logiciels de traitements des données pluviographiques à pas de temps variables ont été élaborés pour servir aux problèmes requérant la connaissance des intensités des averses (p. 102, 104).

Les fichiers hydrométriques

Le système de stockage et de traitement est ici plus complexe, puisqu'il doit prendre en compte les niveaux d'eau des rivières, les mesures de débits par jaugeages pour élaborer les courbes d'étalonnage niveaux-débits et les fichiers de débits.

L'évolution rapide des matériels informatiques (ordinateurs et périphériques) en 20 ans, 1965-1985, a conduit l'ORSTOM à revoir plusieurs fois son système de stockage des données (Sircoulon, 1974 ; Vuillaume, 1982).

Le système actuel intègre tous les types possibles de saisie (manuelle, automatique ou par lecteurs numériques) et de transmission (via satellite inclus) et s'efforce d'être compatible avec les principaux matériels utilisés.

Le logiciel Hydrom est opérationnel soit sur gros ordinateur soit sur micro-ordinateur type IBM-PC ou compatible (Cochoneau, 1986).

Les données hydrométriques sont accessibles sous la forme de débits journaliers.

Avant l'introduction de l'informatique, l'ORSTOM a publié chaque année un Annuaire hydrologique, depuis 1949 jusqu'en 1963. Avec l'émergence des services nationaux, les annuaires ont été depuis lors publiés dans les pays. L'ORSTOM a poursuivi jusqu'en 1973 la sortie, imprimée sur ordinateur, d'annuaires sélectionnés pour les pays tropicaux et pour la France d'Outre-mer (Cf. Annexe V). Depuis lors, les données se transmettent plus généralement sur supports magnétiques.

Autres fichiers

Un rassemblement historique de toutes les données climatologiques des stations de base d'Afrique (États membres du CIEH) fut envisagé comme pour les données pluviométriques. L'ORSTOM élaborait la méthodologie de cette opération, qui devait conduire à un nouveau fichier (M. Roche, 1974). L'opération ne fut pas menée à terme.

Les systèmes de banques de données hydropluviométriques décrits ont été déjà transférés et adaptés dans d'autres pays, parfois avec un important travail novateur, eu égard aux contraintes et spécificités locales. Ce fut le cas pour le Brésil (Jacon, Sechet, 1980) et pour la Tunisie. Dans ce pays, une chaîne spéciale de traitement fut ajoutée pour prendre en compte les informations sur les matières dissoutes dans les eaux (Claude, 1974).

solve problems that require knowledge of rainfall intensity (p. 102, 104).

Hydrometric records

These storage and processing systems become more complex, because the system must take the river water levels into account as well as flow rate measurements in order to prepare the level-flow rate calibration curves and flow rate records.

Over the last twenty years, from 1965 to 1985, the rapid development of data processing equipment, including computers and peripherals, has led ORSTOM to review its data storage system on several occasions (Sircoulon, 1974 - Vuillaume, 1982).

The present system combines all possible types of data acquisition (including manual, automatic or digital scanning) and data transmission (including satellite transmission). Moreover, it attempts to be compatible with the major equipment in use. Hydrom software can be operated either on a mainframe or microcomputer such as the IBM-PC or compatible (Cochoneau, 1986). Hydrometric data are accessible as daily flow rates.

Before computers came into use, ORSTOM published a Hydrological Yearbook each year from 1949 until 1963. As the national organizations emerged, each country began to publish yearbooks. Until 1973, ORSTOM continued to put out computerized printouts of selected yearbook for the tropical countries and for French overseas "departments" and territories (See Appendix V). Since that time, the data are usually transmitted on magnetic data transmission media.

Other record

Historical collection of all climatological data from the African base stations, (i.e., the CIEH member countries) was given consideration. ORSTOM developed the methodology for this, which was supposed to result in a new record (M. Roche, 1974), but it was never completed.

The hydro-pluviometric data bank systems described have already been transferred and adapted in other countries, sometimes with a great deal of innovative labor, given the local constraints and specific features. This was true for Brazil (Jacon, Sechet, 1980) and Tunisia. In this latter country, a special processing chain was added in order to take into consideration the data on dissolved materials in water (Claude, 1974).

The development of microcomputers is resulting in a rapid decentralization of data record management. With its Hydrom system especially, ORSTOM is attempting to make these decentralized records compatible and interchangeable. Management is provided either by scattered teams (p. 117) or by national organizations with which ORSTOM has appropriate working relationships.

Le développement des micro-ordinateurs amène une décentralisation rapide de la gestion des fichiers de données. L'ORSTOM s'efforce, avec son système Hydrom en particulier, de rendre compatibles et interchangeables les fichiers ainsi décentralisés, gérés soit par ses équipes dispersées (p. 117) soit par des services nationaux avec lesquels il a des liens appropriés.

Renforcement des services hydrologiques nationaux

Il en est des services hydrologiques nationaux (SHN) comme des services de la recherche agronomique nationale (SRAN) : leur émergence est lente ; leur fonctionnement difficile. Leur soutien et leur renforcement restent une priorité.

L'ORSTOM et l'OMM ont séparément ou en concertation aidé à la constitution de SHN dans la plupart des pays d'Afrique tropicale francophone. Certains pays ont un SHN unique et centralisateur ; d'autres malheureusement ont confié à plusieurs ministères des compétences en matière d'eau, de sorte que plusieurs SHN se concurrencent, aucun n'ayant de « masse critique » suffisante.

Les problèmes cruciaux que rencontrent les SHN africains pour être fonctionnels et efficaces sont pourtant les mêmes :

- un équipement d'enregistreurs de terrain coûteux (parfois offert en dotation) qu'il est très difficile d'entretenir correctement ;
- des obligations de tournées sur le terrain (contrôle des stations, jaugeages) que le manque de véhicule en bon état et de crédit d'essence ne permet que rarement de remplir de manière satisfaisante ;
- des techniciens en quantité beaucoup trop faible, surtout pour le terrain.

Le soutien qui peut être apporté au SHN doit essayer de résoudre ces problèmes ; produire des équipements fiables et peu onéreux, former des hydrologues. Le problème des crédits est d'ordre national. Les pays doivent reconnaître l'importance vitale des SHN.

L'évaluation des ressources en eau des grands et moyens bassins

La méthode

Les stations hydrométriques de réseau ont été créées surtout sur les grands cours d'eau et sur ceux, parmi les moyens, dont l'aménagement — souvent hydroélectrique — à court terme était envisagé. La procédure de gestion pour réaliser les jaugeages des stations reposant logiquement sur des équipes de techniciens itinérantes, les petits cours d'eau ont très rarement été équipés de stations. La rapidité de leurs crues y rend aussi impossible ou improbable la mesure de débits autres que ceux de basses-eaux.

Ce schéma général souffre exceptions dans les petites îles très densément peuplées à bonne infrastructure (Antilles) où des bassins de quelques centaines de kilomètres carrés sont dotés de stations de réseau. Ailleurs, la règle générale fut celle des bassins représentatifs (p. 102).

L'évaluation des ressources en eau des grands et moyens bassins repose donc sur l'exploitation des fichiers

Strengthening the National Hydrological Services

The following is true for both the National Hydrological Services (NHS) and the National Agronomic Research Services (NARS): both are emerging slowly and operations are difficult. Therefore, supporting and strengthening them remain a priority.

ORSTOM and the WMO, either individually or working together, have assisted in setting up NHS's in the majority of French-speaking countries in tropical Africa. Some countries have a unique and centralized NHS; unfortunately, other countries have empowered several ministries to deal with water-related issues, so that several NHS's must compete with each other, while none has a sufficient "critical mass".

However, the critical problems faced by African NHS's in the areas of operation and effectiveness are identical:

- costly field recording equipment, sometimes donated, and quite difficult to maintain properly;
- the need to field survey for monitoring stations and measurements, a lack of vehicles in good condition and insufficient gasoline credits make satisfactory completion of the tasks the exception rather than the rule;
- technicians, especially for the field, are few and far between. Support provided to the NHS's must aim toward solving these problems, producing dependable and inexpensive equipment and training hydrologists. The credits issue is of national importance. Countries must recognize the vital importance of the NHS's.

Assessment of water resources for large and medium-sized basins

Method

The hydrometric stations in the networks were for the most part set up on large waterways and on those (including medium-sized waterways) where short-term development, often hydroelectric, had been under consideration. Since management procedures for taking measurements logically relied upon field survey made by teams of technicians, there were few stations on small waterways.

Small waterways rise swiftly, making it impossible or extremely difficult to measure flow rates other than those for low water. However, there are exceptions to this general description: network stations do exist on heavily and densely populated islands with good infrastructure, such as the French West Indies, where there are network stations on basins of a few hundred square kilometers. Elsewhere, the general rule was that of representative basins (p. 102).

Therefore, assessment of water resources for large and medium-sized basins relies on the use of data records drawn from observations made within networks. Assessment is even more accurate and detailed when the data cover a longer time period and include a sufficient number of properly distributed stations, and when the hydrometric networks are efficiently managed, i.e., when flow rates were measured accurately over the entire range of variation of water levels in the waterways.

This type of assessment is usually done for large river basins, sometimes on a regional or national scale.

Regardless, since no more than a few dozen years of continuous observations where ever available, a statistical

de données extraites des observations faites en réseaux. Elle est d'autant plus précise et détaillée que les données collectées couvrent une plus grande période de temps en un nombre suffisant de stations bien réparties, et que la gestion du réseau hydrométrique a été performante, c'est-à-dire que les débits ont été mesurés avec précision sur l'ensemble de la gamme de variation des niveaux d'eau dans les cours d'eau.

Cette évaluation est généralement entreprise à l'échelle du bassin du fleuve ou d'une grande rivière, parfois à l'échelle d'une région ou d'un territoire national.

Ne disposant néanmoins jamais de plus de quelques dizaines d'années d'observations continues, il a fallu développer un outil statistique approprié au traitement d'échantillons courts et dotés d'une forte variance (Brunet-Morret, 1969).

Un effort méthodologique tout particulier a été fait quant au choix des lois de distribution, aux techniques d'estimation de leurs paramètres et à la mise en évidence de la précision (intervalle de confiance) des valeurs moyennes, médianes, et quantiles à période de retour rares sensées caractériser les régimes hydrologiques. Dès 1964, J. Rodier proposait une classification et une description des caractères principaux des régimes hydrologiques d'Afrique tropicale (J. Rodier, 1964).

Cet arsenal statistique appliqué aux débits moyens annuels, débits mensuels et débits extrêmes de crue et d'étiage, constitue le corps central de l'évaluation (fig. II, III).

La monographie hydrologique comprend cette analyse statistique, la description des facteurs physiques et climatiques qui conditionnent les régimes hydrologiques, la recherche de liaisons significatives entre facteurs conditionnels (surface drainée, pente, pluviosité, nature géologique des terrains, etc.) et caractéristiques hydrologiques.

Les acquis

L'annexe VI donne un état précis des monographies hydrologiques de bassins et synthèses régionales réalisées jusqu'à la fin de 1984. On peut voir que partout où l'ORSTOM est intervenu en matière de gestion de réseau, de telles évaluations des ressources ont été réalisées peu à peu. La figure IV en donne une illustration pour l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale. Quel que soit le degré de couverture géographique atteint, on ne peut considérer l'évaluation des ressources en eau comme achevée. Celle-ci doit être régulièrement mise à jour et sa précision améliorée.

Une évaluation régionale atteint une certaine consistance lorsqu'on dispose d'au moins 30 à 40 ans de données, ce qui est le cas aujourd'hui presque partout. Mais elle doit être réactualisée au minimum tous les 20 ans, au mieux tous les dix ans. Ainsi, certaines évaluations répertoriées dans l'Annexe VI sont-elles déjà à réactualiser.

Les méthodes d'évaluation utilisées reposant sur l'outil statistique impliquent donc l'hypothèse sous-jacente d'invariance du régime hydrologique et d'indépendance des écoulements d'une année sur l'autre. Cette hypothèse n'est évidemment pas totalement justifiée. L'influence des activités humaines sur le milieu peut à long terme modifier certains facteurs conditionnels et donc certaines caractéristiques des régimes (p. 104, 108 et 118). Certains phénomènes météorologiques tels que ceux qui ont engendré la sécheresse continue depuis 1973 dans le Sahel

tool appropriate for processing short-term samples with high variance had to be developed (Brunet-Morret, 1969).

A very special methodology was developed for selecting distribution laws, for techniques used to estimate their parameters and demonstrate the accuracy (known as the confidence interval) of median and average values and quantiles during periods of scarce returns that are presumed to describe hydrological systems. As early as 1964, J. Rodier proposed a classification and description system of the major features of tropical Africa's hydrological regimes (J. Rodier, 1964). This statistical arsenal, applied to annual average flow rates, monthly flow rates and extreme flow rates during floods and lowest levels, is the central body of the assessment (figure II and III).

The hydrological monograph includes this statistical analysis, the description of the climatic and physical factors which condition hydrological regimes, the search for meaningful connections between conditional factors, such as surface drained, slope, rainfall, geological nature of the land, etc., and hydrological features.

Results

Appendix VI provides a detailed account of hydrological monographs on basins and regional syntheses prepared prior to late 1984. It can be seen that wherever ORSTOM became involved in network management, the assessment of resources were done slowly but surely. Figure IV provides an illustration of this for West Africa and Central Africa. Regardless of the degree of geographical coverage, it can not be said that water resources assessment has been finished. Assessment requires periodic updating and increasing accuracy.

Regional evaluations reach a certain consistency as long as 30 to 40 years of data are available, and they are in nearly every case. However, evaluations must be updated at least every 20 years. Every 10 years would be most desirable. Therefore, some evaluations included in Appendix VI must again be updated at this time.

The evaluation methods used are based on statistical tools and thus imply the underlying hypothesis of invariance of the hydrological cycle and independent nature of discharge from one year to the next. Obviously, the hypothesis is not entirely justified. The influence of human activities on the environment may in the long run alter some conditional factors and also some features of the regime (p. 104, 108). Some meteorological phenomena, such as those which have caused continued drought in the Sahel since 1973, must also be considered (p. 118); they challenge the independence of succeeding years and call for more determinism in hydrological analysis (p. 104). The example of the Niger River deserves to be mentioned. During the 1960's a variation in the river's regime was noticed from the inner central delta located in Mali: for the same incoming volume, the rise was higher downstream. This phenomenon of decreasing the damping effect on flood shape of the inner deltaic zone was called the "Niger flood anomaly" (Lamagat, Molinier, 1983). The reasons for the phenomenon are uncertain. It could be erosion of the rocky threshold in the river bed, embankment for rice cultivated areas, upstream that speed up flows, variations of slope induced by microseisms, etc. The phenomenon, observed from 1962 to 1965, has stabilized since that time. Now there is a new flood-

sont également à considérer (p. 118) ; ils remettent en cause l'indépendance des années successives et appellent à plus de déterminisme dans l'analyse hydrologique (p. 104). L'exemple du fleuve Niger mérite d'être mentionné. Dans les années 60, on a détecté une variation de son régime à partir du delta central intérieur situé au Mali : pour un même volume arrivant, la crue est plus forte à l'aval. Ce phénomène de réduction de l'amortissement de la zone d'inondation deltaïque intérieure a été dénommée « anomalie des crues du Niger » (Lamagat, Molinier, 1983). Ses causes sont incertaines : érosion de seuils rocheux dans le lit fluvial, endiguements rizicoles en amont accélérant la propagation du flot, variations de pentes induites par micro-séismes, etc. Le phénomène observé entre 1962 et 1965 s'est stabilisé depuis ; un nouveau rapport volume-crue s'est instauré, différent de l'ancien (fig. V et V bis). Pour combien de temps ? De ce fait, la monographie du Niger a dû être réactualisée (Brunet-Moret, et al., 1986) étant donné l'importance stratégique de ce fleuve pour le développement des pays du Sahel.

Les analyses statistiques réalisées sur de longues séries hydrologiques et pluviométriques dans le cadre de l'objectif d'évaluation des ressources peuvent avoir des effets de retour sur la politique de gestion des réseaux. On peut par exemple *estimer le nombre d'années continues d'observations nécessaires pour atteindre une certaine précision (5,10 %)* avec un certain risque d'erreur (Akmanoglu, 1970). Les figures VI et VII sont assez illustratives à cet égard.

On peut aussi, fort de la connaissance acquise et des liens identifiés entre caractéristiques hydrologiques de diverses stations, proposer une restructuration du réseau hydrométrique avec réduction du nombre de stations, donc du coût de gestion, tout en conservant la même qualité aux résultats à en attendre en termes d'évaluation des ressources (Olivry, 1986 b.).

Les ressources en eau des petits bassins du milieu rural

Les bassins représentatifs

Les villages ruraux pour l'alimentation de leurs habitants et de leur bétail, pour l'irrigation de leurs petits périmètres ont besoin de ressources en eau qu'ils ne peuvent généralement tirer que des petits cours d'eau ou des nappes phréatiques. Les tracés de routes et de voies ferrées franchissent des centaines de petits cours d'eau ; le dimensionnement des ponts requiert la connaissance de leurs crues.

Il est impossible d'équiper tous ces cours d'eau de stations de mesure, d'où le recours à la technique des bassins représentatifs :

- *choisir des bassins* (entre 1 et 200 km² environ) représentatifs du milieu (relief, végétation, sols) ;
- *y observer 2 à 5 ans de façon intense* tous les éléments du cycle hydrologique, en déduire au moins des relations pluies-débits ;
- *disposer des relevés pluviométriques* (réseau plus dense et plus ancien que l'hydrométrie) ;
- *extrapoler les relations pluies-débits* dans le temps sur le bassin représentatif et dans l'espace à d'autres bassins.

volume ratio that differs from the prior one (fig. 5 and 5a), but how long will it last ? Therefore, the Niger monograph had to be updated once again (Brunet-Moret et al., 1986), given the river's strategic importance for development in the Sahelian countries.

Statistical analyses performed using long-term pluviometric and hydrological series as part of the goal of evaluating the resources may have the effect of causing a return to the network management policy. For example, it is possible to *estimate the number of continuous years of observations required to reach an accuracy rate* within 5 to 10 % with a certain risk of error (Akmanoglu, 1970). Figures VI and VII successfully demonstrate this fact.

On the strength of knowledge gained and the links identified between hydrological features of various stations, it is possible to suggest that the hydrometric network be reorganized* by decreasing the number of stations, thereby lowering management costs, while still maintaining the same quality in the results that can be expected in terms of resource assessment (Olivry, 1986 b.).

Water resources for small rural basins

Representative basin

For inhabitants of rural villages and their animals, and for irrigating their small perimeters, small waterways and groundwater tables are usually capable of fulfilling their water supply requirements.

Roads and railroad tracks cross hundreds of small waterways and knowledge of the floods is required to build bridges.

It is not possible to set up measurement stations for all of the waterways. Thus, the representative basin concept must be used:

- *select basins* between 1 and 200 sq km approximately that are representative of the environment in terms of the relief, vegetation and soil;
- *observe* all components of the basins' hydrological cycle *intensively over 2 to 5 years* and from that deduce at least the rain-flow rate relationships ;
- *have available the pluviometric readings* which are more complete and older than the hydrometric readings;
- *extrapolate the rain-flow relationships* in time for representative basins and in space for other basins.

The representative basic technique was tested during the 1950's and widely used as early as 1965 to meet first and foremost the need for infrastructure and to estimate the rare floods which generally occur every ten years. Less than 10 years later, the operation of about 20 basins made it possible to develop the first document used to calculate the ten-year flood of any basin of less than 200 sq km in west Africa.

The technique's advantages led to its expansion. As long as funding was available, the majority of the different physico-climatic environments of ORSTOM's traditional area of operation (p. 96, 100) were equipped with representative basins. All data were collected and processed in a uniform manner. In 1972 a collection of basic data summarized information on approximately 100 basins, 200 with sub-basins (Dubreuil, 1972). Figures VIII shows the geographical distribution.

Expérimentée au début des années 50, la technique des bassins représentatifs a été généralisée dès 1956 pour répondre avant tout aux demandes d'infrastructures, donc pour estimer les crues rares (en général décennales). Moins de 10 ans après, l'exploitation de quelque 20 bassins avait permis d'élaborer une première note de calcul de la crue décennale d'un bassin quelconque de moins de 200 km² en Afrique de l'Ouest.

L'intérêt de la technique conduisit à son expansion. Dans la mesure des moyens financiers disponibles, la plupart des milieux physico-climatiques différents du domaine traditionnel d'intervention de l'ORSTOM (p. 96 et 100) furent équipés de bassins représentatifs.

L'ensemble des données recueillies fut collecté et traité de manière uniforme. En 1972, *un recueil de données de base récapitulait les acquis de quelque 100 bassins, 200 avec les sous-bassins* (Dubreuil, 1972) ; les figures VIII en montrent la répartition géographique.

Les synthèses réalisées

L'information ainsi recueillie permit diverses synthèses concernant *les ressources en eau du domaine sahélien* (Rodier, 1975) et celles *du domaine tropical sec d'Afrique de l'Ouest* (Rodier, 1976). Avec en plus quelques observations à caractère exploratoire, une première connaissance des *ressources du secteur semi-désertique présaharien* (moins de 200 mm/an de pluie) fut esquissée (Roche, Rodier, 1978). L'élaboration des relations pluies-débits au niveau de l'événement averse-crue et au niveau annuel avait permis ces acquis.

La recherche fondamentale sur les phénomènes de genèse des écoulements, du ruissellement et de l'infiltration se développa parallèlement aux travaux appliqués sur les bassins représentatifs. Elle devait permettre la conception des modèles hydrologiques (p. 104) beaucoup plus performants pour réaliser la transformation des pluies en débits à tous pas de temps, et pour assurer la prise en compte de la fréquence des événements.

Cette recherche *mettait aussi en évidence l'importance du rôle des états de surface (sol et couvert végétal) sur la genèse des écoulements* et l'extrême variabilité spatiale de ces états de surface. La compréhension des phénomènes nécessitait que l'on travaillât sur des états de surface homogènes, donc là où la pluie tombe, et l'on recourut au simulateur de pluie pour accélérer l'analyse des fortes averses.

L'emploi du simulateur avait été introduit par les spécialistes de l'érosion qui travaillaient à l'échelle de la parcelle expérimentale de quelque 100 m², sous pluies naturelles (p. 108).

La lourdeur de son emploi amena les hydrologues et les pédologues à concevoir un mini-simulateur couvrant 1 m². Son emploi se répandit (Asseline, Valentin, 1978). Les mécanismes hydrologiques sur bassins furent vérifiés expérimentalement sur parcelles ; ils étaient les mêmes mais le changement d'échelle altérait la perception que l'on en avait (Lafforgue, Naah, 1976).

Les acquis de la mini-simulation de pluie permettaient de progresser dans l'estimation des crues sous grande forêt humide (Casenave, 1982). Ils allaient également permettre de reprendre les relations pluies-débits établies à l'échelle du bassin représentatif et de préparer une nouvelle note de calcul de la crue décennale sur un bassin quelconque (Ribstein, Rodier, 1986). Ce dernier travail est

Syntheses of results

The information collected made possible various syntheses of water resources of the Sahel (Rodier, 1975) and of the dry tropical areas of West Africa (Rodier, 1976). Moreover, through use of a few exploratory observations, initial knowledge of the Presaharian semi-desert sector (less than 200 mm of rain per year) was outlined (Roche, Rodier, 1978).

Drawing up of the rain-flow relationships for the storm flood events and at the annual level made these results possible.

Basic research on the phenomena of runoff generation, surface runoff and infiltration developed along with applied work on the representative basins. This would make it possible to design much more efficient hydrological models (p. 104) to transform rain into flow rates at all time intervals and to ensure that the frequency of the sequences was taken into account.

The research also *underlined the importance of the role of the surface conditions* (soil and vegetal cover) *on runoff generation* and the extreme variability in space of the surface conditions. To understand the phenomena meant that work needed to be done on homogeneous surface conditions where rain falls. Thus, a rain simulator was used to accelerate analysis of heavy storms. Erosion specialists who worked with experimental plots of about 100 square meters with natural rain (p. 108) were the first to use the simulator.

Difficulty of use led hydrologists and soil scientists to design a mini-simulator that covered 1 square meter. It came to be more and more widely used (Asseline, Valentin, 1978). The hydrological mechanisms on the basins were checked on an experimental basis on the plots. They were the same, but the change in scale altered the perceptions of the mechanisms (Lafforgue, Naah, 1976).

The results of the rain simulation led to progress in estimating the floods in rain forest (Casenave, 1982). They would also make it possible to resume working with the rain-flow rate relationships developed on the representative basin scale and to prepare a new document for calculating the ten-year flood of any basin (Ribstein, Rodier, 1986). The latter is still in progress.

A recent review of the results of research done on small surfaces confirmed the development of knowledge over 30 years, the importance of the surface conditions and the noteworthy explanatory role of modelling (Dubreuil, 1985).

Three figures are illustrating the main results obtained in this fields:

Figure IX shows that using modelling and long duration rainfall series, we can assess the annual yield distribution law for a small catchment.

Figure X represents runoff capability for heavy storms taking in consideration drainage area, slope (R factor) and infiltration capacity (P factor) on the catchments.

Figure Xa summarizes occurrences of annual low flow in a catchment regarding rainfall and geology as parameters.

Figure Xb summarizes the more evident relationships drawn up to assess the peak discharge, rise time and base time for a big flood.

en cours. Une synthèse récente des acquis de la recherche sur faibles surfaces a confirmé l'évolution des connaissances sur 30 ans, l'importance des états de surface et le rôle explicatif notable de la modélisation (Dubreuil, 1985). Trois figures permettent d'illustrer en partie les résultats des synthèses réalisées :

- *figure IX* : elle montre qu'avec l'usage des modèles et la connaissance des longues séries de pluie, on peut estimer la distribution statistique de l'écoulement annuel d'un petit bassin ;
- *figure X* : elle représente la potentialité du ruissellement pour de très fortes averses en fonction de la superficie, de la pente (facteur R) et de la perméabilité (facteur P) des bassins ;
- *figure X bis* : elle récapitule les risques moyens d'occurrence d'étiage annuel d'un bassin selon la pluviosité et la nature géologique des terrains ;
- *figure X ter* : elle récapitule les relations les plus caractéristiques obtenues pour l'évaluation du débit maximal des temps de montée et de base d'une forte crue.

L'extrapolation aux bassins non observés

L'objectif pratique de ces travaux sur bassins représentatifs est bien d'appliquer les résultats à des bassins sans observations ni mesure. Ce transfert d'information hydrologique (Dubreuil, 1973) requiert une description précise du milieu des bassins considérés. Diverses solutions ont été proposées.

Le recours à une description du milieu par quelques paramètres simples, aisément calculables (précipitation, évapotranspiration, pente, surface...) a fourni une estimation raisonnable (souvent à 20 %, parfois à 50 % près) de l'écoulement annuel (Dubreuil, Vuillaume, 1975). Cette procédure est cependant trop simpliste.

La complexité du milieu ne peut être bien perçue qu'à travers une typologie descriptive et classificatrice des bassins versants.

Elle repose sur une estimation globale de la capacité d'infiltration du bassin, organisée en 5 ou 6 classes. Cette capacité associée à un facteur de pente constitue une estimation de l'aptitude à l'écoulement d'un bassin.

Cette typologie ne peut être le fait que d'un hydrologue très expérimenté et connaissant bien le milieu. L'on s'efforce de la simplifier au maximum pour la rendre utilisable à tout aménagiste non hydrologue. Un travail conjoint CIEH-ORSTOM-OMM est en cours dans ce sens à partir des synthèses déjà publiées.

Un grand espoir est également lié à l'utilisation de paramètres de réglage des modèles dont l'estimation soit aisée et qui soient liés à des caractéristiques intrinsèques des bassins (p. 104).

Tout ceci est loin d'être inutile. Dans les mêmes conditions climatiques, selon les sols et le couvert végétal, *les caractères hydrologiques varient souvent de 1 à 10, parfois de 1 à 50 d'un bassin à un autre. Une précision de 50 % sur l'estimation des caractéristiques d'un bassin inconnu est accessible par les méthodes développées et représente un gain appréciable.*

L'utilisation des eaux à des fins multiples, les modèles hydrologiques

La conception de la plupart des aménagements d'in-

Extrapolation for basins not observed

The practical goal of the researches that involve representative basins is to apply the results to basins for which there were no observations or measurements. Such a transfer of hydrological information (Dubreuil, 1973) necessitates an accurate description of the environment of basins considered. Various solutions have been suggested.

The use of an environmental description through a few simple parameters that can be easily calculated, such as precipitation, evapotranspiration, slope and surface, provided a reasonable estimate, often within 20 % and occasionally within 50 % of the annual discharge (Dubreuil, Vuillaume, 1975). However, this procedure is too simplistic.

The complexity of the environment can be properly perceived only through a descriptive and classified typology of river basins. It relies on a comprehensive estimate of the basin's infiltration capacity, divided in 5 or 6 categories. This capacity, combined with a slope factor, provides an estimate of a basin's natural tendency for runoff.

The typology can only be developed by a highly experienced hydrologist well acquainted with the environment. Efforts are being made to simplify it as much as possible so that any non-hydrologist engineer may use it. Toward this end, a joint project among CIEH, ORSTOM and WMO is underway using previously published syntheses.

Moreover, there is great hope for using parameters to adjust models that are easy to estimate and depending on basins characteristics (p. 104).

All of this is actually quite useful. Under the same climatic conditions, depending upon the soil and vegetal cover, *hydrological parameters often vary from 1 to 10, and sometimes from 1 to 50, from one basin to another. The methods developed provide 50 % accuracy for estimating an unknown basin's hydrological values and represent appreciable progress.*

Multi-purpose use of water, hydrological models

... The design of the majority of infrastructure improvements made for almost 40 years in tropical Africa has necessitated the availability of special information on water resources:

- taking water run-of-river for various usages, such as irrigation and navigation, require evaluation of low water flow rates, their chronological succession and their statistical distribution;
- road and railroad structures for crossing large or small waterways are calculated on the basis of the flood peak discharges of ten-year or lower frequency, on basis of the size of the structure or the amount of safety sought for the road or track;
- often, reservoirs are used to produce electricity and supply water for irrigation perimeters. Determining the size of the reservoirs is based on knowledge of the river yields (such as the average, statistical distribution, long-term sequence), and heavy floods for spillways design.

Furthermore, water supply and sanitation for rapidly growing developed urban areas could be mentioned. Appendix VII provides a limited list of major water develop-

frastructure, entrepris depuis près de 40 ans en Afrique tropicale, requiert la disponibilité d'une information particulière relative aux ressources en eau :

- les prélèvements au fil de l'eau sur les grands fleuves pour divers usages (irrigation, navigation) dépendent d'une évaluation des débits de basses eaux, de leur succession chronologique, de leur distribution statistique ;
- les ouvrages routiers ou ferroviaires de franchissement de cours d'eau — grands ou petits — se calculent avec un débit maximal de crue de projet de probabilité décennale ou, plus rare, selon l'importance de l'ouvrage ou la sécurité recherchée pour la voie ;
- la production d'électricité et l'alimentation de périmètres irrigués s'effectuent bien souvent à partir de réservoirs dont le dimensionnement s'appuie sur la connaissance des apports (moyenne, distribution statistique, séquence de longue durée...) et des crues exceptionnelles (déversoirs).

On pourrait mentionner aussi l'alimentation en eau et l'assainissement des agglomérations urbaines en voie de croissance très rapide. L'annexe VII fournit une liste restreinte d'aménagements étudiés.

L'ensemble des calculs hydrologiques pour les divers types d'aménagement s'effectue donc à partir de la connaissance des principales caractéristiques des ressources en eau évoquées (p. 100, 102) : apports annuels, étiages et crues.

Les principaux problèmes d'ordre méthodologique posés par ces calculs peuvent se grouper en 3 rubriques :

- détermination des crues de fréquence rare, généralement non observées ;
- constitution de longues séries successives homogènes de débits annuels ou mensuels ;
- satisfaction de la demande par une fourniture adéquate.

Ces problèmes se traitent à l'aide de méthodologies particulières pour les crues, à l'aide de modèles hydrologiques et de simulation pour les deux autres.

Méthodologie d'étude des crues exceptionnelles

Plus l'aménagement est important, plus sa protection requiert le calcul d'une crue de fréquence rare : décennale pour un petit cours d'eau, décennalénaire pour un grand réservoir sur un grand fleuve. Dans tous les cas, l'information disponible est insuffisante pour que l'ajustement d'une loi statistique généralement dissymétrique puisse se faire avec une bonne précision ou bien il n'y a pas d'information sur le site (cas général du petit bassin).

La méthode passe d'abord par une connaissance des précipitations exceptionnelles. L'information les concernant est généralement plus longue et de répartition plus dense (p. 96). La variabilité statistique des échantillons est relativement moindre que celle des crues.

On a très vite procédé, par exemple en Afrique de l'Ouest, à une synthèse générale des connaissances sur les averses exceptionnelles à l'échelle journalière (Brunet-Moret, 1968).

Cette synthèse cartographique repose sur une régionalisation de l'ajustement d'une loi de Pearson III aux échantillons de pluies journalières (fig. XI, XII). Des travaux comparables ont été répétés ailleurs depuis.

Pour les événements déca-millénaires et pour les pluies cycloniques (Antilles, Pacifique Sud), il faut rechercher la pluie maximale probable, par transposition régionale, selon des règles empiriques, faute de connaissance suffisante

ments that have been studied. All of the hydrological calculations for the various kinds of hydraulic works are made on the basis of knowledge of the major features of water resources mentioned (p. 100, 102), such as annual yield, lowest water levels and floods.

The main methodological problems posed by the calculations can be grouped into three categories:

- determination of infrequent floods that generally are not observed;
- development of long, homogeneous and successive series of monthly or annual flow rates;
- meeting the demand through adequate supply.

These problems are dealt with using special methodologies for floods and by using hydrological models and simulation models for the other two categories.

Methodology for studying exceptional floods

The larger the development, the more a calculation of an infrequent flood is needed to protect it. Calculations are done in ten-year frequency for small waterways and in ten thousand year frequency flood for large reservoirs on a major river. In any case, either there is not enough available information to develop a sufficiently accurate generally dissymmetrical statistical law, or their is no information available on the site. The latter is the general situation for small basins.

First of all the method must obtain knowledge of exceptional precipitations. Relevant information generally covers longer periods and is more densely distributed (p. 96). The statistical variability of rainfall samples is relatively speaking not as great as that for floods.

In West Africa, for example, a general synthesis of knowledge of exceptional precipitations on a daily basis was developed (Brunet-Moret, 1968). This cartographical synthesis is based on a regionalization of the adjustment of a Pearson III law to daily rain samples (fig. XI and XIII). Comparable surveys have been repeated elsewhere since that time.

For sequences that occur every ten thousands years, and for cyclonic rains in the West Indies and the South Pacific, the maximum probable rain is required, through regional transposition, according to empirical rules, because the lack of precise knowledge about the air masses.

Next the method changes precipitation into flow rates by applying either the gradex technique (beyond a certain amount, all increments of rain are changed into flow, hence a translation of the laws of distribution), or the single hydrogram and surface runoff coefficient developed on a representative basin (p. 102). For the above mentioned extreme events, checking the results against published catalogues with regional envelope curves for the maximum probable flood is useful.

Use of this rather complex method requires extensive experimental knowledge in the environment. It has been improved over time and described in detail on several occasions (Roche, 1973; Rodier, 1971 b, 1983). For the small basins, it is noteworthy that the time span used must be smaller than one day. This is essential for determining the size of urban sanitation networks. This problem is especially serious in tropical cities. Toward this end, an original methodology had to be designed in order to take into account both the nature of the type of urban development and urban growth (Rodier, 1977). As for the distribution of rain over time (shape of the rainfall pat-

sur les masses d'air.

La méthode passe ensuite par une transformation de la précipitation en débits en appliquant soit la technique du gradex (au-delà d'un certain seuil, tout incrément de pluie se transforme en débit, d'où une translation des lois de distribution), soit celle de l'hydrogramme unitaire et du coefficient de ruissellement (élaborée sur bassin représentatif : p. 102).

Pour les événements extrêmes déjà cités, un contrôle du résultat à l'aide des catalogues publiés des courbes-enveloppes régionales de la crue maximale probable n'est pas superflu.

Cette méthode assez complexe requiert une forte connaissance expérimentale du milieu pour être appliquée. Elle a été affinée avec le temps et décrite avec détails à plusieurs occasions (Roche, 1973 ; Rodier, 1971 b, 1983).

On notera que pour de petits bassins, il faut descendre à un pas de temps inférieur à la journée. Ceci est indispensable pour le dimensionnement des réseaux d'assainissement urbain. Dans les villes tropicales, ce problème est particulièrement aigu. Une méthodologie originale a dû être conçue à cet effet pour tenir compte à la fois de la nature du type d'urbanisation et de la croissance urbaine (Rodier, 1977). Pour ce qui est de la répartition de la pluie dans le temps (forme de l'averse), les informations fournies par les réseaux pluviographiques de mesure sont rares et de très courte durée. Il a donc fallu rechercher les relations entre formes d'averses et hauteur de pluie afin d'aller au-delà des classiques courbes d'intensité-durée de forme exponentielle décroissante (Le Barbe, 1982).

Des mesures expérimentales de débits de crue ont eu lieu dans les principales villes africaines : Abidjan, Ouagadougou, Niamey, Maradi, Lomé, Cotonou, Libreville, etc. Une synthèse est en cours.

Modèles hydrologiques

Les modèles stochastiques de relation pluies-débit au niveau de l'évènement averse-crue ont déjà été évoqués, qu'il s'agisse de l'analyse des observations faites sur bassins représentatifs (p. 102) ou du calcul des crues sur petits bassins (p. 104, 95).

Les modèles conceptuels déterministes offrent un intérêt plus large. Ils ont été développés dès la fin des années 60, pour faciliter la compréhension de phénomènes hydrologiques sur petits bassins, puis pour reconstituer de longues séries de débits à partir des précipitations.

On dispose aujourd'hui de deux types de modèles hydrologiques déterministes : les modèles globaux et les modèles maillés.

Les modèles globaux reposent sur l'hypothèse d'une réponse homogène (globale) d'un bassin à une pluie. Ils sont applicables aux petits et très petits bassins (moins de 100 km²). Ils fonctionnent généralement au pas de temps journalier, mais peuvent pour certains d'entre eux être utilisés à des pas de temps horaire et mensuel.

Leur fonction de production est soit une relation de type stochastique entre pluie et débit, si la part du ruissellement direct est prépondérante, soit une représentation par réservoirs du cycle de l'eau aussi réelle que possible de ce cycle.

Le modèle global à ruissellement direct a été utilisé avec succès sur quelques 30 à 40 bassins représentatifs

(tern), information supplied by the pluviographic measurement networks are scarce and of very short duration. Therefore, the relationship between the patterns and amounts of rainfall had to be established in order to progress beyond the traditional decreasing exponential intensity-duration curves (Le Barbe, 1982).

Experimental measurements of flood flow rates have been taken in the major African cities such as Abidjan, Ouagadougou, Niamey, Maradi, Lome, Cotonou, Libreville, etc. A synthesis is underway.

Hydrological models

Stochastic models expressing the relationship between rainfall and flow discharge for a storm event have already been mentioned, both in terms of the analysis of observations made at representative basins (p. 102) and the calculation of floods for small basins (p. 104, 95).

Deterministic conceptual models are more useful. They were developed back in the late 1960's to facilitate understanding of hydrological phenomena in small basins and to reconstitute long series of flow rates from precipitations. Today two types of deterministic hydrological models are available: global and grid models.

The global models are based on the hypothesis of a uniform or overall response of a basin to rain. These models are applicable to small and very small basins of less than 100 sq km. Generally, they are used with daily intervals but some of them can be used on an hourly or monthly basis. Their production function is either a type of stochastic relationship between rain and flow rate as long as the percentage of direct surface runoff is preponderant, or a reservoir based representation of the water cycle, as realistic as possible.

The overall direct surface runoff model was successfully used for about 30 or 40 representative basins in semi-arid Africa in order to evaluate the statistical distribution of annual yields (Girard, 1975).

The global reservoir or water balance models are able to reproduce the functions of all permeable basins where infiltration and delayed flow exists where the aquifers are fed. They have been applied not only in tropical Africa but in Tunisia and the French West Indies as well (Ibiza, 1985).

Work is now in progress to make them usable for basins that have not yet been observed. This requires a choice of model adjustment parameters such as those that may be determined from the environmental features. Of course, the accuracy will not be as great, but hopefully will be high enough to be used during the preliminary design phase of development projects.

The grid models or spatially distributed models are used for heterogeneous basins regardless of the area. The square grid is generally used. The size of the square grid is such that at least 100 or so grids are available so that the basin is properly divided up. The grids can be grouped and it is possible to use sub-basins instead of grids, in order to fit better the homogeneous areas.

The models include a production function which may be different, at least for the values attributed to the parameters for each grid, and a transfer function which takes into account the nature and shape of the drainage network, including lakes, dams and flood plains.

This grid model, documented in the early 1970's (Girard, 1972), has been used on a large number of dif-

de l'Afrique semi-aride pour en évaluer la répartition statistique inter-annuelle des apports annuels (Girard, 1975).

Les modèles globaux à réservoirs ou de bilan hydrique sont aptes à reproduire le fonctionnement de tous bassins perméables dans lesquels il y a de l'infiltration, de l'alimentation de nappes et de l'écoulement retardé. Ils ont été appliqués non seulement en Afrique tropicale mais en Tunisie et aux Antilles (Ibiza, 1985).

On travaille actuellement à les rendre utilisables sur des bassins n'ayant pas fait l'objet d'observation. Ceci nécessite un choix de paramètres d'ajustement des modèles tel que ceux-ci puissent être déterminés à partir des caractéristiques du milieu. La précision sera certes moindre, mais on l'espère suffisante pour servir au stade des avant-projets d'aménagement.

Les modèles maillés servent pour les bassins hétérogènes de superficie quelconque. La maille carrée est généralement utilisée, de taille telle que l'on dispose d'environ 100 mailles au moins pour avoir un bon découpage du bassin. Le groupage des mailles est possible. L'emploi de sous-bassins au lieu de mailles aussi.

Ces modèles comportent une fonction de production, qui peut être différente au moins quant aux valeurs attribuées aux paramètres pour chaque maille, et une fonction de transfert qui prend en compte nature et forme du réseau hydrographique, y inclus lacs, barrages et plaines inondables.

Ce modèle maillé documenté au début des années 70 (Girard, 1972) a été utilisé sur de multiples bassins aussi divers qu'un oued sahélien de Mauritanie ou que le rio Paraiba do Sul au Brésil, etc.

Son articulation avec un modèle hydraulique maillé de nappe aquifère a pu être récemment réalisé en association avec l'École des Mines de Paris (Girard, 1981). Il permet un emploi quasi-général sur tout grand bassin comportant des aquifères notables. Ceci a été réalisé sur plusieurs cas concrets en France.

Modèles de simulation des systèmes d'eau

L'aménagement d'un grand bassin est généralement à buts multiples. Il y existe des demandes de fournitures d'eau pour l'irrigation, l'alimentation urbaine, l'industrie, la production d'énergie, etc. Ces demandes peuvent être concurrentielle vis-à-vis d'une ressource donnée. Elles peuvent être dispersées dans le bassin et elles vont se développer avec le temps.

Il faut donc à la fois *dimensionner de façon optimale les réservoirs, préciser les périodes de mise en activité et satisfaire les demandes.* Pour ces systèmes d'eau complexes, on a jusqu'à maintenant élaboré des modèles descriptifs du système, donc non transférables, même si beaucoup de leurs procédures internes le seraient. Leur conception générale remonte au milieu des années 70 (Roche, 1973).

La mise en œuvre s'est faite au gré des besoins. L'un des exemples parmi les plus complexes et les plus intéressants est celui du système des eaux du nord de la Tunisie. Le modèle Eautun (Dosseur, 1982) y simule en effet de nombreux réservoirs sur des bassins voisins, destinés à alimenter en eau Tunis et des périmètres irrigués (fig. XIII, XIV). L'importance de la demande et la faiblesse de la ressource a conduit à :

- procéder à des interconnexions entre réseaux d'alimentation dont le modèle seul a permis l'optimisation ;

ferent basins, from a Sahelian "oued" in Mauritania, to the rio Paraiba do Sul in Brazil, etc.

It was recently combined with a grid hydraulic model of an aquifer with the cooperation of the Ecole des Mines in Paris (Girard, 1981). This combined model can be used almost universally for any large basin with significant aquifers. This was demonstrated in several specific cases in France.

Water systems simulation models

Large basins are generally developed for a number of purposes. There is a demand for water to be used for irrigation, urban water supply, industry, energy production, etc. There may be competition among the demands for one given resource. The demands may be distributed throughout the basin and increase as time goes by.

Therefore, optimal reservoir sizes must be determined, start-up dates must be established and demands must be met. For these complex water systems, descriptive system models have already been developed. Thus, they are not transferable, even if many of their internal procedures or routines are transferable. In general terms, these models were designed back in the mid 1970's (Roche, 1973).

Implementation has been a product of needs. One of the most complex and most interesting examples is the water system of northern Tunisia. The Eautun model (Dosseur, 1982), simulates a number of reservoirs in neighboring basins, intended to supply Tunis and irrigated perimeters with water (fig. XIII and XIV). The great demand and limited supply led to:

- interconnecting supply networks where the model alone provided optimization;
- developing rules for limiting supply when resources were insufficient, leading to management in real time;
- taking into account the quality of water that occasionally was very salty and therefore not fit for human consumption or even for growing certain kinds of crops.

There is great diversity in the work being performed at the current time in the area of simulation. Research is now being performed on modular models where transposition is easier, given the agronomic and economic conditions both for rules of limiting supply and for seeking the optimal cost of the system.

- élaborer des règles de restrictions de fourniture en cas de ressources insuffisantes ouvrant sur une gestion en temps réel ;
- prendre en compte la qualité des eaux parfois très salées donc inaptes soit à l'alimentation humaine, soit même à certaines cultures.

Les travaux actuels dans le domaine des modèles de simulation sont variés : recherche de modèles modulaires dont la transposition soit plus aisée, prise en compte des conditions agronomiques et économiques tant au niveau des règles de restriction de fourniture qu'à celui de la recherche du coût optimal du système.

L'utilisation des eaux pour les productions agricoles et forestières

Le couvert végétal joue un rôle de premier plan dans le cycle de l'eau. Il est consommateur d'eau pour sa croissance et producteur de l'évapotranspiration. La part de celle-ci en moyenne annuelle dans les régions semi-arides peut représenter 60 à 95 % de l'apport des précipitations selon que le sol est perméable ou non et que la végétation est plus ou moins dense.

De tous les utilisateurs d'eau (p. 104) l'agriculture est la plus grand consommateur net, tout particulièrement si elle se pratique en système irrigué. On peut aborder cette importante question sous deux aspects. Celui de la ressource en eau disponible à diverses échelles régionales d'une part ; celui de la satisfaction de la demande en eau de la plante cultivée d'autre part. Il est cependant nécessaire au préalable de traiter de l'évaporation, en l'occurrence terme clé du bilan hydrique.

Méthodes de calcul de l'évaporation

Les méthodes utilisant les lois de la thermodynamique (bilans énergétiques et aérodynamiques) ont été appliquées en régions tropicales comme ailleurs à l'échelle de la station expérimentale (bacs, quelques mètres carrés), à côté de méthodes énergétiques (Priestley-Taylor ou Penman) et statistiques (Dalton). On peut citer, entre autres, les travaux réalisés à N'Djamena, Brazzaville et Tunis (Riou, 1975, 1980) ayant montré, par exemple, diverses corrélations entre types de bacs d'évaporation en fonction de l'environnement (effet d'advection) et entre évaporation et rayonnement solaire. La plupart des travaux d'agroclimatologie en station sont de cette nature et font l'objet d'un autre exposé à ce séminaire.

Plus intéressante pour la connaissance à l'échelle du bassin ou de la région est *l'étude de l'évaporation des grands plans d'eau libre* (Lac Tchad, Lac de Bam et Mare d'Oursi au Burkina-Faso, lacs collinaires du Nord-Est brésilien). Cette étude a montré que pour des surfaces d'eau dépassant le kilomètre carré, le calcul de l'évaporation était réalisable, soit à l'aide de corrélations avec des mesures sur bacs ou avec des paramètres climatiques (température, rayonnement) aux pas de temps mensuel et annuel, soit par l'approche énergétique — formules de Priestley-Taylor ou de Penman — au pas de temps mensuel, soit enfin par la méthode des transferts globaux de masse — formule de Dalton — à tous les pas de temps du jour à l'année (Pouyaud, 1985).

Use of water for agricultural production and forestry

The vegetal cover plays a paramount role in the water cycle. It consumes water in order to grow and produces evapotranspiration (sic). The average natural share of the latter in semi-arid areas may be 60 to 95 % of the precipitation depending on whether the soil is permeable or not and whether the vegetation is more dense or not so dense.

Of all water users (p. 104), agriculture is the largest net consumer, especially where there is irrigation. There are two ways of analyzing this important issue: first, the available water resources at various regional levels; and second, meeting the demand for water made by crops. However, evaporation must be dealt with first, because it is the key term in water balance.

Methods for calculating evaporation

Methods that use laws of thermodynamics, such as energy and aerodynamic balances, have been applied in tropical regions and elsewhere on the scale of experimental point stations using tanks of several square meters. They are used alongside energy methods (Priestley-Taylor or Penman) or statistical methods (Dalton). To name a few, the work done in N'Djamena, Brazzaville and Tunis (Riou, 1975, 1980) can be mentioned. For example, they showed various correlations among different types of evaporation tanks as a function of the environment (advection effect) and between evaporation and solar radiation. Most of the agroclimatology work done in stations is similar to the above description and is the subject of another presentation in this seminar.

Of greater interest for understanding the basin and regional scales is the study of evaporation of large stretches of free water, such as lake Chad, Lac de Bam and Mare d'Oursi in Burkina Faso, and small reservoir lakes of Northeast Brazil. The study showed that it was possible to calculate evaporation for water surfaces greater than one square kilometer, either by using correlations with tank measurements or climatic parameters such as temperature and radiation on a monthly or annual basis, or by using the energy approach, i.e., the Priestley-Taylor or Penman formulas on a monthly basis. Finally, evaporation could be calculated using Dalton's formula, the overall mass transfers, at any time interval between one day and one year (Pouyaud, 1985).

It should be noted that the methods for calculating evaporation described above are used as an approach to the hydrological models described page 104. In fact, evaporation is the "motor" of a basin's water cycle.

Water resources and land use

One of three things can happen to precipitation that falls on a basin: immediate surface runoff, infiltration or evaporation. The relative percentage of each largely depends on the soil characteristics and land uses. Research on representative basins (p. 102) has shown the considerable variations that occur depending upon the nature of basins with natural vegetation or where there is little agriculture. The large number of studies carried out on experimental plots (100 square meters) in stations

On notera que les méthodes de calcul de l'évaporation ainsi décrites sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques (décrits p. 104), l'évaporation étant en fait le « moteur » du cycle de l'eau sur un bassin.

La ressource en eau et l'occupation du sol

Les précipitations tombant sur un bassin ont trois devenir possibles : le ruissellement immédiat, l'infiltration ou l'évaporation. La part relative de chacun de ces devenir dépend pour beaucoup du sol et de l'occupation du sol. Les recherches sur bassins représentatifs (p. 102) ont montré les écarts considérables qu'il y avait selon la nature des bassins sans végétation naturelle ou peu cultivés. Les nombreux travaux sur parcelles expérimentales (souvent de 100 mètres carrés) en stations réalisés dans toute l'Afrique occidentale ont permis de montrer (Roose, 1977) :

- que l'équation de pertes en terre de Wischmeier était applicable en région tropicale, après réglage de ses divers paramètres ;
- que ruissellement et érosion croissaient énormément après défrichement ;
- que pertes en terre et en eau s'amenuisaient sous cultures couvrantes (forte densité...) et si l'on protégeait le sol entre elles (mulch).

La simulation de pluie apporte des informations intéressantes. Par exemple, en zone sahélienne la part du ruissellement due à une pluie de 40 mm sur parcelle passe de 1 à 10 % quand le couvert végétal de graminée décroît de 95 à 30 %, atteint 25 à 35 % sur le même sol cultivé et 40 à 45 % sur le sol nu (fig. XIV bis).

La méthode des bassins expérimentaux, très proche de celle des bassins représentatifs, permet d'évaluer à l'échelle d'un bassin des effets sur la ressource en eau — débit liquide, charge solide, matières dissoutes — d'un changement d'occupation ou d'exploitation du sol. Bien que longue et coûteuse, elle est la seule méthode quantitative crédible en ce domaine.

On mentionnera les acquis dus au CTFT-CIRAD et à l'ORSTOM sur les hauts plateaux de Madagascar (effet du brûlis de prairies, reforestation en pins et eucalyptus...) et surtout en forêt amazonienne de Guyane française. Les dix bassins expérimentaux de quelques hectares du projet Ecerex (Roche M.A., 1979, Sarrailh, 1984) permettent de quantifier les effets du déboisement intégral ou indigène ou les modifications du régime hydrique sous diverses spéculations introduites après déforestation : élevage sur prairie artificielle, vergers d'agrumes et plantations de pins et d'eucalyptus. Première opération d'envergure en forêt humide, le Projet Ecerex a déjà fourni de nombreux renseignements : les effets observés varient fortement selon le type d'organisation volumique des sols (à drainage libre ou bloqué), selon le niveau de mesure (parcelle, bassin) ; les pertes en terre sont considérables l'année du défrichement mais dépendent beaucoup des moyens mis en œuvre (fig. XV, XV bis).

Le projet continue pour tester la stabilité à long terme des nouvelles spéculations agro-sylvo-pastorales introduites.

En zone de savane tropicale (nord Côte d'Ivoire, Sud du Burkina-Faso), la reprise après 20 ans d'anciens bassins représentatifs a permis de quantifier les effets sur les caractères hydrologiques d'un accroissement des terres cultivées sous la pression démographique accentuée par la

throughout western Africa have made it possible to show (Roose, 1977):

- that Wischmeier's equation for land losses did apply to tropical regions after adjustment of its various parameters;
- that surface runoff and erosion increased enormously after the land was cleared;
- that losses of land and water tapered off under high density covering crops and when the soil between the crops is protected with mulch.

Use of rain simulators give useful data. For example, in semi-arid zone of western Africa the runoff coefficient for a 40 mm rainfall height is increasing from 1 to 10 % when herbaceous strata cover is decreasing from 95 to 30 % of the watershed area, and reaches 25-35 % on millet cultivated area and 40-45 % on bare soil (fig. XIV a).

The experimental basin method is closely related to the representative basin method and when used on the scale of a basin, makes it possible to assess the effects on water resources — liquid flow rate, suspended and bed loads, dissolved material — of a change of soil occupancy or use. Although time-consuming and expensive, it is only credible quantitative method in the field.

The results achieved by CTFT-CIRAD and ORSTOM on the high plateaux of Madagascar will be mentioned (regarding the effect of burnt prairies, and reforestation with pines and eucalyptus) as also especially in Amazonian forest in French Guyana. The ten experimental basins of a few hectares in the Ecerex Project (Roche M.A., 1979; Sarrailh, 1984), have made it possible to quantify the effects of total or indigenous deforestation and the changes in the water regime when various farming systems are made following deforestation, such as animal raising on artificial prairies, citrus orchards and pine and eucalyptus plantings. The Ecerex Project, the first significant one in a rain forest, has already supplied countless information: the effects observed vary greatly according to the type of three dimension organization of the soil, (i.e., free or blocked drainage) and according to the type of measurement (i.e., plot or basin). Land losses are considerable during the year when the land is cleared. However, the losses are largely a function of the method used to clear the land (fig. XV, XV a.). The project is still testing the long-term stability of new agro-sylvo-pastoral systems that have been established.

In the tropical savannah of northern Ivory Coast and southern Burkina Faso, resuming the study of old representative basins after 20 years has made it possible to quantify the effects on hydrological features of an increase in land used for agriculture under demographic pressure heightened by the recent drought (decrease in fallow land) (Albergel, Gioda, 1986).

On a semi-arid watershed where millet cultivated area is increasing from 16 to 37 % of drained area (and where natural herbaceous savannah is reduced from 82 to 37 % of drained area), the runoff is increasing from 21 to 42 % for 40 mm rainfall (fig. XVI).

récente sécheresse (réduction des jachères... Cf. Albergel, Gioda, 1986). Sur un bassin sahélien où les cultures de mil passent de 16 à 37 % de la surface (et le sol couvert de la savane à graminée décroît de 82 à 37 %), le ruissellement d'une pluie de 40 mm passe de 21 à 42 % (fig. XVI).

L'aménagement de bassin à des fins agricoles et forestières

Le bassin expérimental conçu comme un outil hydrologique destiné à tester les effets des modifications d'occupation des sols sur la ressource en eau, on passe normalement au concept d'aménagement de bassin (watershed management) : recherche de la localisation optimale dans un bassin versant — ou dans un territoire villageois — des différentes activités humaines — élevage, forêt pour le bois de feu, cultures, etc. de sorte que les productions agro-sylvo-pastorales soient maximales (et économiquement rentables), et que les potentiels en terres et en eaux soient conservés.

On peut faire état dans ce domaine de nombreux travaux, entre autres de l'IRAT-CIRAD dans les pays du Sahel (Burkina-Faso, Sénégal...) où sont prises en compte les techniques de travail du sol, les techniques culturales : labours en courbes de niveau, banquettes anti-érosives, haies artificielles anti-érosives, billonnage, etc. On doit noter que les avantages que tirent les populations d'un village, d'une micro-région, des travaux d'aménagement de bassin sont à mettre en balance avec les effets induits sur la ressource en eau pour les populations situées en aval. Les techniques de conservation des sols et des eaux sont bénéfiques sur le plan des charges solides mais favorisent l'infiltration (et la reprise par les cultures consommatrices ensuite) ; elles réduisent d'autant la ressource en eau pour l'aval.

L'effet du développement spectaculaire des petits réservoirs est encore plus marqué. Les exemples les plus frappants ont été remarqués dans le Nord-Est du Brésil (Dubreuil, Girard, 1968). Plus un bassin comporte de petits réservoirs, plus sa ressource en eau à l'exutoire diminue et devient irrégulière.

Cette compétition pour l'eau, surtout cruciale en région semi-aride, demande une analyse rigoureuse de laquelle les approches socio-économiques ne doivent pas être exclues.

Parler d'aménagement de bassin, ou d'aménagement, intégré régional, sous-tend implicitement que les hommes sont présents et peuvent développer leurs activités. L'un des plus grands obstacles à la présence humaine active dans les savanes tropicales d'Afrique de l'Ouest est bien *l'onchocercose, maladie parasitaire dite « cécité des rivières »*. Le programme de lutte développé par l'OMS depuis 1974 intéresse 900 000 km² répartis sur sept états. Il repose sur l'emploi d'insecticides destinés à détruire les simules, l'insecte vecteur, dont le dosage approprié et la période d'application dépendent étroitement, pour être efficace, de la connaissance du débit de la rivière où gisent les simules (Annexes VIII). *L'emploi des équipements modernes et des satellites de télétransmission (p. 96) permet aujourd'hui une prévision à court terme des lachers d'insecticides.* Une collaboration hydrologie-entomologie médicale s'est établie à cet effet, entre ORSTOM et OMS.

Basin development for agriculture and forestry

Beginning with experimental basin, designed as a hydrological tool intended for testing the effects of changes in land uses on water resources, the next step is usually the watershed management concept. This includes the search for an optimal land use system in a river basin, or in village territory, considering the different human activities, such as animal raising, forestry for firewood, growing crops, etc., in order to maximize agro-sylvo-pastoral production and to make profitable and maintain the land and the water's potential.

Many works in this area can be mentioned, including the IRAT-CIRAD Project in the countries of the Sahel, such as Burkina Faso and Senegal, where the soil working techniques and cultivation techniques are taken into account; for example, contour plowing, anti-erosion bench terraces, artificial anti-erosion hedges, ridging, etc. It must be mentioned that the advantages that accrue to the people of a village or microregion from watershed management projects need to be balanced against the externalities of the project on water resources for people who live downstream. The soil and water conservation techniques are beneficial as they concern solid materials but lead first to infiltration and then to consumer crops. They also decrease water resources downstream as a result. The effect of the noticeable development of small reservoirs is even more pronounced. The most striking examples were seen in Northeastern Brazil (Dubreuil, Girard, 1968). More a basin included small reservoirs in its drainage area, less is the water resource availability at its outlet. Such competition for water, especially critical in semi-arid areas, calls for a strict and detailed analysis of which the socio-economic approaches should not be eliminated.

Any discussion of watershed management or integrated regional management includes the implicit understanding that people are in their area and have the right to develop their activities. One of the greatest obstacles to human presence and activities in West African tropical savannahs is onchocercosis, a parasitic disease called "river blindness". The control project developed by the WHO since 1974 involves 900,000 square kilometers scattered over seven nations. It is based on the use of insecticides that are supposed to destroy sandflies, the carrier insects. The appropriate dosage and the amount of time for application are heavily dependant on knowing the flow rate of the river where the sandflies live (Appendix VIII). Today, the use of modern equipment and remote transmission satellites (p. 96) makes it possible to develop short-term forecast for using insecticides. Toward this end, ORSTOM and WHO are cooperating in hydrology and medical entomology.

Biotic resources (ORSTOM, 1983)

Knowledge of water quality has already been mentioned a number of times: salt content in water management in northern Tunisia (p. 104), transported solid material and dissolved material (p. 108, 96). The most important work was done in the area of the aquatic environment in order to assess water productivity in terms of fish breeding resources. In the past and at the current time, the work focused on four major areas of development: Lake Chad, rivers and lagoons in the Ivory Coast,

Les ressources biotiques (ORSTOM, 1983)

Les connaissances relatives à la qualité des eaux ont déjà été évoquées à diverses reprises : teneurs en sel dans la gestion des eaux du nord-Tunisie (p. 104), charge solide et matières dissoutes transportées (p. 108, 96). Les travaux les plus importants ont concerné *l'environnement aquatique en vue d'évaluer la productivité des eaux en termes de ressources piscicoles*. Ces travaux ont eu dans le passé et le présent quatre champs principaux de développement : le Lac Tchad, les rivières et lagunes de Côte d'Ivoire, le lac Titicaca en Bolivie et les rivières du bassin amazonien. Les objectifs et les acquis des recherches peuvent être très brièvement présentés.

Sur le lac Tchad, où l'on pêchait dans les années 60 près de 140 000 tonnes de poissons par an dans un lac atteignant alors (phase d'apogée à hydraulicité abondante) 20 000 km², l'objectif était l'étude de la productivité : identification du milieu physico-chimique, productivité des divers niveaux trophiques, connaissance des peuplements et des biomasses, dynamique des stocks exploités...

Les méthodes d'inventaire systématique, de modélisation mathématique, d'enquêtes statistiques ont été développées et adaptées au milieu et à l'objectif.

Méthodes et objectifs comparables ont été repris sur le lac Titicaca.

Le programme de lutte contre l'onchocercose (p. 108, 98) a motivé les recherches hydrobiologiques sur les rivières de Côte d'Ivoire : tests de toxicité des insecticides sur la faune aquatique, mise en œuvre d'une surveillance permanente de l'environnement aquatique pour pallier tout risque de perturbation majeure de la faune utile.

Sur la lagune Ebrié de basse Côte d'Ivoire (10 000 tonnes de poissons par an), les recherches ont porté sur la dynamique des espèces exploitées afin d'en définir une gestion rationnelle des stocks, face à l'intensification de la pêche. Elles ont également concerné les risques de pollution agricole (engrais, pesticides) pour l'équilibre écologique des lagunes. Des études socio-économiques des villages de pêcheurs, de leur comportement professionnel ont été étroitement associées aux travaux hydrobiologiques.

Cette section du chapitre est un résumé beaucoup trop succinct des méthodes développées et des connaissances acquises en hydrobiologie tropicale. Le cadre limité de ce séminaire et le temps octroyé à notre communication ne permettaient pas de s'étendre davantage, comme il aurait fallu en ce domaine. L'objectif que nous avons visé en cette fin de chapitre était de montrer que la maîtrise de la ressource en eau faisait appel au-delà des hydrologues à des biologistes, à des spécialistes médicaux et à des économistes. Des possibilités d'intervention coordonnée existent dans ce domaine et quelques exemples ont été donnés. Il s'agit d'une capacité originale de l'ORSTOM que nous devons mentionner.

Estimation et exploitation des eaux souterraines

La cartographie des ressources

Alors que les ressources en eaux superficielles sont visibles et concentrées dans les thalwegs, les eaux souterrai-

nes de Lake Titicaca en Bolivie et Amazonian Basin rivers. What follows is a brief presentation of the goals and research results.

As for Lake Chad, where approximately 140,000 tons of fish were caught per year during the 1960's, the lake's surface measured 20,000 sq km and it was the peak of abundance relative to water level. The objective was a productivity study, i.e., identify the physico-chemical environment, determine the productivity of the various trophic levels and understand the populations and biomasses and dynamics of fish stocks.

The systematic inventory, mathematical modelling and statistical survey methods were developed and adapted to the environment and goals. Comparable methods and goals were adopted for Lake Titicaca. The onchocercosis control program (p. 108, 98) provided motivation for hydrobiological research on the Ivory Coast's rivers. There were insecticide toxicity tests administered to the aquatic fauna and permanent monitoring of the aquatic environment in order to lessen any risk of major disturbance to useful fauna. As for Ebrié Lagoon of lower Ivory Coast, with 10,000 tons of fish caught per year, research dealt with the dynamics of species caught in order to identify a rational means of management for fish populations while fishing intensified. Research also was done on dangers of pollution from agriculture, such as fertilizers and pesticides, for ecological balance of the lagoons. Socioeconomic studies of fishing villages and the professional behavior of the fishermen were closely connected to hydrobiological studies.

This section of chapter is a much too cursory summary of methods and knowledge of tropic hydrobiology. The seminar's limited scope and the time allotted for our presentation made it impossible to go into the amount of detail that this area deserves. Our objective here, at the end of chapter, was to show that managing water resources meant going beyond the use of hydrologists to include biologists, medical specialists and economists. Possibilities of coordinated interventions exist in this area and a few examples have been provided. This is one of ORSTOM's significant capabilities that we had to mention.

Estimating and exploring aquifer resources

Resources mapping

When surface water resources are visible and concentrated in thalwegs, aquifers are concealed and spreaded. Rational management of hydrometric networks allows to reach through appropriate processing and analysis of collected data (p. 96, 98, 100) a pretty good assessment of surface water resources.

Knowledge of aquifer resources is not so easy. Many steps are needed and resources evaluation is depending on the kind of exploitation.

Geological mapping is the first step. A good knowledge of lithology allows to discriminate the porous strata that are able to contain aquifers.

A rough analysis of annual values of rainfall and evaporation data gives further an estimation of infiltration possibilities and then an idea of natural recharge of aquifers. We may so reach the natural renewable (or potential) resource.

nes sont cachées et dispersées dans l'espace. La gestion rationnelle des réseaux hydrométriques permet d'aboutir grâce à un traitement et une analyse appropriée des données collectives (p. 96, 98, 100) à une évaluation des ressources en eaux superficielles.

L'approche des eaux souterraines est plus malaisée. Plusieurs étapes sont nécessaires et l'estimation de la ressource est liée à son exploitation.

La cartographie géologique est la première étape. La connaissance de la lithologie des terrains permet de discriminer ceux qui sont perméables donc susceptibles de contenir des aquifères.

Une analyse sommaire sur valeurs annuelles des données pluviométriques et d'évaporation permet ensuite d'estimer la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer et donc d'alimenter régulièrement la nappe aquifère. On approche ainsi la ressource renouvelable naturelle (ou potentielle).

Pour une estimation plus précise de la ressource exploitable, il faut disposer de puits et forages et de leurs données techniques : coupe des terrains traversés, profondeur et épaisseur de l'aquifère, résultats d'essais de pompage, caractéristiques physico-chimiques des eaux... Comme pour les fichiers hydrométéorologiques (p. 98), il existe un fichier des points d'eau pour lequel le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a joué le rôle catalyseur. Fichier informatisé et logiciel de traitement sont opérationnels pour les états africains membres du CIEH.

L'importance des eaux souterraines est d'autant plus grande que l'on va vers des régions à l'aridité croissante où les cours d'eau (hors du Sénégal, du Niger et du Chari provenant des zones tropicales arrosées) sont temporaires (2-3 mois d'écoulement). Sans réservoir superficiel d'accumulation — et ils sont rares au Sahel — les eaux souterraines sont alors la seule ressource exploitable.

Dans les années 50, une vaste campagne de forages à vocation pastorale fut lancée dans le sahel africain, domaine des grands élevages nomades. L'analyse technique des données de ces forages devait permettre une première estimation des grands aquifères généralisés (profondeur, épaisseur, débit d'exhaure...). Elle fit l'objet d'un travail de synthèse en 1960 (Archambault J.).

La poursuite des travaux géologiques, diverses études spécifiques localisées, d'autres campagnes de forages à vocation villageoise et pastorale devaient permettre quinze ans plus tard de dresser un inventaire plus précis et plus détaillé des ressources en eau souterraine des pays africains membres du CIEH. Cet inventaire à base cartographique (1 / 1 000 000 et 1 / 500 000) fournit les informations suivantes :

- localisation géographique des aquifères ;
- estimation des ressources renouvelables en km^3/km^2 (de 10 à 150 selon les terrains) ;
- profondeur de l'aquifère ;
- estimation des ressources exploitables en km^3/km^2 (de 0,05 à 5 selon les terrains) selon certaines conventions d'exhaure (par exemple abaissement maximal à 100 m de profondeur ou rabattement d'un tiers de l'épaisseur). Cet inventaire est appelé : carte de planification des ressources en eau (Cf. p. 118 pour liste). En effet, l'échelle employée, beaucoup trop grande, ne permet pas de garantir un forage en un lieu déterminé. Une étude complémentaire de site est nécessaire.

A ces réserves près, ces cartes de planification des ressources en eau sont aux eaux souterraines ce que les monographies hydrologiques sont aux grands et moyens

To get a more accurate assessment of the resource that could be exploited, it is necessary to have bore-holes and wells and their relative technical data: depth and thickness of the aquifer layer, pumping tests results, physical and chemical characteristics of water...

As for hydrometeorological data (p. 98), a bore-holes and wells data record has been set up by the "Bureau de recherches géologiques et minières", BRGM.

Data base can be processed by computer through appropriate softwares that are in operation in the african countries members of CIEH.

The important role of aquifer resources is more important in arid regions where every stream has no permanent flow (out of Senegal, Niger or Chari rivers flowing from rainy southern regions) during 6 to 8 months. When surface water reservoir does not exist, aquifer resources are unique.

In the fifties, numerous bore-holes for cattle watering has been drilled in semi-arid part of Western Africa, where nomadism is prominent. A technical analysis of these bore-holes has allowed to set up a primary estimation of the major regional aquifers (depth, thickness, pumping discharge...). A publication has been done (J. Archambault, 1960).

Geological surveys, various sites specific studies and numerous bore-holes drilling for village of cattle supply have been made along the following fifteen years. From such works, a precise and detailed inventory of aquifers resources in countries members of CIEH has been drawn up. The set of maps (1 / 1,000,000 and 1 / 1,500,000) gives the following informations:

- geographical situation of aquifers;
- estimation of renewable resources in cubic km / km^2 (10 to 150 depending on lithology);
- depth of aquifer;
- estimation of resources to be exploited in cubic km / km^2 (0,05 to 5 depending on lithology) under specific conditions (decreasing of aquifer depth no more than 100 m, or thickness reduction limited to 33 %).

This inventory has been called: planning map of aquifer water resources (p. 118).

Indeed, the scale of mapping does not allow to make a bore-hole in a determined site with high chance of success.

A site complementary study has to be made. Under these considerations, such planning maps of aquifer resources are more or less equivalent to river basins monographs as far as large basins are concerned. These maps give a good description of the main free or confined groundwaters of Western Africa: Maestrichan sands (Senegal, Mauritania), sands and sandstones of intercalary Continental (Cretaceous) and terminal (tertiary). In semi-arid regions, it has been checked that natural recharging of aquifers is only possible in limited areas, and often when heavy storms and resulting surface runoff occur.

It has been believed during a long time that nothing but main generalized aquifers in porous layers were to be exploited. Knowledge of old metamorphic rocks (granits, shales, schists...) and their weathering has been improved. Some bore holes have been successful in such layers when they are well fissured. Aquifers are discontinuous. The volume to be extracted is poor and highly variable, but it has been demonstrated that water resources were available in old fissured rocks that occupy great areas in West Africa, like in Burkina Faso.

Hydrogeology of fissured media is now well known

cours d'eau.

Elles décrivent les grands aquifères généralisés libres ou captifs de l'Afrique tropicale occidentale : sables du Maestrichien (Sénégal, Mauritanie), grès et sables du Continental intercalaire (crétacé) et du Continental terminal (tertiaire). On sait également que dans le domaine semi-aride, la recharge annuelle des nappes aquifères ne se fait qu'en des zones limitées et souvent à la faveur des fortes pluies et du ruissellement qui en résulte.

On a longtemps cru que seuls les grands aquifères généralisés étaient exploitables. L'amélioration des connaissances sur l'altération des roches métamorphiques anciennes (granites, schistes, etc.) et sur leur fissuration et fracturation a permis quelques succès dans des forages réalisés dans ces terrains. Des aquifères y sont discontinus, leur réserve exploitable est faible et variable, mais malgré cela il a été montré qu'il y avait possibilité d'eaux souterraines exploitables dans ces terrains anciens qui occupent des grandes surfaces en Afrique de l'Ouest (Burkina-Faso, par exemple).

L'hydrogéologie des milieux fissurés est maintenant mieux connue (Pointet, 1985) et une estimation de son exploitation a pu être analysée en vraie grandeur sur des forages au Niger (Barrat, Puyoo, 1984).

Les contraintes de l'exploitation

La connaissance de la ressource étant ce qu'elle est, des contraintes de divers types se présentent pour la mise en exploitation réelle donc économique de cette ressource. La disponibilité de la ressource ne pose guère de problème en zone humide, la recharge annuelle par les pluies y dépasse nettement les besoins ; les nappes se vidangent généralement et naturellement dans les cours d'eau dont le débit d'étiage permanent est le témoin quantitatif de cette ressource.

Il en va différemment en zone sèche. On ne peut exploiter que la recharge annuelle. Une meilleure estimation de celle-ci peut être fournie par des modèles très voisins des modèles hydrologiques (modèle maillé couplé eau de surface-eau souterraine, p. 104). Leur emploi permet de guider une programmation efficace des exploitations d'aquifères.

Certains grands aquifères généralisés et profonds (souvent captifs donc parfois artésiens) de la zone aride sont alimentés de très loin et très lentement. Leur capacité d'emmagasinement est élevée, on a parfois parlé d'aquifères passifs. Disons plutôt qu'il s'agit de réserves non renouvelables à l'échelle annuelle que l'on peut exploiter — donc épuiser — comme un gisement minier.

Un tel type d'exploitation est envisageable faute d'autres ressources.

Enfin, les contraintes techniques et socio-économiques vont être déterminantes. Le choix du type d'exhaure (puits ou forage) et le choix du matériel de pompage (humain ou motorisé) vont dépendre certes des caractéristiques de l'aquifère mais aussi du débit d'exhaure, de la localisation, des possibilités d'entretien du matériel, etc.

L'exhaure de l'eau a un coût, avec une part fixe (réalisation de l'ouvrage, matériel de pompage) et une part variable (maintenance, énergie).

Des estimations de coût ont été fournies avec les cartes de planification des ressources en eau de l'Afrique sahélienne. Il est évident qu'elles doivent être actualisées à chaque projet car comportant nombre de paramètres variables.

(Pointet, 1985) and an estimation of water resources availability as been made on 700 bore-holes drilled in Niger (Bannat, Puyoo, 1984).

Constraints of exploitation

When the aquifer resource is known, various constraints have to be considered before to get an effective and economic exploitation of this resource.

In humid regions, the resources availability is easy to be assessed, because the annual recharging of aquifers is generally upper than water demand. The water tables are often drained by a river and the low flow discharge of the latter is a good assessment of the aquifer resources availability.

The situation is different in arid zones. The annual recharge is available and a good assessment of it could be done using models similar to the combined spatially distributed model described in p. 104. Modeling is the way to make an efficient programmation of aquifer exploitation.

Some of the major generalized big aquifers (deep lying, sometimes confined or artesian) in the semi-arid regions are recharged very slowly and from an infiltration occurring very far. Their storativity his high. They are sometimes called as "fossil reserves". It is better to consider these aquifer reserves as norenewable at the annual scale but that can be exploited as a water mine.

Such mining exploitation might be considered if there is not any other resources.

Technical and socio-economical constraints have to be considered. The choice between well and bore-hole, the choice of pumping device are depending not only of the aquifer characteristics but also of the withdrawal discharge, site conditions and maintenance...

Withdrawal of water does cost. This cost includes a constant part (work drilling, pumping device) and a variable part (maintenance, energy).

Estimations of costs have been included in the set of above mentionned planning maps for semi-arid Africa. It is clear that costs have to be actualized for each specific project due to the numerous variable parameters involved.

Groundwaters are traditionnaly used for village supply on cattle watering. With the recent drought period, groundwaters are also considered for supplying small irrigated perimeters near villages.

Data on chemical characteristics of water are mentionned in the planning maps.

A special strategy to use groundwater for irrigation has been recently proposed (Collin, 1986). An increasing use of groundwaters is ineluctable. Its management is not so easy than for surface waters.

A piezometer network for the major aquifers has to be set up, with registered and satellite transmitted collecting system as for hydrological network (p. 96). This continuous central of aquifer resources is necessary.

Outre l'alimentation villageoise et celle des points d'eau d'abreuvement des troupeaux, débouchés d'usage traditionnels des eaux souterraines, il est envisagé de plus en plus, depuis la sécheresse des dernières années, de faire également appel aux aquifères pour l'irrigation des petits périmètres villageois. Des informations sur la qualité des eaux des aquifères figurent dans les cartes déjà citées.

Une stratégie de recours aux aquifères pour la petite irrigation a été récemment proposée (Collin, 1986). Le développement de l'usage des eaux souterraines est inéluctable. Son contrôle est plus malaisé que celui des eaux de rivière. Il importerait donc qu'une surveillance continue soit mise en place dans un très proche avenir. Un réseau de prézomètres judicieusement disposés dans les principaux aquifères et dotés d'équipement d'enregistrement et de télétransmission comme ceux évoqués pour le réseau hydrométrique (p. 96) devrait permettre cette surveillance continue. Elle s'impose.

L'information scientifique et technique disponible

Le développement des infrastructures et de l'urbanisation, la mise en valeur des terres et des eaux depuis 1945, ont nécessité la réalisation de très nombreuses études d'hydrologie appliquées en Afrique tropicale. Ces études ont été réalisées pour le compte des services et des ministères locaux, comme pour le Fonds d'Aide et de Coopération de la France mis à la disposition des pays africains. Bien que ces études contractuelles aient de ce fait même été peu diffusées, elles ont toutes été répertoriées et conservées.

La *bibliographie hydrologique de l'ORSTOM* est décrite dans l'Annexe IX. Elle contient plus de 2 700 titres sur la période de 35 ans allant de 1950 à 1985 (on doit y ajouter, pour être complet, quelques 400 titres hydrobiologiques entre 1964 et 1983), dont la moitié concerne l'Afrique tropicale francophone. Les travaux les plus nombreux ont été concentrés en quelques pays soit semi-arides à forte contrainte de développement liée à l'eau : Mali, Burkina-Faso, Niger, Tchad, soit à la Côte d'Ivoire, au Cameroun, à Madagascar, pays très contrastés ayant bénéficié d'un développement économique relativement plus intense et plus diversifié.

Quelque 20 % des titres sont des travaux à caractère méthodologique, ou de synthèse de recherches plus fondamentales ayant appuyé et soutenu les études d'aménagement. Un certain nombre de ces travaux ont été publiés dans les collections éditées par l'ORSTOM : Mémoires, Travaux et Documents, Initiation et documentation technique. Une collection particulière est consacrée aux Monographies hydrologiques de pays ou de grands bassins fluviaux.

Parmi ses périodiques, dénommés Cahiers, l'ORSTOM a édité la série hydrologie de 1964 à 1985 (environ 80 numéros). Une nouvelle revue Hydrologie Continentale est lancée en 1986. Bien qu'encore éditée par l'ORSTOM, elle est ouverte à la communauté scientifique internationale de langue française et dotée d'un comité de rédaction international.

Tous les titres cités ici sont accessibles. Un fichier informatisé en permet l'accès aisément par auteur, pays ou thème (Verneuil, 1984).

L'auteur de cette communication a utilisé les principa-

Available technical and scientific information

Since 1945, the development of infrastructure and increased urban growth, as well as land and water development, have made it necessary to perform a large number of applied hydrology studies in tropical Africa. The studies were performed for organizations and local ministries, as well as for the French Assistance and Cooperation Fund (Fonds d'Aide et de Coopération de la France) that was made available to African countries. Although these contractual studies were not fully disseminated because of this fact, all were indexed and saved.

ORSTOM's hydrological bibliography is described in Appendix IX. It includes over 2,700 titles over the 35-year period from 1950 to 1985. To be all-inclusive, 400 hydrobiological titles between 1964 and 1983 must be added to that figure. Half of these titles relates to tropical French-speaking Africa. The majority of work was on the one hand concentrated in a few semi-arid nations where development is quite difficult owing to lack of water, such as Mali, Burkina Faso, Niger and Chad. On the other hand, there was concentration in the Ivory Coast, Cameroon and Madagascar, all highly contrasting countries that have benefited from relatively more intensive and more highly diversified economic development.

Approximately 20 % of the titles involve methodology or more basic research studies that supported development studies. A large amount of this work was published in collections edited by ORSTOM: "Mémoires", "works and documents", "initiations and technical documentation". One of the collections is dedicated to Hydrological Monographs of countries on large river basins.

Among its periodicals known as "Booklets" (Cahiers), ORSTOM published the hydrological series from 1964 to 1985 with approximately 80 issues. A new journal, *Continental Hydrology* ("Hydrologie Continentale"), has been started in 1986. Although ORSTOM still publishes it, the journal is open to the French-speaking international scientific community and includes an international editing committee.

All of the above mentioned titles are available. A computerized record provides easy access by author, country or subject (Verneuil, 1984). The author of this presentation used the major bibliographical references to support his demonstration. At the end of this document approximately 80 titles, categorized by chapter, can be found (p. 118).

les références bibliographiques pour étayer sa démonstration. On trouvera en fin de texte cette sélection de quelques 80 titres classés par chapitre (p. 118).

La formation des hydrologues

En préambule, il faut souligner que l'ORSTOM n'est pas un établissement d'enseignement mais que la formation est une de ses missions. Elle doit être assurée conjointement à la recherche. La formation fait partie intégrante de la recherche et apporte bien souvent autant à celui qui la dispense qu'à celui qui en bénéficie.

Les actions de formation impliquant des hydrologues de l'ORSTOM peuvent se diviser en deux catégories :

- formation à la recherche de jeunes chercheurs hydrologues, français ou étrangers, dans des structures de l'ORSTOM.
- participation à des enseignements effectués par des hydrologues de l'Institut dans des établissements extérieurs (Universités, Écoles d'Ingénieurs...).

Formation à la recherche

Depuis 1967, c'est un total d'environ 240 étudiants qui, à des titres divers, ont suivi une formation en hydrologie à l'ORSTOM. Jusqu'en 1985, on pouvait les diviser en 3 grandes catégories : élèves, stagiaires, thésards.

Depuis 1985, la suppression des thèses de 3^e cycle (dites aussi de spécialité) de docteur-ingénieur et d'État, et leur remplacement par la Nouvelle Thèse, change la situation.

En outre, l'ORSTOM qui recrutait auparavant ses propres chercheurs et ingénieurs hydrologues, soit au niveau de la maîtrise es sciences, soit avec un diplôme d'ingénieur de certaines grandes Écoles, recrute depuis 1985 uniquement des titulaires de thèses (nouvelle ou ancienne). Il n'y a donc plus d'élèves.

La formation des élèves français ou étrangers jusqu'en 1985 était de niveau post-universitaire et durait 2 ans : 1 année théorique (utilisation poussée de la méthode des cas avec applications numériques concrètes) en France et 1 année pratique Outre-Mer. Close par un mémoire à rédiger et à soutenir, cette formation délivrait le diplôme d'hydrologie ORSTOM, reconnu dans plusieurs pays étrangers (Tunisie, Maroc...). Tous les agents hydrologues ORSTOM de niveau supérieur ont suivi cette formation. De 1967 à 1984, 45 étudiants étrangers ont obtenu ce diplôme. Ils appartenaient à dix nationalités (23 tunisiens, 8 marocains,...) de langue française ou espagnole.

L'ORSTOM accueille deux types de stagiaires :

- stages de longue durée (en général une année scolaire) sur des notions d'hydrologie. Les demandes proviennent souvent d'organisations internationales (OMM, FAO...) pour des étudiants qui n'ont pas le cursus nécessaire pour être inscrits en DEA. Depuis 1984, existe à Montpellier un diplôme d'université qui répond bien aux demandes de ce type. La plupart des demandes ont donc été renvoyées sur le diplôme (p. 115, 118)
- stages de durée variable sur des thèmes précis. Pour ce type de stagiaires, nous proposons en général des formations à la carte. Par suite de la très grande diversité de ces stages (thèmes abordés, durées et dates des stages très variables), cela nécessite une organisation que nous

Training hydrologists

First of all, it must be emphasized that ORSTOM is not an educational establishment even though training is one of its objectives. Training must be provided along with research activities. Training is an integral part of research and often is as beneficial to the trainer as to the trainee.

Training activities for ORSTOM hydrologists may be divided into two categories:

- training young hydrologists/researchers, both French and foreigners within ORSTOM, research units and laboratories;
- training done by ORSTOM hydrologists in outside establishments, such as universities, engineering high schools, etc.

Training for research

Since 1967, a total of about 240 students under various auspices were trained at ORSTOM in hydrology. Until 1985, they could be divided into three major categories: students, trainees and students preparing a thesis.

Since 1985, graduate theses, also known as "3^e cycle" theses, doctorates in engineering and "State Doctorates" (Doctorats d'État) have been postponed. The "New Thesis" has replaced them and alters the situation.

Furthermore, ORSTOM used to recruit its own hydrologists, engineers and researchers, both at the Master of Science level and at the engineer degree level from certain High School (Grandes Écoles). However, since 1985, ORSTOM only recruits people who have done their theses, either recently or a long time ago. Thus, there are no more students.

Until 1985, training of French and foreign students was at the post-graduate level and was of two year's duration, with one year of theory, including advanced use of the case studies method with specific numerical applications in France, and one year of practical work abroad. At the end, there was a report to write and defend, resulting in the ORSTOM hydrology degree, recognized in several foreign countries, such as Tunisia, Morocco, etc. All ORSTOM hydrologists had this type of training. From 1967 to 1984, 45 foreign students from 10 different French-speaking and Spanish-speaking countries obtained the degree, including 23 Tunisians and 8 Moroccans. ORSTOM accepts two types of trainees:

- long-term training sessions that usually last one school year such as the WMO and FAO frequently submit requests for students who do not have the courses that are required for admission to the advanced graduate degree (DEA: Diplôme d'Études Approfondies) necessary to present a thesis. Since 1984, Montpellier provides a university degree that is successful in meeting this type of demand. Therefore, most of requests in this category were directed to this program (p. 115, 118);
- training sessions of variable durations on specific subjects. For these trainees, we usually suggest individualized program. Given the great diversity of these training sessions, including subject matter, duration and variable dates, there is an organizational requirement that we are not always able to fulfill. As a result, we are not entirely able to meet the demands even though there are a large number of such demands.

ORSTOM's hydrologists also train students who are

ne pouvons pas toujours assumer. En conséquence, nous répondons imparfaitement à ces demandes qui sont pourtant fort nombreuses.

Les hydrologues de l'ORSTOM encadrent des étudiants préparant une thèse à soutenir dans une université française. Ces étudiants ont travaillé en association sur le terrain avec des chercheurs ORSTOM souvent dans leur pays et viennent ensuite un ou deux ans préparer leur soutenance à Paris ou à Montpellier.

Près d'une dizaine d'étudiants étrangers ont passé leur thèse dans ce cadre.

Participation à l'enseignement

En France, des chercheurs de l'ORSTOM ont participé depuis 1965 et pendant de nombreuses années ou participent encore à des enseignements dispensés soit en dernière année d'écoles d'ingénieurs :

- École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, ENGREF ;
 - École Nationale Supérieure d'Electricité, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, ENSEEIHT ;
 - École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, ENSG ;
 - École Nationale de la Météorologie ;
- soit au niveau de DEA, diplôme d'études approfondies, clôturant les études avant la thèse à l'université :
- Sciences de l'Eau à Paris VI ;
 - Sciences de l'Eau et Aménagement à Paris XI-Orsay.

La réforme de 1985 de la thèse s'est appliquée aussi aux DEA. Il a été créé un DEA national des Sciences de l'Eau, fédérant les universités de Paris VI, XI, Montpellier et l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Des chercheurs ORSTOM enseignent dans ces 4 bases.

Hors de France, on peut mentionner des interventions analogues :

- à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) en post-graduation d'hydrologie opérationnelle et appliquée ;
- à l'Université de Niamey (Niger) aux niveaux de la licence et de la maîtrise ;
- aux Universités d'Abidjan (Côte d'Ivoire) et Dakar (Sénégal) au niveau de la maîtrise.

Des ouvrages didactiques généraux ou spécialisés ont été publiés (Roche, 1963 ; Dubreuil, 1974). Il en fut de même en hydrogéologie (Castany, 1968).

Formations spécialisées

La suppression de la formation des élèves étrangers à l'ORSTOM en 1985 a été heureusement palliée par la création d'une formation appropriée aux besoins des techniciens des pays en voie de développement n'ayant ni la capacité ni le désir de soutenir une thèse. Il s'agit de Diplôme d'Université en Hydrologie appliquées au Développement.

Cette formation a été créée en 1984 conjointement par l'Université des Sciences et des Techniques du Languedoc et l'ORSTOM. A partir d'un niveau d'entrée de fin de 1^{er} cycle universitaire, les étudiants acquièrent, en un an, une formation d'hydrologue gestionnaire de réseaux et de projets d'aménagement.

Douze étudiants ont été inscrits en 1984-85.

Ce diplôme, qui n'a aucun équivalent en France, ré-

preparing a thesis that must be defended in a French University. These students have done field work in their countries and in cooperation with ORSTOM researchers. After that work they go to Paris or Montpellier to prepare the thesis. A dozen or so foreign students have done their thesis under this program.

Participation to university lectures

In France, ORSTOM's researchers have been involved since 1965 and continue to be involved in University lectures. These lectures could be given during the final year of engineering high school in the following institutions:

- National School for Rural Engineering, Water and Forests (ENGREF, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts);
- National Graduate School for Electricity, Electronics, Data Processing and Hydraulics of Toulouse (ENSEEIH, École Supérieure d'Electricité, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse);
- National Graduate School for Geology of Nancy (ENSG, École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy);
- National Meteorology School (École Nationale de la Météorologie).

On a second way, lectures are given at the DEA level just before the thesis, in the following universities:

- Water Sciences at Paris VI;
- Water and Development Sciences at Paris XI-Orsay.

The 1985 thesis reform has also been applied to DEA's. A national Water Science DEA has been created in a consortium of Paris Universities VI and XI and Montpellier, and the École Nationale Supérieure des Mines de Paris (National Graduate Mine School of Paris). ORSTOM researchers teach in these four places.

Similar training does exist outside France as follows:

- at the École Polytechnique fédérale de Lausanne (Federal Polytechnic School, Lausanne, Switzerland), for operational and applied hydrology at the post-graduate level;
- at the University of Niamey, Niger, for bachelor and masters levels;
- at the University of Abidjan, Ivory Coast, and the University of Dakar, Senegal, for masters level.

Specialized and general textbooks have been published for surface hydrology (Roche, 1963; Dubreuil, 1974), and for hydrogeology (Castany, 1968).

Specialized training

Although ORSTOM stopped training foreign students in 1985, the development of appropriate training has compensated for the loss. The new type of training, known as the University Degree in Hydrology applied to Development, is intended to meet the needs of technicians from developing countries who have neither the ability nor the desire to defend a thesis. The program was begun jointly in 1984 by the University of Science and Techniques of Languedoc and ORSTOM. From the entry level which corresponds to the end of the bachelors degree, students spend one year in hydrology training for network management and developments projects. Twelve students were registered for the program in 1984-85. The degree has

pond à de nombreuses demandes de nos partenaires étrangers et des organisations internationales.

L'intérêt de cet enseignement est multiple :

- formation d'un an en hydrologie ;
- importance donnée aux travaux dirigés, travaux pratiques et stages de terrain ;
- faible nombre d'étudiants, ce qui nous permet d'effectuer un enseignement personnalisé, en fonction de chaque cas.

Tous les hydrologues présents au Laboratoire d'Hydrologie participent à cet enseignement. L'ORSTOM assure toute la formation de terrain et les cours suivants : • hydrologie générale (80 h) • hydrologie analytique (60 h) • statistique et hydrologie (45 h) • topographie (10 h) • qualité des eaux (20 h).

Enfin, pour les techniciens hydrométristes, l'ORSTOM assura également fort longtemps un enseignement pratique d'hydrométrie. Il fut dispensé soit à Toulouse (avec l'ENSEEIH) soit au cours de sessions programmées (ex : Algérie de 1972 à 1975).

Depuis 1975, dans le cadre du Projet PNUD/OMM d'Agrhymet au Niger, un enseignement long d'hydrométrie est dispensé avec la participation d'agents de l'ORSTOM.

Un manuel pratique d'hydrométrie a été mis en chantier (Aldegheri, 1979).

Le potentiel actuel d'intervention

Jusqu'aux alentours de 1975, les activités hydrologiques de l'ORSTOM sont restées presque exclusivement concentrées sur les pays francophones d'Afrique tropicale, de Madagascar et du Maghreb ainsi que sur les départements et territoires français d'Outre-Mer.

Une ouverture s'est faite alors, particulièrement vers le Brésil et quelques autres pays latino-américains, en réponse à la fois à des demandes locales et à un intérêt scientifique de diversification géographique.

La structure opérationnelle était constituée par un Service hydrologique central en France, duquel dépendaient directement les sections hydrologiques implantées Outre-Mer.

Cette centralisation très efficace pour développer une politique de création et de gestion de réseaux hydrométriques (p. 96), pour coordonner la gestion des fichiers de données (p. 98), pour appliquer une méthodologie homogène et éprouvée aux travaux d'inventaire d'hydrologie appliquée aux aménagements (p. 104 et 108) a été supprimée en 1982 à l'occasion d'une réforme générale de l'ORSTOM.

L'institution est maintenant organisée en quelques 50 unités de recherches regroupées en 8 départements opérationnels. Cet ensemble s'appuie sur différents services basés en France, dont *le Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier*. La fonction principale de ce dernier est la gestion des fichiers de données et la coordination des interventions en matière de réseaux hydrométriques.

Il est chargé également de recherches météorologiques et méthodologiques. Il sert de base d'accueil à la formation des hydrologues.

Quatre unités de recherches rassemblent la grande majorité des hydrologues :

UR 102 d'étude des climats, de l'évaporation et des précipitations • UR 107 d'étude des régimes hydrologiques • UR 212 d'étude des mécanismes de genèse de

no French equivalent but meets many of the demands of our foreign partners and international organizations. This type of training has a number of advantages:

- one year of training in hydrology;
- emphasis placed on practical case studies and field training;
- small number of students, making it possible for us to provide individualized education for each case.

All the hydrologists who work at the Hydrology Laboratory take part in this training. ORSTOM provides all field training as well as the following courses: • General hydrology (80 hours) • Analytical Hydrology (60 hours) • Statistics and Hydrology (45 hours) • Topography (10 hours) • Water quality (20 hours).

Finally ORSTOM has also provided practical training for hydrometrists for a number of years. The training was held either in Toulouse, through ENSEEIH, or during programmed sessions, as in Algeria from 1972 to 1975. Since 1975, a long training period in hydrometry is provided through ORSTOM staff as part of the UNDP/WMO Agrhymet Project in Niger.

A practical hydrometry manual is also being prepared (Aldegheri, 1979).

The potential for assistance at the current time

Until approximately 1975, ORSTOM's work in the area of hydrology continued to be concentrated almost exclusively in the French-speaking countries of tropical Africa, in Madagascar, in North Africa and in the French overseas "departments" and territories. At that time overtures were made, especially to Brazil, and to a few other Latin American countries, both in response to local demands and a scientific interest in geographical diversification.

The operational organization was set up by a Central Hydrology Service in France, to which the overseas hydrology units were directly responsible.

Centralization was quite efficient for developing a policy to set up and manage the hydrometric networks (p. 96), for coordinating data record management (p. 98), for applying a uniform and tested methodology to the hydrology studies applied to improvements (p. 104, 108). However, centralization was ended in 1982 as ORSTOM experienced a general reform.

At this point the institution is divided into about 50 research units that are grouped into 8 operational departments. These structures are helped by different laboratories based in France, including the Montpellier Hydrology Laboratory. Its major role is to manage data and records and coordinate action in the field of hydrometric network.

The laboratory is also responsible for metrological and methodological research. It serves as a base for hydrologists training.

Four research units (RU) cover the vast majority of hydrologists: RU 102, for study of climates, evaporation and precipitation • RU 107, for study of hydrological regimes • RU 212, for study of runoff and infiltration mechanisms • RU 604, for study of water resource management.

l'écoulement et de l'infiltration • UR 604 d'études pour la gestion des ressources en eau.

La figure XVII fournit une représentation au début 1986 de la répartition géographique dans le monde des 125 hydrologues, dont la moitié environ de niveau supérieur. Il y a 18 implantations hors de France métropolitaine dont : • 10 en pays francophones africains • 5 en départements et territoires d'Outre-Mer • 5 en pays latino-américains.

Les implantations en pays étrangers font l'objet de négociations sur des programmes d'études ou de recherches conjoints. Elles ont donc un caractère pluriannuel certain, mais ne sont pas immuables évidemment. Le potentiel non négligeable présent en France, surtout au laboratoire d'hydrologie permet des interventions de courte durée dans d'autres pays. Beaucoup de ces interventions concernent des travaux d'hydrologie appliquée aux aménagements, et des conseils pour la gestion des réseaux hydrométriques. La création d'une filiale autonome a été envisagée pour rendre plus efficace le potentiel d'intervention dans ce domaine.

A côté de ce potentiel d'intervention strictement hydrologique de l'ORSTOM, il faut ajouter d'autres capacités non négligeables :

- au CIRAD, tant à l'IRAT en valorisation agricole de l'eau (agroclimatologie, conduite de la petite irrigation, aménagement de bassin), qu'au CTFT (hydrologie forestière et conservation des sols et des eaux) ;
- à l'INRA, surtout en agroclimatologie mais également en ce qui concerne la dynamique des polluants agricoles (nitrates, pesticides) ;
- à l'Université, qui comprend des structures d'enseignements (p. 115) et des laboratoires de recherches importants (en mécanique des fluides à l'Institut de Mécanique de Grenoble, IMG, au laboratoire d'Hydrologie Mathématique, LHM de Montpellier...) ;
- au CEMAGREF, Centre d'Études du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts, qui a des divisions d'Hydrologie, d'Hydraulique, de Qualité des eaux, de Pisciculture, de Travaux et Restauration en montagne... lui assurant le plus important potentiel français, tant au plan de l'hydrologie des bassins ruraux qu'à celui de la qualité des eaux, de l'irrigation, du drainage, etc. ;
- au BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières dont le Département de l'Eau réunit la plus importante équipe d'hydrogéologues français intervenant hors de France ;
- à l'ORSTOM aussi en hydrobiologie tropicale (p. 108, 100).

Les grands problèmes actuels et les perspectives d'avenir

Presque tous les pays en développement sont soumis à des climats non tempérés, donc excessifs. Les ressources en eau y présentent des caractères encore plus excessifs.

En régions semi-arides, l'insuffisance de l'eau est la contrainte majeure. La sécheresse prolongée qui s'est abattue depuis 1973 sur la ceinture tropicale constitue une anomalie aggravante de cette insuffisance. La forte croissance démographique dans les pays du Sahel y détruit le fragile équilibre des écosystèmes. Les besoins prioritaires y sont : mieux connaître une ressource en eau précaire et aléatoire, apprendre à utiliser avec efficacité le

Figure XVII shows the world geographical distribution of the 125 hydrologists as of early 1986. Approximately, one-half of them are graduates and post-graduates.

There are 18 bases outside continental France as follows:
• 10 in French-speaking African countries • 5 in overseas "departments" and territories • 5 in Latin America countries.

Although research and joint programs are negotiated with other countries year after year, negotiations are obviously flexible. The vast potential that exists in France, especially at the Hydrology Laboratory, makes short-term missions possible in other countries. Much of the assistance involves hydrology projects applied to development and consultation for managing the hydrometric network. The creation of a subsidiary has been taken under consideration to make the cooperation potential more effective in this area.

Besides ORSTOM's strictly hydrological potential for cooperation, other vast capabilities do exist in France as follows:

- CIRAD/IRAT have capabilities in water for agricultural development, including agroclimatology, small-scale irrigation and watershed management while the CIRAD/CTFT have forest hydrology and water and soil conservation capabilities;
- INRA has capabilities especially in agroclimatology but also in the dynamics of agricultural pollutants, such as nitrates and pesticides;
- universities provide training (p. 115) and have significant research laboratories, such as the fluid mechanics laboratory at the IMG, Mechanics Institute of Grenoble (Institut de Mécanique de Grenoble) and the MHL, Mathematical Hydrology Laboratory of Montpellier (Laboratoire d'Hydrologie Mathématique);
- CEMAGREF, the Center for the Study of Agricultural Mechanization, Rural Engineering and Water and Forestry (Centre d'Études du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts), including the Hydrology, Hydraulics, Water Quality, Fish Breeding, Mountains Works and Restoration Divisions, all of which ensure it the greatest potential in France, both for rural basin hydrology and water quality, irrigation, drainage, etc;
- BRGM, the Mining and Geological Research Bureau (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), whose Water Department combines the largest team of French hydrogeologists that provides assistance outside France;
- ORSTOM, which also has capabilities in tropical hydrobiology (p. 108, 100).

Major problems at the present time and outlook for the future

Nearly all developing countries are located in non-temperate climates that are subject to extremes. Water resources in those countries have features even more subject to extremes.

In semi-arid lands, the lack of water availability is the major constraint: The severe drought going on from 1973 in Western Africa has been worsening this lack of water.

In the Sahelian countries, heavy population growth destroys the fragile ecosystems balance. In such semi-arid regions, priorities are as follows: to better understand the scarce and tenuous water resources, to learn to use efficiently the little water that is available, to attempt to

peu d'eau disponible, essayer de prévoir les sécheresses pour s'y adapter, protéger les écosystèmes de la dégradation (réduction des pertes en terre et en eau).

Ce que l'on peut dire aujourd'hui de l'impact ou des conséquences de la récente et longue sécheresse ayant affecté le Sahel peut se résumer comme suit :

- les outils d'analyse statistique montrent que cette sécheresse est la plus longue et la plus sévère connue, mais ils ne permettent pas de trancher entre les deux interprétations soit en faveur d'une tendance à l'assèchement continu soit d'une simple fluctuation d'un régime climatique inchangé ;
- l'analyse statistique montre également que malgré la baisse spectaculaire du total des pluies, le nombre de fortes pluies n'a pas relativement changé ; d'autre part, le défrichement accéléré des jachères dans le Sahel accroît généralement le risque de ruissellement de sorte que les fortes crues de projet ne doivent certainement pas être réduites dans les calculs d'aménagement. ;
- en matière de ressources en eau disponibles pour être accumulées dans des réservoirs, deux effets contradictoires risquent de s'annuler : réduction moyenne des pluies annuelles (sans altération de leur distribution statistique), accroissement de l'écoulement dû à une pluie donnée (effet du défrichement) ;
- pour tout réservoir d'accumulation à effet pluriannuel, la prise en compte de la séquence des années sèches est d'autant plus importante que la durée de vie de l'aménagement est courte (risque de non-satisfaction de la demande à évaluer par modèle de simulation).

En régions tropicales humides, contraste total, l'excès d'eau est le trait marquant. Le développement économique y est plus avancé, appelé à croître encore et vite, donc il est plus spectaculaire : déforestation massive, immensité des plantations, grands barrages. Les besoins prioritaires y sont : la protection contre les inondations par la prévention et la prévision, la maîtrise des grands travaux et de la mise en culture après déforestation pour sauvegarder les patrimoines en eau et sol, le contrôle des situations aquatiques favorables aux grandes endémies (onchocercose, par exemple).

Face à cette situation géographique des tropiques présentée très sommairement et de laquelle on a surtout voulu faire ressortir quelques traits saillants, les activités de recherche et de développement organisées autour des ressources en eau vont s'efforcer de continuer, comme dans un passé récent, à répondre à toutes les demandes. On peut cependant, dans ce domaine de recherche-développement pour une maîtrise de l'eau, mettre en évidence quelques thèmes majeurs :

- la connaissance de la genèse et du régime des précipitations et de l'évapotranspiration à l'échelle régionale dans le Sahel africain. La connexion avec les travaux récents en océanographie physique sur l'Atlantique tropical et en météorologie dynamique sur les circulations des masses d'air doit permettre une approche plus précise des phénomènes pluies et évapotranspiration. L'emploi des méthodes modernes (imagerie satellitaire, radar, traceurs...) est requis. L'espoir est de prévenir des risques de sécheresse ;
- l'influence de l'homme et de ses activités agricoles et forestières sur les ressources en eau doit pouvoir être quantifiée dans la plupart des situations (climat, occupation du sol) rencontrées. L'emploi des bassins expérimentaux doit être développé. Quelques situations extrêmes doivent être analysées en priorité : la déforestation, l'accumulation de l'eau en très petits réservoirs.

predict droughts in order to adapt to them, to protect the ecosystems from deterioration by decreasing losses of land and water.

The impact of the recent and severe droughts in Western Africa could be summarized today as follows:

- statistical analysis shows that this drought was the longer and more severe known, but it does not allow to choice between alternatives whether there is a dry general, trend or it is only a fluctuation of an unchanged climatic regime;
- statistical analysis shows also that in spite of severe decreasing of rainfall amounts, the number of heavy storms is not modified. In another hand, accelerated reduction of fallows duration is increasing the risk of direct surface runoff, so that design floods must not be reduced for future water projects;
- regarding the water availability to be stored in reservoirs, we note two opposite phenomena: reduction of annual rainfall amounts but without alteration of their statistical distribution and increasing of storm runoff (land clearing effect);
- for every big reservoir with pluriannual influence, considering the recent driest sequency of years is more important if effective duration of the hydraulic work functioning is reduced (there is a risk of no supplying the water demand to be estimated through modelling).

The contrast in wet tropical regions is total: too much water is the mean feature.

Economic development is more advanced in these areas and is supposed to continue to grow quickly. For these reasons it is more spectacular: massive deforestation, big plantation estates and large dams.

In these areas, the priorities are protection from flooding through prevention and forecasting, and full control of large projects and of planting after deforestation to safeguard the water and soil-related assets and taking consideration of aquatic situations that lead to endemic diseases such as onchocercosis, for example.

Despite the rather brief presentation of the main features of hydrology in the tropics, research and development activities organized around water resources will attempt to continue, just as they have done in the past, to meet all the needs. However, in the research and development field, several major themes can be highlighted for water control and efficient management:

- a knowledge of precipitation and evapotranspiration generations and cycles on the regional scale inside the African Sahel. The link to recent work in physical oceanography in the tropical Atlantic and in dynamic meteorology on the circulation of air masses should provide a more accurate approach to the rain and evapotranspiration phenomena. The use of modern methods, such as satellite imagery, radar and tracers is essential. It is hoped that the chances of drought will be prevented in the future;
- the effect of mankind's activities in the areas of agriculture and forestry on water resources should be quantifiable in most cases, such as for climate and soil occupancy. The use of experimental basins must be developed. A few extreme situation must receive priority for analysis, such as deforestation and accumulation of water in very small reservoirs.

The conflict over water usage will grow and intensify along with development. They have existed for years in semi-arid areas. To arbitrate the conflicts in the best of human interests, the hydrological approach must be linked

Les conflits sur l'usage de l'eau vont croître et s'amplifier avec le développement. Ils sont présents depuis longtemps en régions semi-arides. Pour les arbitrer au mieux des intérêts humains, l'approche hydrologique doit être associée à une analyse socio-économique. Ceci pose quelques problèmes. A l'échelle des bassins versants, l'eau utilisée en amont n'est plus disponible en aval. Où est la priorité ? Les critères des choix sont-ils dans une production agricole ou dans une satisfaction maximale des besoins des populations ?

- *La modélisation hydrologique va rester l'outil d'analyse le plus performant. Son développement va se faire dans plusieurs directions : documenter les modèles existants et bien expérimentés pour les rendre accessibles au maximum d'utilisateurs, prendre en compte des échelles spatiales et temporelles différentes et adapter en conséquence les algorithmes des fonctions de production (d'infiltration, d'écoulement), rechercher des paramètres de réglage ayant une signification physique afin de faciliter l'application des modèles aux bassins peu ou pas observés, intégrer les matières dissoutes et transportées par les eaux dans la modélisation.*

- *L'autre grande priorité est la formation des hommes et le soutien aux structures.*

with socioeconomic analysis, but that causes a few problems. At the river basins scale, water used upstream is not available downstream. Where is the priority? Are the criteria that are chosen based on increasing agricultural production or on providing human needs?

- *hydrological modelling will continue to be the most effective tool for analysis and it will develop in several directions. Existing models will be documented and well tested to make them accessible to the largest number of users. Different time and space scales will be considered and adapted according to the algorithms of the production functions such as infiltration and flow. Adjustment parameters will be developed with physical meaning so that they facilitate applying models to unobserved or little observed basins. Finally, materials transported by and dissolved in the water will be included in modelling.*

The other major priority is training men. On the one hand, training attempts to continue to provide support to the newly created national hydrological services and to foster creation of those which are still in their early stages.

Références bibliographiques sélectionnées et classées

GÉNÉRALITÉS

- RODIER J • 1971 • A • POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET RECHERCHE DE BASE EN RAPPORT AVEC LE DÉVELOPPEMENT DE LA RESSOURCE EN EAU. CONF. HYDROL. POUR DÉVELOP. ÉCONOM. DE L'AFRIQUE. OMM, ADDIS-ABÉBA, SEPTEMBRE 1971.
- ORSTOM • 1983 • RECHERCHES HYDROBIOLOGIQUES RÉALISÉES EN ZONE TROPICALE. (TEXTE FRANÇAIS ET ANGLAIS) PARIS, ORSTOM EDIT. 79 P.

LES RÉSEAUX HYDROMÉTRIQUES

- CALLEDE J • 1980 • TÉLÉTRANSMISSION PAR LE SYSTÈME ARGOS DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES. L'EXPÉRIENCE DE L'ORSTOM AU SÉNÉGAL. SÉMIN. CEFIGRE, OMM, MAI 1979.
- CALLEDE J • 1983 • EMPLOI DES SATELLITES A ORBITE POLAIRE POUR LA COLLECTE DE MESURES EFFECTUÉES AUX STATIONS HYDROMÉTRIQUES. SYMP. INTERN. AISH, HAMBOURG, AOÛT 1983.
- DUBREUIL P / HLAVEK R • 1970 • NOUVEAUX LIMNIGRAPHES ET AUTOMATISATION DE LA GESTION D'UN RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE EN FRANCE. COLL. INTERN. COBLENCÉ, 1970.
- DUBREUIL P • 1970 • CONCEPTION ET STRUCTURE D'EXPLOITATION D'UN RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE NATIONAL. SYMP. SCIENT. INTERN. INFORMATIQUE ET EAU, MONTPELLIER, MAI 1970.
- DUBREUIL P / GUISSAFRE J • 1971 • LA PLANIFICATION DU RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE MINIMAL. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. VIII, 2.
- NOUVELOT J F • 1972 • MÉTHODOLOGIE POUR LA MESURE EN RÉSEAU DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION DANS LES COURS D'EAU INTERTROPICAUX PEU CHARGÉS. CAH. ORSTOM. SÉR. HYDROL., VOL. IX, 1.
- OLIVRY J C • 1986 • B. POSSIBILITÉS D'ALLÈGEMENT DES RÉSEAUX HYDROMÉTRIQUES DANS LES P.E.D. APRÈS RÉALISATION DE SYNTHÈSES HYDROLOGIQUES RÉGIONALES. (PRÉSENTÉ A ASS. GÉN. AISH, BUDAPEST, JUIL. 1986).
- POUYAUD B • 1975 • LA MESURE DE L'HUMIDITÉ DU SOL PAR CHOCS THERMIQUES. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XII, N 4.
- ROCHE M • 1965 • PRINCIPES ET ORGANISATION DES RÉSEAUX HYDROMÉTRIQUES PLANIFIÉS EN CLIMATS TROPICAUX (PAYS EN DÉVELOPPEMENT). SYMP. QUÉBEC, AIHS/OMM, JUIN 1965.
- RODIER J • 1976 • CONTRAINTES DANS LA PLANIFICATION ET L'ENTRETIEN DES RÉSEAUX DANS LES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT. CONF. OMM, OTTAWA, JUILL. 1976.

LES FICHIERS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

- CLAUDE J • 1974 • UNE CHAÎNE DE TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES MESURES DE SALINITÉ. COLL. INFORMATIQUE, AUTOMATISATION ET SYST. D'EAU, WASHINGTON, AVRIL 1974.
- COCHONNEAU • 1986 • HYDROM. LOGICIEL DE BANQUE DE DONNÉES HYDROMÉTRIQUES. LABO. D'HYDROL. MONTPELLIER (A PARAITRE).
- HIEZ G • 1977 • L'HOMOGÉNÉITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XIV, N° 2.
- JACCON G / SECHET P • 1980 • BASES DE DONNÉES HYDROLOGIQUES DU NORD-EST BRÉSILIEN. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XVII, N° 3-4.
- ROCHE M • 1968 • TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES ET DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES A L'ORSTOM. CAH. ORSTOM. SÉR. HYDROL., VOL. V, 3.
- ROCHE M / ET AL • 1974 • ÉTUDE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'UTILISATION DES DONNÉES CLIMATIQUES DE L'AFRIQUE TROPICALE. 3 VOL., 45-75-76 P, CIEH, MIN. COOPÉRATION ÉDIT. PARIS.
- SIRCOULON J • 1974 • UN SYSTÈME DE STOCKAGE INFORMATIQUE DES DONNÉES HYDROLOGIQUES. COLL. INFORMATIQUE, AUTOMATISATION ET SYST. D'EAU, WASHINGTON, AVRIL 1974.
- VUILLAUME G • 1982 • SOME SOLUTIONS USED IN COLLECTING, TRANSMITTING, PROCESSING AND CREATING DATA BANKS IN NON-TEMPERATED ZONES., INTERN. SYMP. BERN, SEPT. 1982.

L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DES GRANDS BASSINS

- AKMANOGLU N • 1970 • DONNÉES D'OBSERVATIONS MINIMALES POUR LA DÉTERMINATION DES MODULES INTERANNUELS PLUVIOMÉTRIQUES ET HYDROMÉTRIQUES EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET ÉQUATORIALE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. VII, 2.
 - BILLON B / GUISSAFRE J • 1974 • LE BASSIN DU FLEUVE CHARI. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM, N° 2, 450 P.
 - BRUNET-MORET Y / CHAPERON P / ET AL • 1986 • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU FLEUVE NIGER - 2 TOMES. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM N° 8.
 - BRUNET-MORET Y • 1969 • ÉTUDE DE QUELQUES LOIS STATISTIQUES UTILISÉES EN HYDROLOGIE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL. VOL. VI, 3.
 - CHAPERON L / LHOÏTE Y / VUILLAUME G • 1982 • LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DE LA GUADELOUPE. COLL. MONOGR. HYDROL. N° 7, ORSTOM ÉDIT. 2 VOL.
 - DUBREUIL P / HIEZ G • 1964 • LES RÉGIMES HYDROLOGIQUES EN GUYANE FRANÇAISE. MÉMOIRES ORSTOM, PARIS, 119 P.
 - DUBREUIL P / GIRARD G / HERBAUD J • 1968 • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DU JAGUARIBE. BRÉSIL. MÉMOIRES ORSTOM N° 28, PARIS, 385 P.
 - DUBREUIL P / GUISSAFRE J / ET AL • 1974 • LE BASSIN DE LA RIVIÈRE SANAGA. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM, N° 3, 350 P.
 - GIRARD G / ET AL • 1971 • APERÇU SUR LES RÉGIMES HYDROLOGIQUES IN « LE MILIEU NATUREL DE LA CÔTE D'IVOIRE ». MÉMOIRES ORSTOM, N° 50, PP. 109-155.
 - GUISSAFRE J / KLEIN J C / MONIOD F • 1976 • LES RESSOURCES EN EAU DE LA MARTINIQUE. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM, N° 4, 212 P.
 - LAMAGAT J P / MOLINIER M • 1983 • ÉTUDE DES ANOMALIES DES CRUES DU NIGER. COLL. TRAV. ET DOC. ORSTOM, N° 161, 112 P.
 - MONIOD F / POUYAUD B • 1977 • LES BASSINS DU FLEUVE VOLTA. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM N 5, PARIS.
 - OLIVRY J C • 1986 • A. RÉGIMES DES FLEUVES ET RIVIÈRES DU CAMEROUN. THÈSE DOCT. ÉTAT, U.S.T.L. MONTPELLIER (A PARAITRE COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM N° 9).
 - ROCHE M A • 1973 • TRAÇAGE NATUREL SALIN ET ISOTOPIQUE DES EAUX DU SYSTÈME HYDROLOGIQUE DU LAC TCHAD. THÈSE D'ÉTAT. UNIV. PARIS VI, 375 P.
 - ROCHE M • 1983 • L'APPORT DE L'ORSTOM DANS L'HYDROLOGIE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL. VOL. XX, 3-4.
 - ROCHETTE C • 1974 • LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM N° 1, 325 P., PARIS.
 - RODIER J • 1964 • RÉGIMES HYDROLOGIQUES DE L'AFRIQUE NOIRE A L'OUEST DU CONGO. THÈSE DOC. ING., UNIV. TOULOUSE, 137 P.
 - RODIER J • 1977 • INVENTAIRE DES RESSOURCES EN EAUX SUPERFICIELLES DANS LES P.V.D. CONFÉR. DE L'EAU, MAR DEL PLATA, O.N.U., MARS 1977.
 - RODIER J / COLOMBANI J / ET AL • 1981 • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DE LA MEDJERDAH. TUNISIE. COLL. MONOGR. HYDROL. ORSTOM N° 5.
- ### LES RESSOURCES EN EAUX DES PETITS BASSINS RURAUX
- ASSELINE J / VALENTIN C • 1978 • CONSTRUCTION ET MISE AU POINT D'UN INFILTRMÈTRE A ASPERSION. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL. VOL. XV, 4.
 - CADIER E • 1984 • MÉTHODE D'ESTIMATION DES ÉCOULEMENTS DES PETITS BASSINS EN ZONE SEMI-ARIDE (VERS. EN PORTUGAIS). SUDENE SÉR. HIDROLOGIA N° 21, RÉCIFE, BRÉSIL.
 - CASENAVE A / ET AL • 1982 • ÉTUDE DES CRUES DÉCENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS FORESTIERS EN AFRIQUE TROPICALE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XIX, 4.
 - DUBREUIL P / ET AL • 1972 • RECUEIL DES DONNÉES DE BASE DES BASSINS REPRÉSENTATIFS ET EXPÉRIMENTAUX DE L'ORSTOM. 1951-69. ORSTOM, PARIS, 916 P.
 - DUBREUIL P • 1973 • LE TRANSFERT D'INFORMATION HYDROLOGIQUE A DES BASSINS NON OBSERVÉS. COLL. DE MADRID. UNESCO/OMM. AIHS PUBLIC N° 108, VOL. 1.

- DUBREUIL P / VUILLAUME G • 1975 • INFLUENCE DU MILIEU PHYSICO-CLIMATIQUE SUR L'ÉCOULEMENT DE PETITS BASSINS INTERTROPICAUX. SYMP. INTERN. TOKYO, AIHS PUBLISH N° 117.
- DUBREUIL P • 1985 • REVIEW OF FIELD OBSERVATIONS OF RUNOFF GENERATION IN THE TROPICS. JOURN. OF HYDROL. (80) PP 237-264.
- LAFFORGUE A / NAAH E • 1976 • EXEMPLE D'ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES FACTEURS DU RUISSELLEMENT SOUS PLUIE SIMULÉE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XIII N° 3.
- RIBSTEIN P / RODIER J • 1986 • UTILISATION DES BASSINS REPRÉSENTATIFS POUR LA PRÉDÉTERMINATION DES CRUES ET L'ESTIMATION DES APPORTS AU SAHEL (A PRÉSENTER COLLOQUE CIEHOM « NORMES HYDRAULIQUES », OUAGADOUGOU).
- RODIER J A • 1975 • ÉVALUATION DE L'ÉCOULEMENT ANNUEL DANS LE SAHEL TROPICAL AFRICAÏN. COLL. TRAV. ET DOCUM. DE L'ORSTOM N° 46, PARIS, 121 P. (ENGL. VERSION N° 145, 1982).
- RODIER J • 1976 • ÉVALUATION DE L'ÉCOULEMENT ANNUEL DANS LES RÉGIONS TROPICALES SÈCHES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XIII, N° 4.
- RODIER J / ROCHE M • 1978 • RIVER FLOW IN ARID REGIONS IN "HYDROMETRY" R.W. HERSCHY EDIT., J. WILEY AND SONS, N. YORK.

L'UTILISATION DES EAUX A DES FINS MULTIPLES

- BRUNET-MORET P • 1968 • ÉTUDE GÉNÉRALE DES AVERSES EXCEPTIONNELLES EN AFRIQUE OCCIDENTALE. RAPPORT DE SYNTHÈSE, 17 P., 12 CARTES H.T., ORSTOM, PARIS.
- DOSSEUR H • 1982 • TECHNIQUES DE SIMULATION POUR L'AMÉNAGEMENT DES EAUX. EXEMPLE DU MODÈLE DES EAUX DU NORD DE LA TUNISIE. 4^e CONGR. INTERN. PLANIFICATION, GESTION DES EAUX, MARSEILLE, MAI 1982.
- GIRARD G / ET AL • 1972 • MODÈLE PRÉCIPITATION-DÉBITS A DISCRÉTISATION SPACIALE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. IX, 4.
- 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.
- GIRARD G / ET AL • 1981 • LE MODÈLE COUPLÉ. SIMULATION CONJOINTE DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE ET SOUTERRAINS SUR UN SYSTÈME HYDROLOGIQUE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XVIII, N° 4.
- IBIZA D • 1985 • ÉTUDE DE L'INFILTRATION AU PAS DE TEMPS JOURNALIER SUR DES PETITS BASSINS. UNE FONCTION DE PRODUCTION AUX PETITS PAS DE TEMPS. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XXI, 3.
- LAMAGAT J P • 1984 • FAISABILITÉ D'UNE MÉTHODE DE PRÉVISION DES CRUES DU NIGER. ORSTOM, ISPRA-EURATOM, 50 P.
- LE BARBE L • 1982 • ÉTUDE DU RUISSELLEMENT URBAIN A OUAGADOUGOU. ESSAI D'INTERPRÉTATION THÉORIQUE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XIX, 3.
- ROCHE M • 1973 • A PRATIQUES COURANTES POUR L'ÉVALUATION DES CRUES ET DES DÉBITS D'ÉTIAGES PRIS EN COMPTE DANS LES PROJETS. COLL. DE MADRID, UNESCO/OMM. AISH PUBLIC N° 108, VOL. 2.
- ROCHE M • 1973 • B. HYDROLOGIE ET AMÉNAGEMENT DES EAUX (MÉTHODES STRUCTURALES). CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. X, N° 1.
- RODIER J • 1967 • CONTRIBUTION A LA MÉTHODOLOGIE DE L'ÉVALUATION DES DÉBITS DE CRUES MAXIMAUX EN CAS D'INSUFFISANCE DE DONNÉES. COLL. DE LÉNINGRAD, AIHS PUBLIC, N 84.
- RODIER J • 1971 • B. CALCUL DES DONNÉES SUR LES EAUX DE SURFACE EN VUE DE LEUR UTILISATION DANS L'ÉTABLISSEMENT DES PROJETS. CONF. HYDROL. POUR DEVELOP. ECONOM. DE L'AFRIQUE. OMM. ADDIS-ABÉBA, SEPT. 17.
- RODIER J • 1977 • RECHERCHES EN AFRIQUE OCCIDENTALE SUR LES EFFETS DE L'URBANISATION SUR LE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL. COLL. URBANISATION, INDUSTRIALISATION, AMSTERDAM, OCT. 77.
- RODIER J • 1983 • HYDROLOGICAL COMPUTATION FOR WATER RESOURCES DEVELOPMENT WITH INADEQUATE DATA SYMP. INTERN. AISH. HAMBOURG, AOÛT 1983.

L'UTILISATION DES EAUX ET DE LA PRODUCTION AGRICOLE

- ALBERGEL J / CARBONNEL J P • 1985 • ALÉAS CLIMATIQUES ET PRODUCTION AGRICOLE. LE COTON AU BURKINA. ACTA OECOLOGICA. VOL. 6 N° 3.
- ALBERGEL J / GIODA A • 1986 • EXTENSION DE LA SURFACE AGRICOLE ET MODIFICATION DE L'ÉCOULEMENT. ANALYSE SUR DEUX BASSINS DE LA SAVANE AFRICAÏNE. XIX^e JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE, PARIS, SEPT. 86.
- CAMUS H / ET AL • 1976 • ANALYSE ET MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT SUPERFICIEL D'UN BASSIN TROPICAL. INFLUENCE DE LA MISE EN CULTURE. CÔTE D'IVOIRE, KORHOGO. COLL. TRAV. ET DOCUM. ORSTOM N° 52., PARIS, 79 P. + ANN.
- DUBREUIL P / VUILLAUME G • 1969 • ÉTUDE ANALYTIQUE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION EN RÉGION TROPICALE SUR BASSINS DE QUELQUES HECTARES. KOUNTKOUZOUT, NIGER, SYMP. INTERN PRAGUE, JUIN 1970.
- IBIZA D • 1975 • MODIFICATION DU MILIEU NATUREL DU HAUT MALGACHE PAR LA MISE EN CULTURE. BASSINS EXPÉRIMENTAUX D'AMBATOMAINTY. SYMP. TOKYO, AIHS PUBLIC N° 117.
- MILLET B • 1984 • HYDROLOGIE ET HYDROCHIMIE D'UN MILIEU LAGUNAIRE TROPICAL. LE LAC TOGO. THÈSE SPÉC. UNIV. PARIS VI.
- POURRUT P • 1980 • ESTIMATION DE LA DEMANDE EN EAU DU SECTEUR AGRICOLE ET DES DISPONIBILITÉS POUR LA SATISFAIRE. ÉLÉMENTS DE BASE POUR LA PLANIFICATION DE L'IRRIGATION EN ÉQUATEUR. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XVII, N° 2.
- POUYAUD B • 1985 • ÉVAPORATION DES NAPPES D'EAU LIBRE EN CLIMAT TROPICAL SEC. THÈSE DOCT. ÉTAT. UNIV. PARIS XI (A PARAÎTRE COLL. ÉTUDES ET THÈSES ORSTOM).
- RIOU C • 1975 • LA DÉTERMINATION PRATIQUE DE L'ÉVAPORATION. APPLICATION A L'AFRIQUE CENTRALE. MÉMOIRES ORSTOM N° 80, PARIS, 236 P.
- RIOU C • 1980 • UNE FORMULE EMPIRIQUE SIMPLE POUR ESTIMER L'ÉVAPOTRANSPIRATION MOYENNE EN TUNISIE. CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL., VOL. XVII, N° 2.
- ROCHE M A • 1979 • ÉTUDE SUR BASSINS EXPÉRIMENTAUX DES POSSIBILITÉS D'EXPLOITATION ET D'AMÉNAGEMENT DE LA FORÊT AMAZONIENNE EN GUYANE. CONF. INTERN. IBADAN, 1979.
- ROOSE E • 1977 • ÉROSION ET RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST. VINGT ANS DE MESURES EN PETITES PARCELLES EXPÉRIMENTALES. COLL. TRAV. ET DOCUM. ORSTOM N° 78, 108 P.
- SARRAILH J M • 1984 • MISE EN VALEUR DE L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER GUYANAÏS. OPÉRATION ECEREX. RÉSUMÉ DES PREMIERS RÉSULTATS. REVUE BOIS ET FORÊTS DES TROP., N° 206, 4^e TRIM.

LES EAUX SOUTERRAINES

- ARCHAMBAULT J • 1960 • LES EAUX SOUTERRAINES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE. EDIT. BERGER LEVRAULT, PARIS.
- BARRAT J M / PUYOO S • 1984 • ANALYSE HYDROGÉOLOGIQUE PAR MÉTHODE STATISTIQUE DE LA CAMPAGNE 1 000 FORAGES AU NIGER. ED. BRGM 84 SGN 309 EAU/AGE. ORLÉANS, 70 P.
- BRGM • 1975 • NOTICES EXPLICATIVES DES CARTES DE PLANIFICATION POUR L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DE L'AFRIQUE SAHÉLIENNE, 118 P., PRODUCTIVITÉS DES NAPPES (3 CARTES) COÛT MOYEN DE CAPTAGE (3 C.) APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION (3 C.) CARTES H.T. 1 / 1 500 000.
- BRGM • 1979 • CARTE DE PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE L'AFRIQUE SOUDANO-SAHÉLIENNE (AU 1 / 1 500 000) ED. CIEH, OUAGADOUGOU. IDEM 1979 CAMEROUN, CÔTE D'IVOIRE, TOGO, GHANA, BÉNIN ; IDEM 1982 CONGO, GABON.
- COLLIN J J • 1986 • STRATÉGIE DU DÉVELOPPEMENT DU RECOURS AUX EAUX SOUTERRAINES POUR L'IRRIGATION EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE. BRGM NOTE TECH. 86/1. 24 P. ORLÉANS.
- POINTET TH • 1985 • APERÇUS SUR L'HYDROGÉOLOGIE DES MILIEUX FISSURÉS BRGM NOTE TECHN. 85/31. 22 P. ORLÉANS.

L'INFORMATION SCIENTIFIQUE DISPONIBLE

- RODIER J • 1963 • BIBLIOGRAPHIE HYDROLOGIQUE AFRICAÏNE. UNESCO ÉDIT. PARIS, 166 P.
- VERNEUIL M P • 1984 • HYDOC. LOGICIEL DOCUMENTAIRE HYDROLOGIQUE. 3 VOL. ORSTOM, PARIS, 44 P. + ANN.

LA FORMATION DES HYDROLOGUES

- ALDEGHERI M • 1979 • MESURES DES DÉBITS A PARTIR DES VITESSES. MANUEL D'HYDROMÉTRIE. Vol. 4, COLL. INFORM. ET DOC. TECHN. N° 41. ORSTOM.
- CASTANY G • 1968 • PROSPECTION ET EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES. ÉD. DUNOD, PARIS.
- DUBREUIL P • 1974 • INITIATION A L'ANALYSE HYDROLOGIQUE (DIX EXERCICES SUIVIS DE CORRIGÉS). ORSTOM ET MASSON ÉDIT. PARIS, 216 PAGES.
- PIEYNS S • 1978 • COURS D'HYDROLOGIE. AGRHYMET. NIGER.
- ROCHE M • 1963 • HYDROLOGIE DE SURFACE. GAUTHIER-VILLARS ÉDIT., 430 P., PARIS.

LES GRANDS PROBLÈMES ACTUELS ET LES PERSPECTIVES

- ROCHE M / RODIER J / SIRCOULON J • 1975 • LES ASPECTS HYDROLOGIQUES DE LA SÉCHERESSE RÉCENTE EN AFRIQUE DE L'OUEST. SYMP. SUR LES SÉCHERESSES CONTINENTALES. XVI^e ASS. GÉN. UGGI GRENOBLE.
- ROCHE M / MANSOUR S • 1979 • DROUGHTS IN WEST AND CENTRAL AFRICA. INTERN. SYMP. OF HYDROL. ASPECTS OF DROUGHTS. NEW-DELHI, DÉC. 79.
- RODIER J • 1971 • B. CALCUL DES DONNÉES DES EAUX DE SURFACE EN VUE DE LEUR UTILISATION DANS L'ÉTABLISSEMENT DES PROJETS. CONF. HYDROL. POUR DEVELOP. ÉCONOM. DE L'AFRIQUE OMM, ADDIS-ABÉBA, SEPT. 1971.
- SIRCOULON J • 1984 • LA DIMINUTION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE AU SAHEL DEPUIS 1968. CONF. SCIENT. OMM, DAKAR, DÉC. 84.

ANNEES	1958	1974	1985
PAYS			
SENEGAL	---	---	D partiel
MAURITANIE	---	---	C jusqu'en 1983
MALI	B	B	D
COTE D'IVOIRE	A	B	C puis D
GUINEE	---	---	---
BURKINA-FASO	---	C	---
NIGER	---	A	D
TOGO	A	B	B
BENIN	C	---	C
TCHAD	A	A	---
CAMEROUN	A	A	D
RCA	A	A	---
CONGO	A	A	B
GABON	A	A	---
RWANDA	---	C	---
MADAGASCAR	A	A	A partiel
ALGERIE	---	C puis D	---
MAROC	---	D	---
TUNISIE	---	C puis D	---
BRESIL	---	D partiel	D
BOLIVIE	---	---	D

- A GESTION DIRECTE
- B GESTION EN ASSOCIATION AVEC LE SERVICE NATIONAL
- C DIRECTION DU SERVICE NATIONAL PAR CONTRAT
- D CONSEIL AU SERVICE NATIONAL

M.B. L'ORETOM gère également les réseaux des départements français d'outre-mer (procédure A en Guadeloupe, Guyane et Martinique) et des territoires français d'outre-mer (procédure C en Nouvelle-Calédonie et D à Tahiti)

Fig. I. Historique de gestion des réseaux hydrométriques
Hydrometric networks: management background

MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DU JAGUARIBE

Cours d'eau Jaguaribe
Station Poste Gordo
Superficie du bassin : 46 064 km²
Pluviométrie moyenne sur 53 ans : 725 mm environ
Période moyenne sans écoulement : fin août au début février environ.

Écoulement annuel : Période observée valable de 4 ans étendue à 53 ans.

Moyenne	55 mm	80 m ³ /s	1,7 l/s km ²
Médiane	34 mm	50 m ³ /s	1,1 l/s km ²

Coefficient de variation (1,15)
Module décennal faible estimé à (7,4) m³/s
Module décennal fort estimé à (186) m³/s

Crues : Période d'apparition du 1^{er} mars au 30 avril environ (75 % de chances).

Crue maximale observée en 4 ans	1 ^{er} mars 1963	1 725 m ³ /s	37,5 l/s km ²
Crue annuelle estimée à		1 120 m ³ /s	24 l/s km ²
Crue décennale estimée à		3 125 m ³ /s	68 l/s km ²
Crue centennale estimée à		(5 300) m ³ /s	(115) l/s km ²

Tarissement moyen : division par 10 du débit en 45 jours environ

Débits mensuels : (m³/s) pour la période observée valable de 4 ans.

O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
---	---	---	76	49	287	411	121	199	6,3	2,2	0,6

Hydraulicité des 4 ans : 1,03

Entre parenthèses valeurs douces

TABLEAUX RECAPITULATIFS N°

XLIII

	VOLTA
Cours d'eau	SENCHI
Station	
Superficie du bassin versant en km ²	393870
Période d'observations hydrométriques	1930-1932, 36-48, 48-55, 54-74
Précipitations interannuelles (mm) 1950-1974	1073
MODULE (1^{er} mars - 28 février)	
Moyenne 1956-1974 en m ³ /s	1210
Moyenne 1936-1974 en m ³ /s	1180
Valeurs estimées pour les récurrences	
- décennale humide en m ³ /s	1870
- décennale sèche en m ³ /s	604
Irrégularité interannuelle C _v	0,467
K ₃	3,09
CRUES (débit moyen journalier)	
Maximum observé (m ³ /s), et date	13900 le 23-IX-63
Valeurs estimées pour les récurrences	
- bisannuelle en m ³ /s	6820
- décennale en m ³ /s	10800
- centennale en m ³ /s	14500
Date médiane des hautes eaux	6-X
Intervalle à probabilité de 50 %	1er-X / 12-X
ETIAGES	
Temps caractéristique de tarissement (jour)	41
Valeurs estimées pour les récurrences	
- bisannuelle en m ³ /s	24,2
- décennale sèche en m ³ /s	(16,2)
Date médiane des basses eaux	30-IV
Intervalle à probabilité de 50 %	17-IV / 12-V
BILAN MOYEN D'ÉCOULEMENT	
Déficit en mm	976
Coefficient en %	9,0

DÉBITS MOYENS MENSUELS (m³/s) 1956-1974

N°	M	A	M	J	Jc	A	S	O	N	D	J	F
XLIII	29,6	29,1	60,4	296	823	1810	4870	5060	1230	161	56,4	31,7

Fig. II. Fig. III. Analyse statistique des ressources d'un grand fleuve
Statistical analysis of a major river's resources

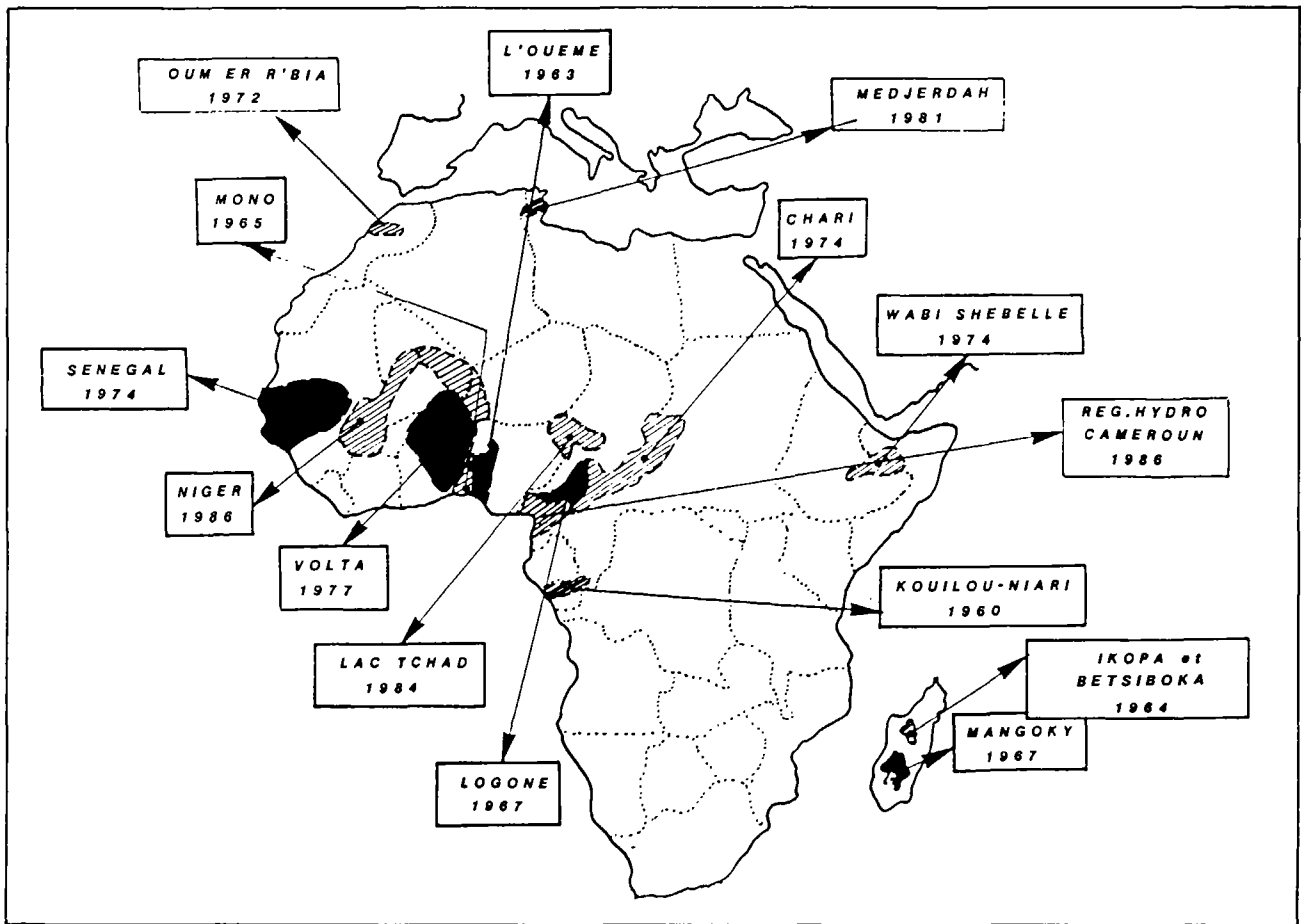


Fig. IV. Monographies hydrologiques en Afrique tropicale
Hydrological monographs in Africa

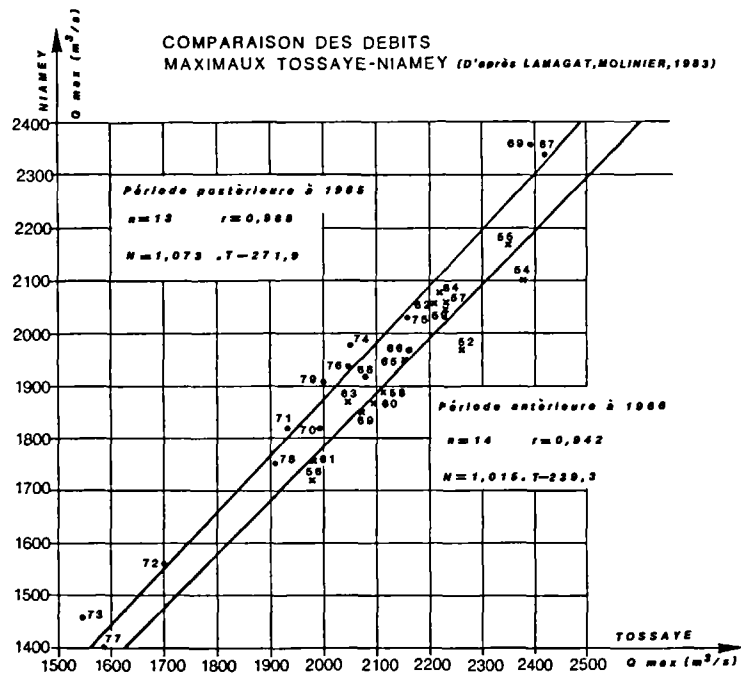
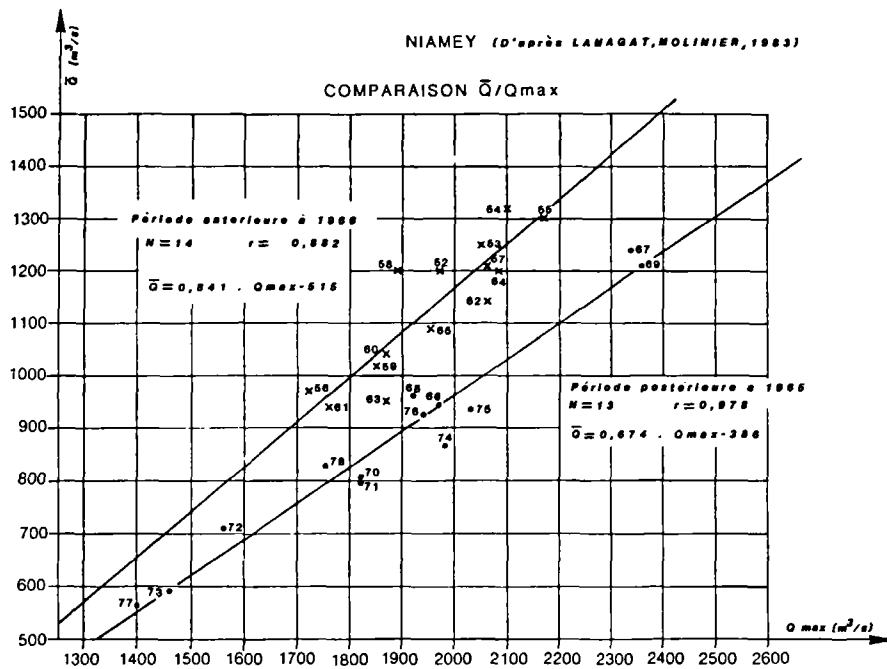
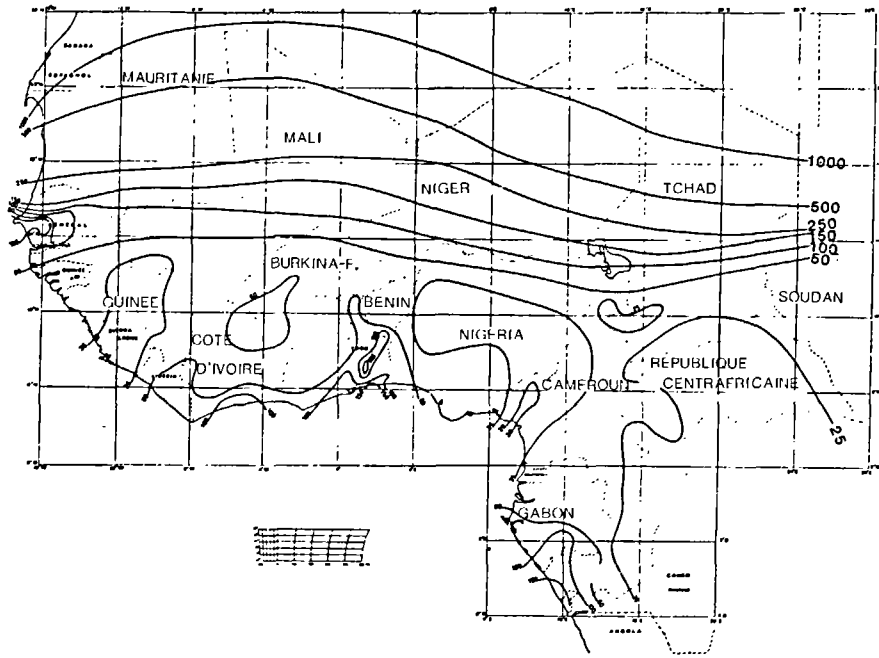
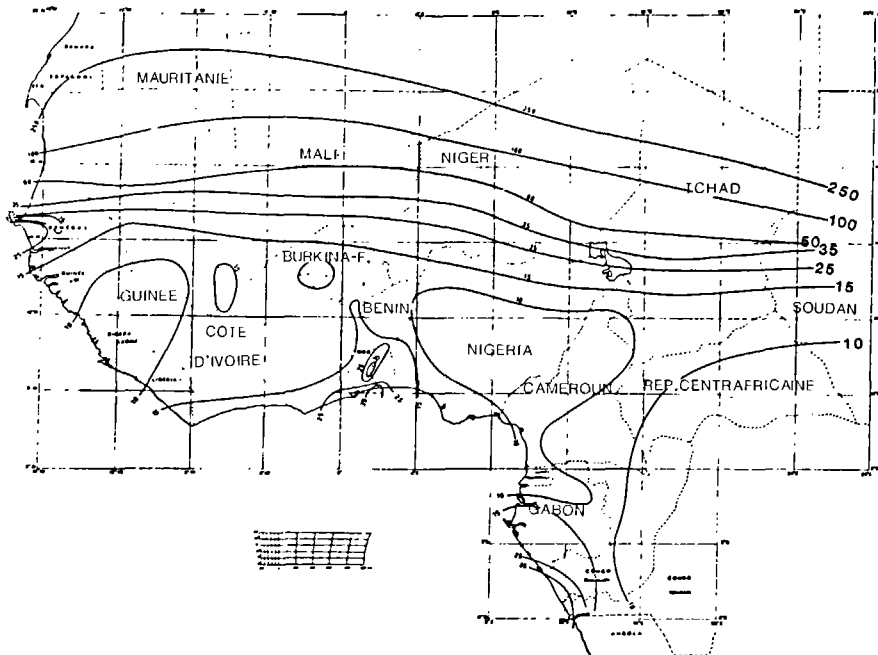


Fig. V. Fig. V bis. Anomalie du régime du Niger
 The Niger river regime anomaly



— Courbes d'iso-M pour $\epsilon = 0,05$; $1 - \alpha = 0,95$. Intervalles de confiance à 0,70 des courbes.

(D'APRÈS ARMANOGLU, 1970)



— Courbes d'iso-M pour $\epsilon = 0,10$; $1 - \alpha = 0,95$. Intervalles de confiance à 0,70 des courbes.

(D'APRÈS ARMANOGLU, 1970)

Fig. VI. Fig. VII. Durée d'observations pluviométriques pour une précision donnée
Duration of pluviometric observations for a given degree of accuracy

AFRIQUE DE L'OUEST (d'après DUBREUIL, 1972)

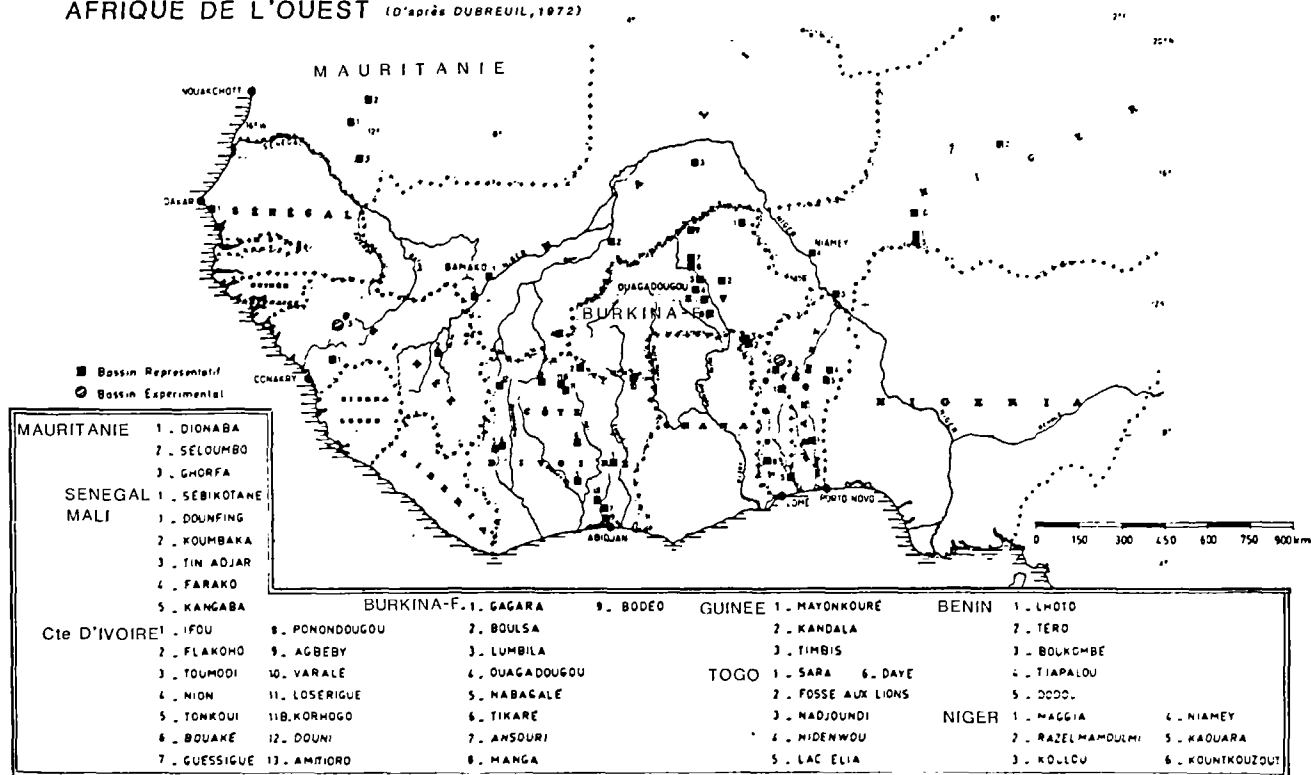


Fig. VIII. Répartition géographique des bassins représentatifs
Geographical distribution of representative basins

AFRIQUE CENTRALE (D'après DUBREUIL, 1972)

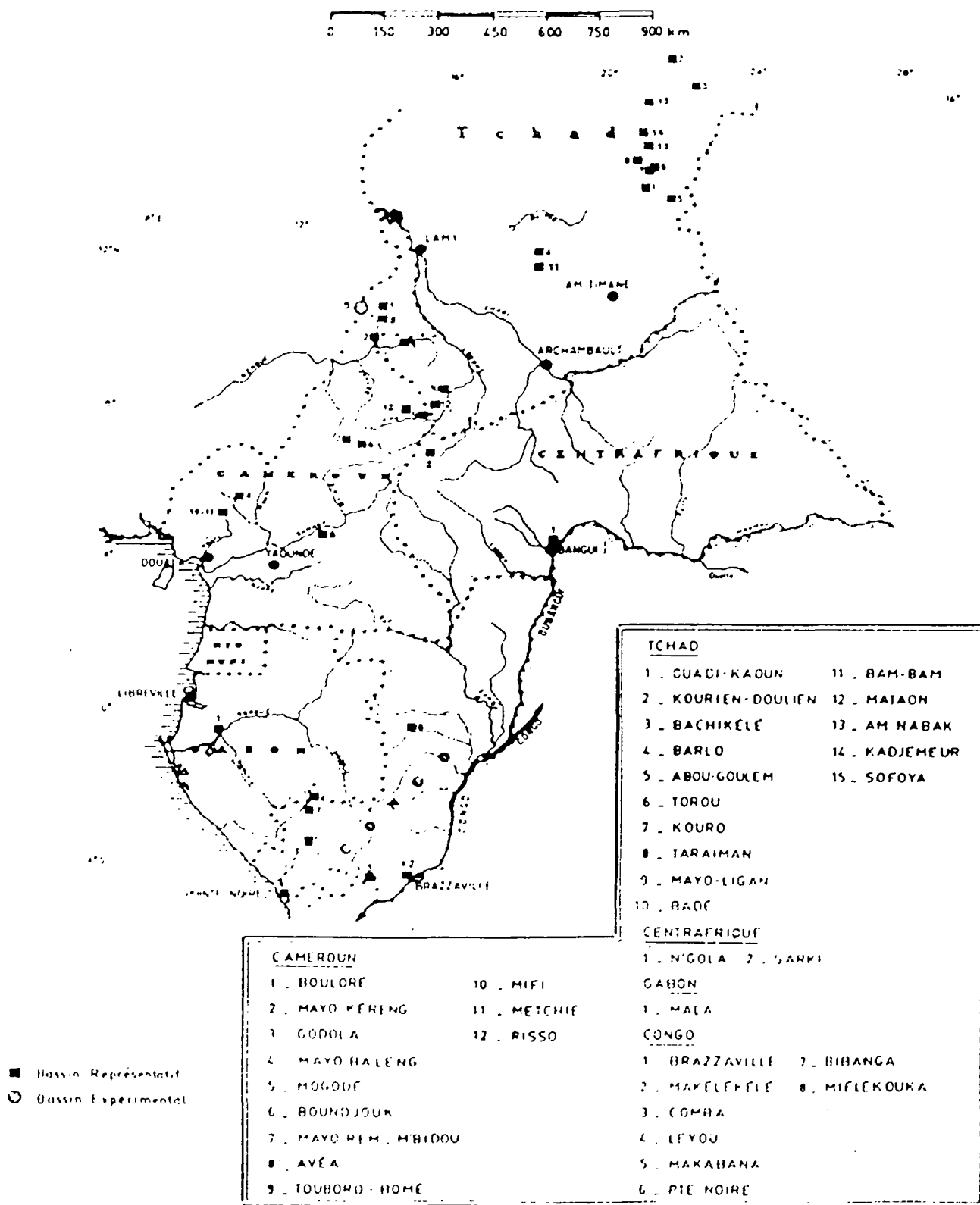


Fig. VIII. Répartition géographique des bassins représentatifs
Geographical distribution of representative basins

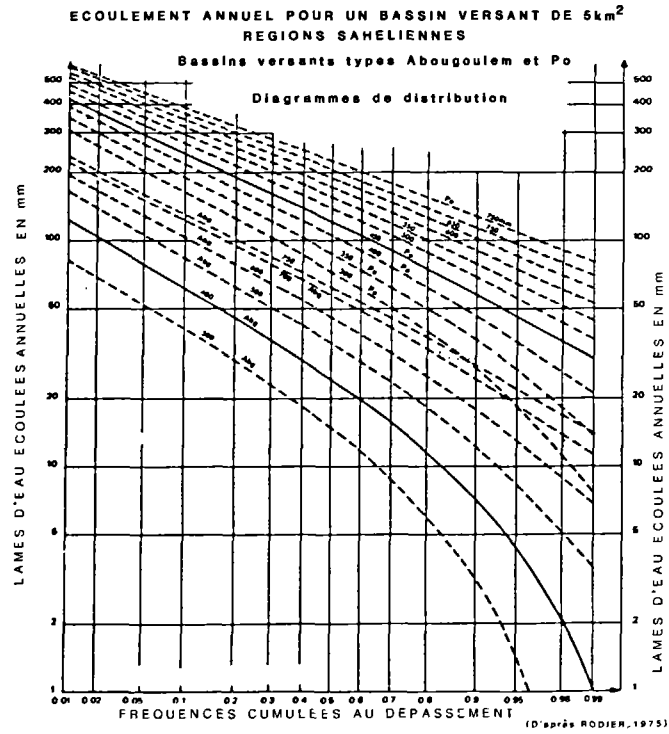


Fig. IX. Répartition statistique de l'écoulement annuel sur un petit bassin
Statistical distribution of annual discharge of small basin

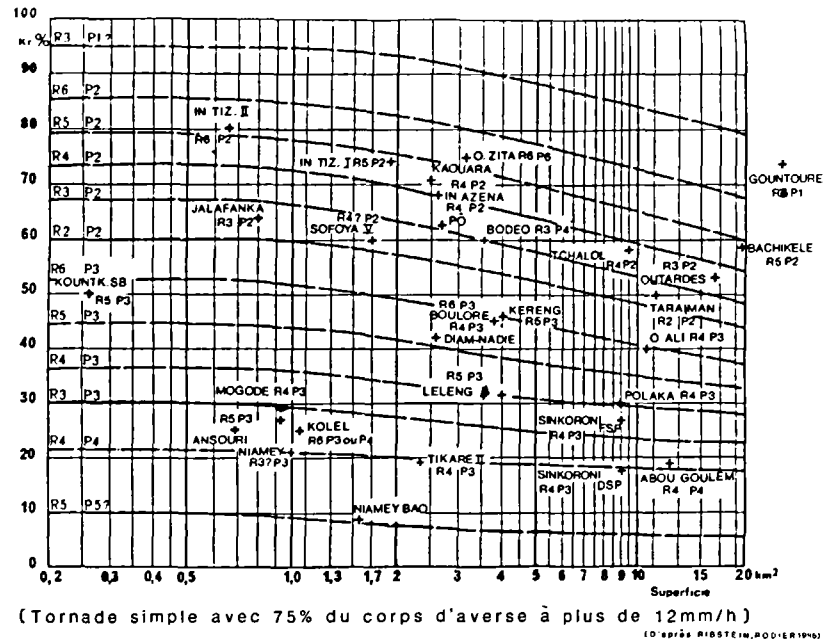


Fig. X. Procédure de calcul de la part d'écoulement dû à une averse sur un petit bassin
Procedure for calculating the percentage of runoff caused by 100 mm storm over a small basin

PLUIE ANNUELLE (mm)		
< 1000	JAMAIS	
1000 à 1250	SCHISTES, ARGILES TERRAINS GRANITIQUES	JAMAIS $Q < 0,5 \text{ l/s.km}^2$ si existe une nappe temporaire bien drainée
	GRES	$Q \leq 0,5 \text{ l/s.km}^2$ TOUJOURS
1250 à 1600	SCHISTES, ARGILES, GNEISS MICMATITES	JAMAIS
	a. TERRAINS GRANITIQUES	Oui, si existe une nappe tempo- raire bien drainée
	b. GRES	TOUJOURS
a et b :		$1 < Q < 7 \text{ l/s km}^2$
> 1600	TOUJOURS	$1 < Q < 9 \text{ l/s km}^2$

Fig. X bis. Occurrence d'un débit d'étiage sur petit bassin
Occurrence of steady base flow on tropical catchments

AFRIQUE DE L'OUEST $1 < A < 120 \text{ km}^2$	$Q \times 10 = K_{10} \cdot R_{10} \frac{A^\alpha}{T_b}$	$Q \times 10$ débit de pointe décennal
		K10 Coeff. de ruisselle- ment décennal
		R10 Pluie décennale
		A Surface du bassin
		Tb temps de base de la crue
		α Coeff. de forme de la crue
200 < A	$Q \times 10 = k \cdot A^n$	Forêt humide $n \approx 0,50$ Zone semi-aride $n \approx 0,80$
Nord-est du Brésil $200 < A < 6000 \text{ km}^2$	$k = (7,5 R_a - 50 \text{ S.S.} - 925) \text{ DP}$	Ra Pluie annuelle SS % terrains sédimentaires DP forme du réseau de drainage
AFRIQUE DE L'OUEST $1 < A < 120 \text{ km}^2$	$t_m \text{ et } T_b = f(a\sqrt{A+b})$	t_m temps de montée de la crue
	a dépend de la	pente ↘ taille du bassin ↗ forme du réseau de drainage ↗

Fig. X ter. Débits de crue sur petit bassin
Flood discharges on small catchments

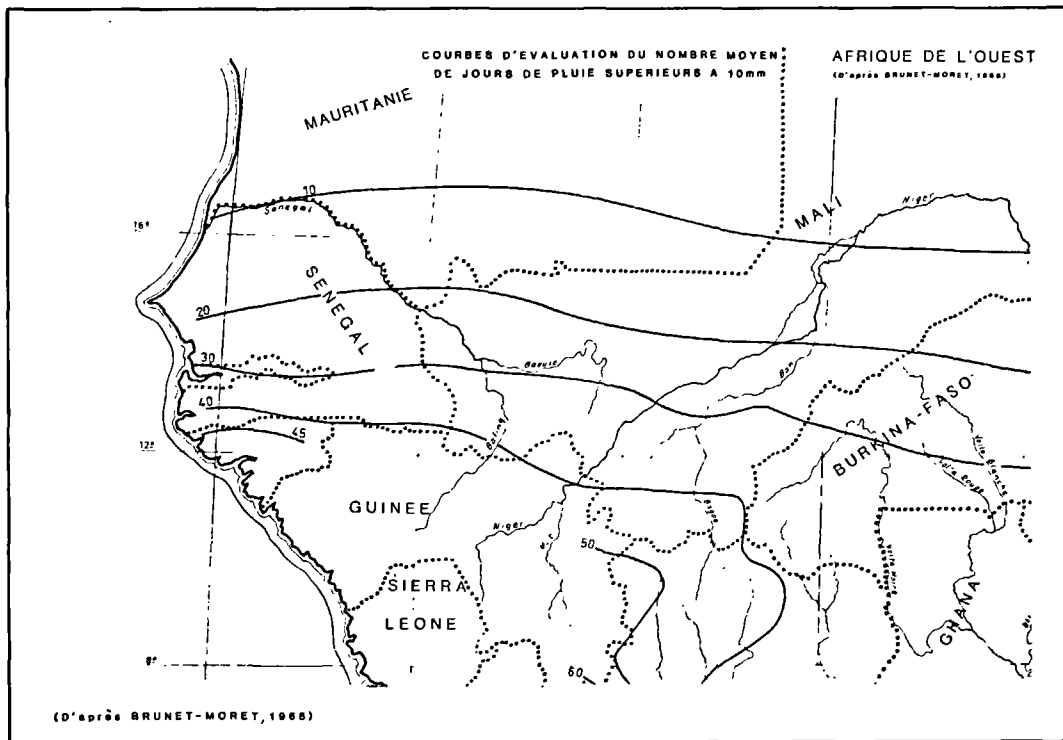
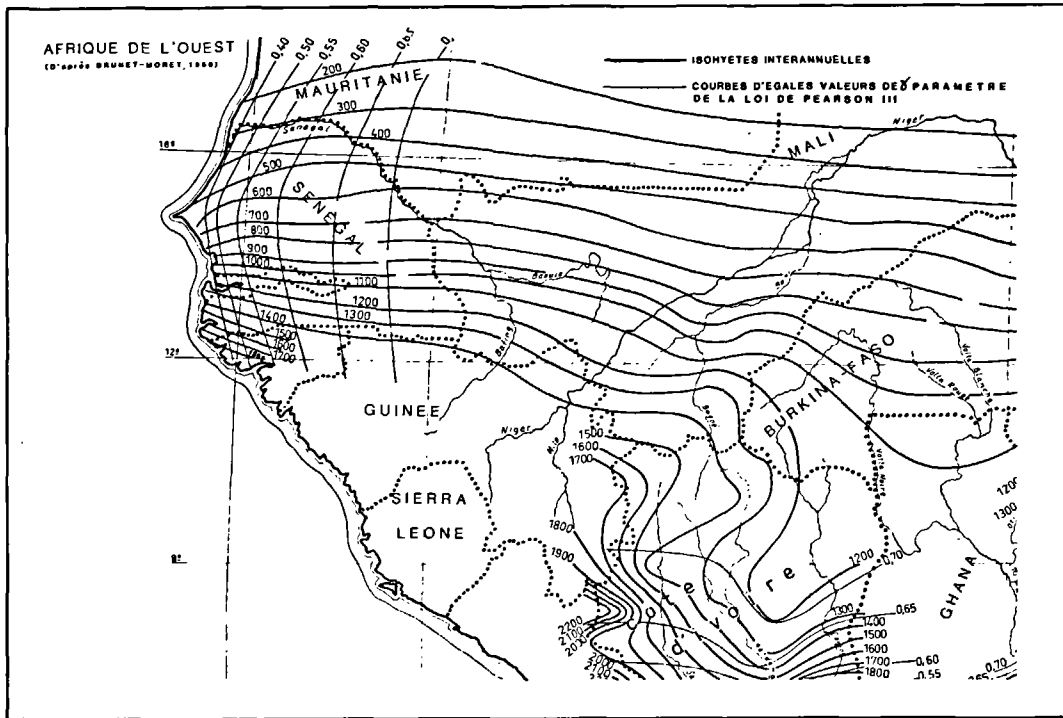


Fig. XI. Fig. XII. Répartition régionale des caractéristiques de pluie journalière en Afrique occidentale.
Regional distribution of daily rainfall features in west Africa

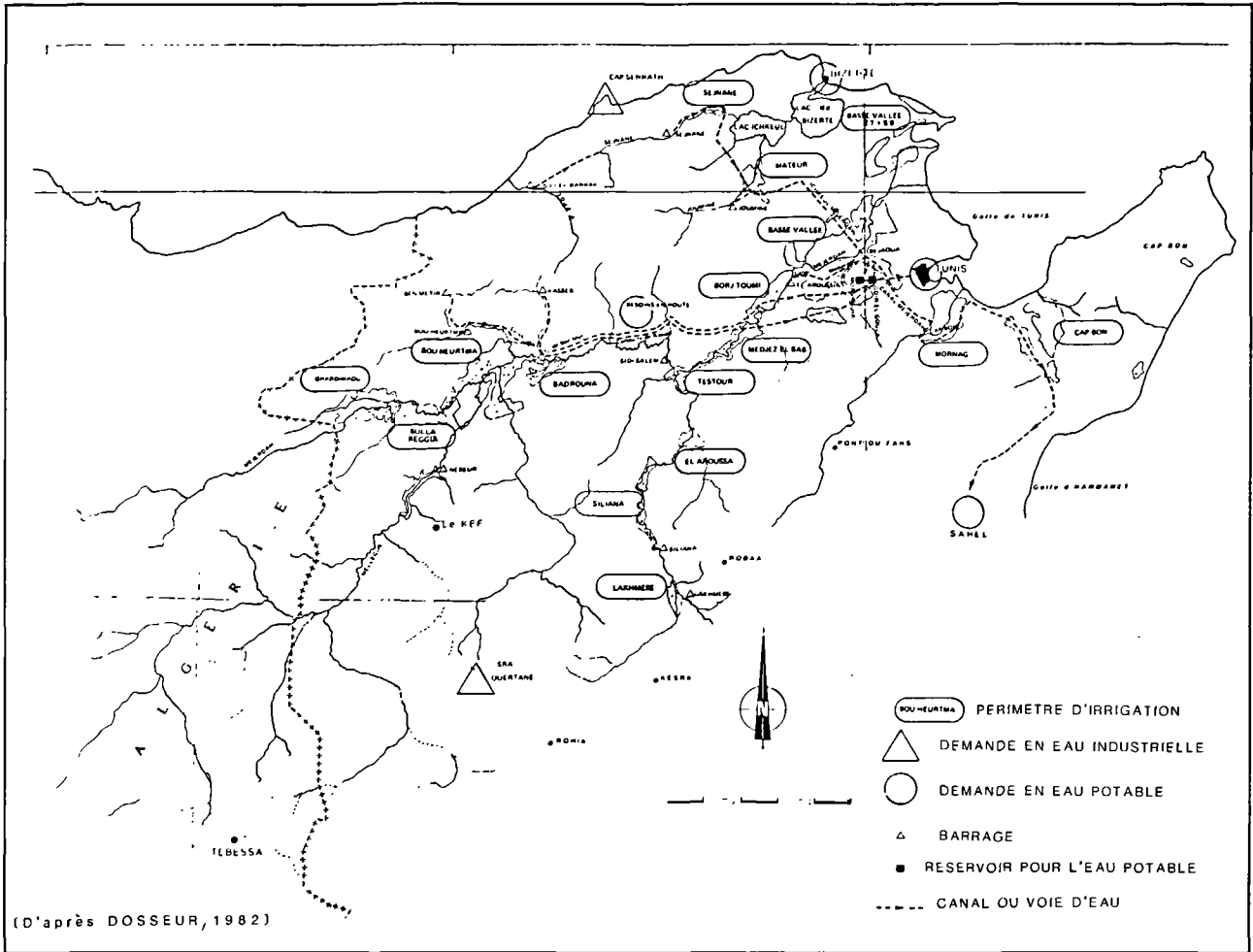
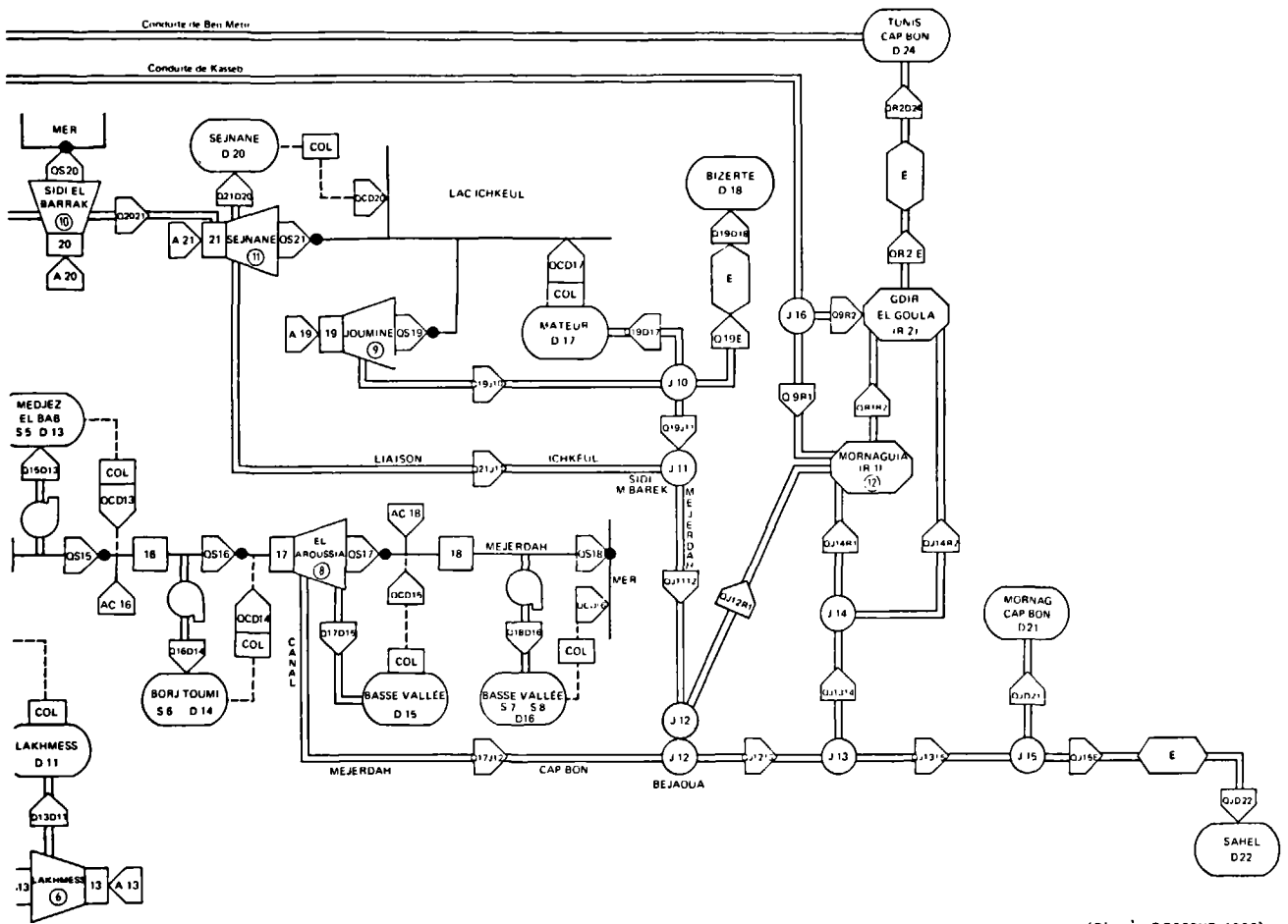


Fig. XIII. Configuration du modèle de gestion des eaux du nord de la Tunisie
 Configuration of the management model for northern Tunisia's water



(D'après DOSSEUR 1982)

SCHEMA TOPOLOGIQUE
EAUTUN-3

- COURS D'EAU, DRAIN
- ==== CONDUITE, CANAL
- 7 • NUMERO. LIMITE D'UNITE HYDRAULIQUE
- ▷ TRANSFERT, FOURNITURE D'EAU
- 1 MEREUR NUMERO D'UNITE BARRAGE, RESERVOIR

- MATEUR BIZERTE PERIMETRE D'IRRIGATION SECTEUR DE CONSOMMATION D'EAU POTABLE OU INDUSTRIELLE
- MORNAGUIA RESERVOIR SANS APPORT EXTERIEUR
- J NUMERO DU RESERVOIR
- J JONCTION
- STATION DE POMPAGE
- COL COLATURES
- E STATION D'EPURATION DE L'EAU POTABLE

Fig. XIV

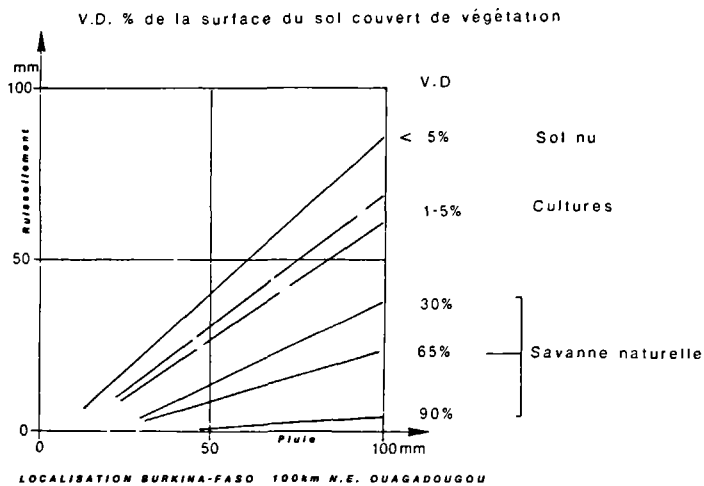


Fig. XIV bis. Ruissellement et occupation du sol
Runoff – land-use and vegetation density

BASSIN	DVL (1) %(2)	Ruissellement annuel (%)	Écoulement total annuel (%)	Percolation profonde annuelle (%)
C	99	4	10	45
D	60	11	13	44
I	60			
E	57	11	13	44
B	10	15	19	37
J	2			
A	0	15	19	37
F	0	24	41	12
G	0	24	41	12
H	0	24	41	12

(1) DVL % de la surface du bassin occupée par des sols à drainage vertical libre

(2) % en fonction de la pluie annuelle

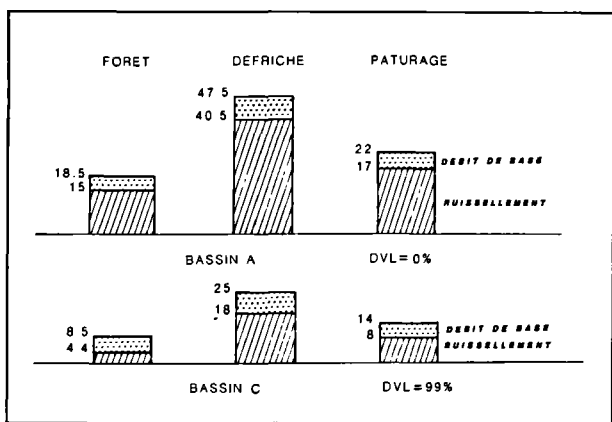


Fig. XV. Comportement avant déforestation
(Ecerex - Guyane française)
Catchment behaviour before deforestation (Ecerex)

Fig. XV bis. Évolution du ruissellement (Ecerex - Guyane française).
Runoff Evolution (Ecerex)

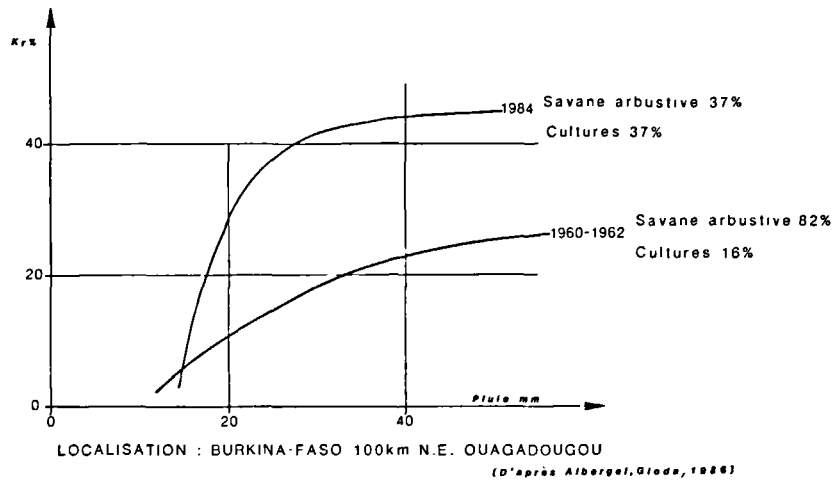
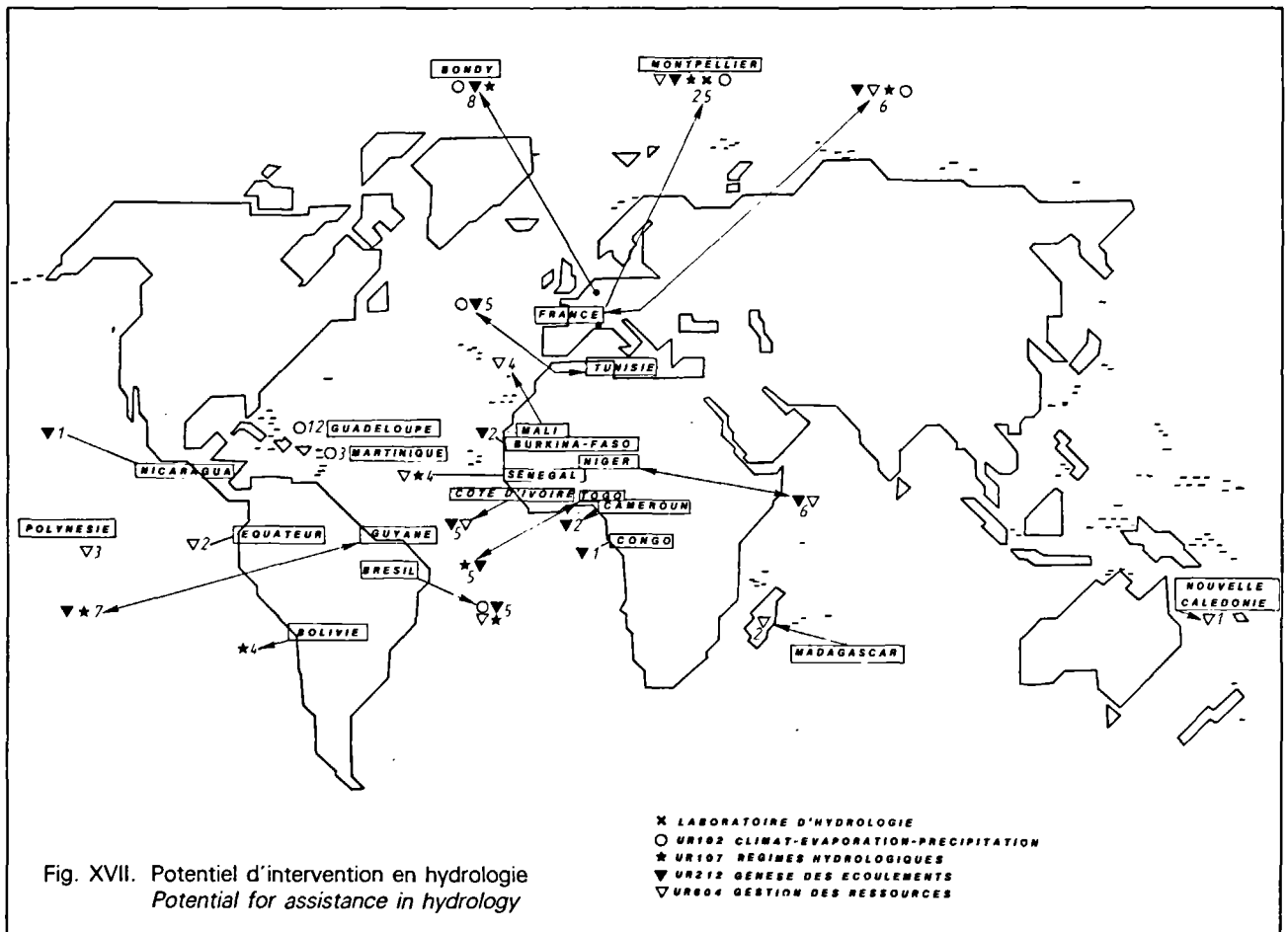


Fig. XVI. Impact du changement d'occupation du sol sur l'écoulement
Impact of land-use modifications on runoff



ANNEXE I

Enquête sur les réseaux

(P. CHAPERON)

La sous-Commission d'Hydrologie, au cours des réunions du 18 au 21 décembre 1984, a chargé P. Chaperon, membre de la sous-Commission, d'effectuer une enquête sur l'état de la participation de l'ORSTOM à la gestion des réseaux hydro-météorologiques.

Cette enquête a concerné les 18 pays suivants :

Afrique : Bénin, Burkina-Faso (ex. Haute-Volta), Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire, Mali, Niger, Sénégal, Togo, Madagascar, Tunisie.

Amérique du Sud et Antilles : Bolivie, Brésil, Guadeloupe, Guyane, Martinique.

Pacifique : Nouvelle-Calédonie, Tahiti.

Nature de la participation de l'ORSTOM

GESTION DIRECTE PAR L'ORSTOM SEUL

Le service hydrologique chargé de la gestion du réseau est assuré par l'ORSTOM qui fournit la totalité du personnel et le budget correspondant, avec éventuellement des subventions extérieures (Guadeloupe).

Guadeloupe : 35 stations hydrométriques permanentes, 35 stations pluviométriques et pluviographiques (réseau complémentaire du réseau météo).

Guyane : 9 stations hydrométriques.

Martinique : 25 stations pluviométriques et pluviographiques (réseau complémentaire du réseau météo).

GESTION DIRECTE PAR L'ORSTOM EN ASSOCIATION AVEC UN SERVICE HYDROLOGIQUE NATIONAL

Congo : 49 stations (38 échelles et 11 limnigraphes), 2 stations climatologiques (Brazzaville et M'Passa).

L'État congolais met à disposition de l'ORSTOM 2 ingénieurs et 10 techniciens rémunérés par le Congo et participe au budget pour 40 % env.

Togo : 50 stations hydrométriques dont 22 sont gérées par l'ORSTOM.

DIRECTION DU SERVICE HYDROLOGIQUE NATIONAL OU LOCAL

L'ORSTOM assure la direction scientifique et technique du Service hydrologique et participe aux opérations. La majorité du personnel et du budget est assuré par l'État-hôte (ou le territoire). La participation de l'ORSTOM est contractuelle.

Bénin : le réseau à l'abandon doit être entièrement reconstitué. Un contrat prévoit la participation de l'ORSTOM à la formation du service national hydrologique. Dans un premier temps, l'ORSTOM assurera la direction du Service.

Côte d'Ivoire : l'ORSTOM a assuré la direction technique du service national en mettant à disposition de la Côte d'Ivoire un chercheur et deux techniciens. Cet accord se termine en 1984 et sera probablement relayé par une action de type D. Le réseau comporte 155 stations (dont 40 limnigraphes).

Nouvelle-Calédonie : l'ORSTOM assure la direction technique du service hydrologique territorial. Le réseau comporte 136 pluviomètres (84 ORSTOM), 94 pluviographes (70 ORSTOM), 9 stations à bac évaporatoire (dont 8 ORSTOM), 23 stations hydrométriques principales, 2 stations secondaires et 9 stations tertiaires.

CONSEIL DE GESTION - CONSEIL TECHNIQUE

L'ORSTOM assure une activité de Conseil de gestion et de Conseil technique. Cela comporte généralement des activités d'enseignement et formation du personnel des services hydrologiques nationaux, un appui à la conception et à la gestion des banques de données et plus rarement une participation aux activités de terrain.

La participation de l'ORSTOM est soit contractuelle, soit bénévole (accords tacites informels).

Cameroun : 70 stations hydrométriques gérées par le Service hydrologique du Cameroun (DGRSTC). Appui technique de l'ORSTOM (un technicien à mi-temps).

Côte d'Ivoire : à prévoir pour 1985 en relais de la Direction du Service Hydrologique National.

Mali : la participation de l'ORSTOM consiste en un appui technique au Service hydrologique malien et en la prise en charge d'études régionales (Cuvette lacustre par exemple) complémentaires du réseau de base. Accord non encore formalisé.

Niger : le réseau comporte 65 stations gérées par le Service Hydrologique Nigérien (six brigades). Appui technique (formation des personnels) par l'ORSTOM sur contrat FAC.

Sénégal : Conseil de gestion. Surveillance par l'ORSTOM de deux stations de base. A noter que l'ORSTOM a assuré sur contrat FAC la direction du Service sénégalais et la formation du personnel (1976-1978) (1).

Bolivie : programme PHICAB (Bassin amazonien) sur financement ORSTOM.

Brésil : activités de Conseil de gestion et Conseil technique assurées par deux chercheurs à temps plein : traitement des données, formation, campagnes de terrain.

Un accord sur financement coopération (MF) est en cours d'exécution pour la mise en place d'un réseau de 21 balises ARGOS et un centre de réception (un ingénieur à temps plein).

Tahiti : Assistance technique du Service hydrologique de Tahiti (STE) : un chercheur et un technicien. Le réseau en cours de développement comporte 25 stations limnigraphiques, 17 pluviographes et 72 pluviomètres totalisateurs.

PAS DE PARTICIPATION DIRECTE A LA GESTION DES RÉSEAUX

Burkina-Faso : mais à noter des études régionales dont certaines stations seront reprises dans le réseau.

Madagascar : le réseau de base national comprend en théorie 77 stations dont seulement une dizaine dans la plaine de Tananarive sont en activité. Par convention l'ORSTOM assurera la gestion d'un réseau « secondaire » à vocation agricole (60 stations).

Tunisie : réseau national de base (60 à 70 stations) créé par l'ORSTOM et géré par le service hydrologique tunisien (BIRH). L'ORSTOM ne participe qu'aux travaux de recherche de la DRE

(1) FAC : FONDS D'AIDE ET DE COOPÉRATION DU GOUVERNEMENT FRANÇAIS.

Consistance de la participation de l'ORSTOM

Personnel

La participation en personnel peut être ainsi décomptée (en homme-mois par an).

	CHERCHEURS ET INGÉNIEURS	TECHNICIENS
BÉNIN	1 x 3	1 x 10
BURKINA-FASO	-	-
CONGO	(1 x 3) EN 1985	2 x 10
CÔTE D'IVOIRE (1)	1 x 10 EN 1984	2 x 10
MALI	(2 x 3)	2 x 10
NIGER	-	1 x 3
SÉNÉGAL	(1 x 1)	(1 x 3)
CAMEROUN	-	(1 x 6)
TOGO	(1 x 3)	(1 x 10)
MADAGASCAR	-	-
TUNISIE	-	-
BOLIVIE	1 x 5	1 x 10
BRÉSIL	2 x 10	-
GUADELOUPE	2 x 1	(3 x 10)
GUYANE	1 x 3	2 x 9
MARTINIQUE	1 x 2	(2 x 10)
NLLE CALÉDONIE	(2 x 6)	(2 x 10)
TAHITI	1 x 10	1 x 10

(1) POUR LA CÔTE D'IVOIRE, PARTICIPATION EN PERSONNEL TRÈS RÉDUITE EN 1985. SOIT INGÉNIEURS ET CHERCHEURS, ENVIRON 85 MOIS/AN OU 8,5 A TEMPS COMPLET (10 MOIS D'ACTIVITÉS + 2 MOIS DE CONGÉS). TECHNICIENS, ENVIRON 200 MOIS/AN OU 20 A TEMPS COMPLET.

Perspectives

PAYS OU L'ORSTOM PARTICIPAIT EN 1984 A LA GESTION DES RÉSEAUX

- Maintien de la participation ORSTOM au niveau actuel : Niger, Mali, Sénégal, Cameroun, Guadeloupe, Guyane, Martinique, Brésil, Nouvelle-Calédonie.
- Croissance prévisible : Congo (+ 1 chercheur 1/4 de temps), Togo (contrat en début d'exécution), Bolivie (léger accroissement demandé), Tahiti (extension du réseau) ;
- Décroissance prévue : Côte d'Ivoire (Conseil de gestion et technique remplacera la Direction du Service Hydrologique National).

PAYS OU L'ORSTOM NE PARTICIPAIT PAS EN 1984 A LA GESTION DES RÉSEAUX

- Pas de changement prévu : Burkina-Faso, Madagascar, Tunisie.
- Demande à satisfaire : Bénin (1 technicien + participation à temps partiel d'un chercheur), Cap-Vert.
- Demandes non satisfaites : Centre Afrique, Gabon, Maroc.

Conclusions

L'effort consenti par l'ORSTOM dans sa participation à la gestion des réseaux est relativement considérable : en personnel, l'équipement de 8 ingénieurs-chercheurs et de 20 techniciens par an, en financement une masse de plusieurs millions de francs en fonctionnement et investissement.

Cet effort peut-il être réduit ?

Pour les DOM-TOM (Guyane, Guadeloupe, Martinique, Nouvelle-Calédonie, Tahiti) il est difficile d'escompter pour

l'immédiat une réduction très sensible. Il serait cependant normal que le coût financier soit supporté par les autorités locales (Régions ou Territoires). Un relais en personnel peut être également envisagé à terme.

Pour les pays étrangers au sens « classique » (Bolivie, Brésil), il est difficile d'apprécier l'évolution de la demande qui sera probablement maintenue dans les quelques années à venir.

Pour les pays d'intervention traditionnelle de l'ORSTOM (Afrique), on doit prendre en compte le rôle historique en matière de réseaux qu'il a assuré en les créant (1950-1960) et en les gérant pendant de nombreuses années. En théorie, le relais devait être pris par des services hydrologiques nationaux. La situation en 1984 est assez diversifiée. Pour certains pays (Cameroun, Congo, Burkina-Faso, Mali, Côte d'Ivoire, Niger, Sénégal, Tunisie et en partie Togo) les services nationaux maintenant bien constitués et opérationnels devraient pouvoir assurer correctement la gestion des réseaux, avec une assistance technique de l'ORSTOM plus ou moins consistante. Mais à condition que l'effort consenti par les États soit maintenu et consolidé. Pour les autres (Bénin, Gabon, RCA, Tchad, Madagascar) les réseaux sont ou inexistantes ou en cours de désorganisation. Les services nationaux n'existent pas ou ne paraissent pas en mesure d'assurer correctement la gestion. Pour le Bénin une demande d'assistance a été formulée et devrait pouvoir être satisfaite. Pour les autres pays le problème demeure entier.

ANNEXE II



Le projet Hydroniger (CIES-ORSTOM-SOGREAH)

Le bassin hydrologique du fleuve Niger s'étend sur huit pays de l'Afrique de l'Ouest et Centrale : la Guinée, le Mali, la Côte d'Ivoire, le Niger, le Burkina-Faso, le Bénin, le Cameroun et le Nigéria. En 1963 était créée la « Commission du Fleuve Niger », regroupant ces huit États et le Tchad. En 1979, cette instance internationale devait être réanimée et se transformait en un organisme Inter-État, l'ABN (Autorité du Bassin du Niger), dont la vocation est de promouvoir un développement intégré des États riverains, avec comme priorité la coordination de l'aménagement du cours du fleuve Niger et de ses abords.

En 1980 enfin, un « Fonds de développement de l'ABN » voyait le jour, destiné à financer ces aménagements. Parmi les actions progressivement mises en place, figure le Projet Hydroniger, qui consiste à installer dans les États membres un système de prévisions hydrologiques qui concerneront la navigation, la production hydro-électrique, l'exploitation des périmètres agricoles irrigués, la gestion de pêcheries, l'alimentation en eau des villes, etc.

Ce système de prévision hydrologique du projet Hydroniger doit permettre le rassemblement et la diffusion des données hydropluviométriques en temps réel. Il repose sur la mise en place et l'exploitation de 66 (puis 95 dans une phase ultérieure) stations d'observation hydrologique et hydrométéorologique.

L'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM) soutient financièrement le projet Hydroniger et la société française CEIS-Espace a été retenue pour assurer les prestations technologiques en sous-traitance avec l'Hydrologie de l'ORSTOM, chargée de la mise en place des équipements de terrain et de leur maintenance logistique.

Dans sa structure actuelle le projet Hydroniger comprend :

- un réseau de plateformes de collecte de données (PCD) où les hauteurs limnimétriques sont mesurées par un limnigraphe pneumatique (marque Seba) et un pluviographe à augets (marque Précis-Mécanique). Les hauteurs d'eau et les hauteurs cumulées de pluies, enregistrées à fréquences constantes, sont envoyées sous forme de messages codés par une balise Argos (CEIS-Espace) sur les deux satellites Tiros-Noaa à orbites polaires. Au cours de chacun de leur six à huit passages journaliers les satellites interrogent les plateformes dont les messages sont stockés à bord du satellite et aussi réémis vers le sol pour être exploités ;

- un Centre International de Prévision (CIP) localisé à Niamey où sont centralisées les informations provenant via les satellites, de toutes les stations, utilisées pour la prévision hydrologique par un modèle mathématique de simulation installé par Sogreah, ou par le modèle corrélatif de transfert de l'ORSTOM ;

- des Centres Nationaux de Prévision (CNP) qui exploitent les informations en provenance du CIP ou directement celles obtenues via les satellites à la station de réception Argos dont ils sont équipés.

Le système est entièrement automatique et les émissions ne demandent aucun personnel de permanence sur les stations hydrologiques.

Le projet Hydroniger est donc un test valable de fonctionnement en vraie grandeur d'un système d'acquisition et de transmission automatique de données hydropluviométriques dans un milieu pourtant hostile et a priori peu sujet à tolérer des systèmes trop sophistiqués.

ANNEXE III



Le réseau Argos en Amazonie brésilienne

Partenaires de l'ORSTOM

Réseau monté par l'ORSTOM suite à 2 missions (mai et septembre 1982) d'évaluation et de démonstration du Système Argos. Ceci dans le cadre des accords de coopération scientifique entre ORSTOM et le « Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Técnico » (Conseil National du Développement Scientifique et Technique) CNPq, pour le compte du « Ministério das Minas e Energia » (Ministère des Mines et de l'Énergie), MME, « Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica » (Département National des Eaux et de l'Énergie Électrique), DNAEE, « Divisão de Controle de Recursos Hídricos » (Division de Contrôle des Ressources en Eaux) DRCH.

MONTAGE FINANCIER ET TECHNIQUE

L'inexistence au Brésil, en 1982, de matériels spécifiques pour utiliser le Système Argos a conduit le Directeur de DCRH à déposer une requête auprès de l'Ambassade de France à Brasília pour solliciter de la France l'octroi des matériels nécessaires pour la télétransmission. Ceci afin de contourner les difficultés imposées par le Gouvernement brésilien en matière d'importation.

Le Ministère des Relations Extérieures, Direction de la Coopération, a donné une suite favorable à cette requête dès août 1983, étant entendu que l'ORSTOM se chargerait du contrôle de l'installation et du fonctionnement du réseau, dans le cadre des accords de coopération ORSTOM/CNPq.

Le matériel a commencé d'arriver à Brasília dès mai 1983.

Description sommaire du réseau et du matériel utilisé

Le réseau couvre la totalité du bassin de l'Amazonie brésilienne. Les stations les plus à l'Est sont sur la frontière Brésil-Pérou, une autre sur celle de la Bolivie tandis que la station la plus au Nord-Est est toute proche de la frontière du Venezuela. Quelques difficultés d'installation ont conduit à modifier un peu le réseau initialement prévu et un ou deux équipements risquent d'être installés en dehors du bassin amazonien, ne serait-ce qu'à titre de démonstration.

23 stations sont prévues (21 sont déjà au Brésil, les 2 restantes seront là en 1986). 10 stations sont associées à des limnigraphes déjà existants : il est seulement nécessaire d'équiper ces limnigraphes (Leupold and Stevens à flotteur) décodeurs digitaux. 13 stations sont dépourvues de limnigraphe : là, la hauteur d'eau est introduite manuellement par l'observateur à l'aide d'un clavier.

La totalité du matériel est de construction française : Émetteur CEIS-Espace (cette société ayant acquis la licence de fabrication d'Électronique Marcel Dassault) ; Antenne Cit-Alcatel ; Codeur : Compagnie des Signaux et d'Entreprise Électrique ; pour le reste : Crouzet, Radial, Interconnexions, etc...

Les messages transmis par les satellites sont reçus à Brasília sur une station de réception directe travaillant dans la bande des 137 MHz, fabriquée par CEIS-Espace, avec écriture automatique sur 2 unités de diskettes 8".

Nous recevons, en moyenne, 4 messages par jour. Ceci est amplement suffisant compte tenu de la grande dimension, en principe, des bassins versants et, par conséquent, de la variation régulière du niveau d'un jour à l'autre. Néanmoins, 2 ou 3 stations gagneraient à être équipées d'un interface à mémorisation type Seine.

La sauvegarde de la réception des messages est assurée par l'« Instituto de Pesquisas Espaciais » (Institut de Recherches Spatiales) INPE qui reçoit nos satellites dans la bande des 2 GHz à Cachoeira Paulista (État de São-Paulo).

Avancement du programme

Au 1^{er} décembre 1985, 18 stations (sur les 21 actuellement au Brésil) sont installées.

La station de réception fonctionne depuis septembre 1984, avec traitement des messages sur mini-ordinateur

pour éliminer toute erreur de transmission. Ces programmes de traitement sont opérationnels depuis mai 1985 et les données entrent dans la Banque des Hauteurs d'eau du DCRH.

Intérêt et retombées économiques

L'utilisation du Système Argos permet de connaître, au jour le jour, l'évolution du débit des cours d'eau du bassin amazonien et, par conséquent de serrer au mieux les ressources en eau pour l'agriculture, la pêche, la navigation, etc. Il a été facilement démontré que sa mise en œuvre était simple et son exploitation peu onéreuse surtout en comparaison avec le réseau de télétransmission par téléphone qui existait déjà.

Il est admis que le coût d'acquisition du matériel de télétransmission est amorti en 4 ans de fonctionnement, rien que sur les économies réalisées sur les frais de tournées hydrologiques.

Prospectives

Déjà le DCRH projette une extension du réseau Argos à l'intérieur du bassin amazonien et, d'une manière générale, à l'ensemble du Brésil, là où les conditions hydrologiques permettent son emploi. 20 stations, environ, seront équipées chaque année.

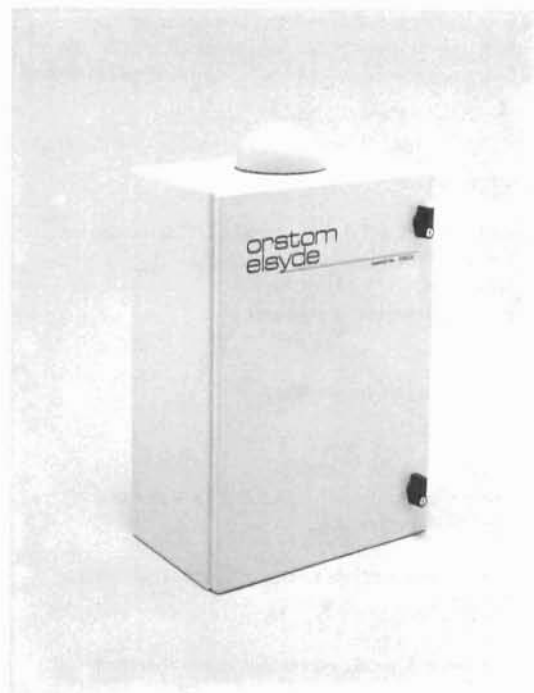
Enfin le futur satellite brésilien, à orbite équatoriale basse, prévu pour 1990, sera compatible Argos et permettra une collecte sur le Brésil toutes les 100 minutes, ce qui ouvre des horizons nouveaux et bien prometteurs.

ORSTOM ELSYDE

système CHLOÉ

Centrale hydrologique limnimétrique

Le Système CHLOÉ est une centrale autonome d'enregistrement d'informations limnimétriques à laquelle se connecte une sonde immergée SPI. L'enregistrement est réalisé sur une cartouche mémoire statique non volatile (EPROM) de grande capacité. Le temps d'échantillonnage des mesures ainsi que le seuil de variation de la hauteur d'eau déclenchant l'enregistrement sont sélectionnés par roues codeuses. La sonde SPI communique sa profondeur d'immersion et la température des liquides. Dans sa version plus élaborée, elle intègre automatiquement les variations de densité et communique la masse volumique. CHLOÉ est équipée d'un clavier et d'un affichage LCD permettant l'initialisation de la base de temps, la relecture de la cartouche mémoire et la visualisation des mesures capteurs. En option, CHLOÉ réalise la collecte d'un capteur supplémentaire (ex : conductivité) et la télétransmission satellite (ARGOS).



La centrale CHLOÉ reconditionnée dans une armoire métallique étanche (600 x 400 x 250 mm). Sur le dessus de l'armoire est implantée l'antenne ARGOS.

Présentation de l'enregistreur

Coffret plastique étanche alimenté en 12 V continu. Deux versions sont disponibles :

- *Type A*

Caractéristiques :

- Base de temps initialisable.
- Visualisation cristaux liquides.
- Affichage des mesures capteurs.
- Décalage du 0 de la sonde SPI.
- Commande formatage de la cartouche.
- Temps d'échantillonnage des mesures réglable.
- Seuil d'enregistrement de la hauteur d'eau réglable.

- *Type B*

Caractéristiques :

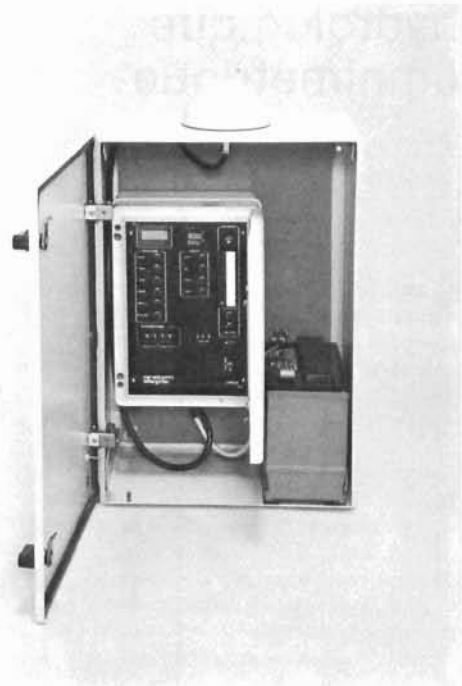
- Connection d'une sonde SPI uniquement.
- Base de temps initialisée à 0 à la mise en marche.
- Sélection du temps d'échantillonnage (1', 5', 15', 30' ou 60').
- Enregistrement (date - hauteur d'eau) si le niveau évolue.

Enregistrement

- Cartouche EPROM effaçable aux UV et réutilisable.
- Capacité : 64 K octets.
- Dimensions : 115 × 115 × 20.
- Boîtier aluminium hermétique.

Caractéristiques techniques

- Température : - 10 + 70° C.
- Humidité relative : ≤ 100%.
- Tension d'alimentation : 11,5 V à 15 V continu.
- Consommation type A
 - 17 mA en veille
 - 400 mA pendant l'enregistrement (1 seconde).
- Consommation type B
 - 3 mA en veille
 - 400 mA pendant l'enregistrement (1 seconde).
- Dimensions : 350 × 250 × 150 mm.
- Poids : environ 5 kg.



Sonde immergée S P I

La sonde piézo résistive contient un micro-processeur qui effectue les traitements de mise à l'échelle et de compensation en température des mesures d'une manière indépendante de la centrale d'acquisition.

La sonde SPI fournit la hauteur d'eau, la densité, la température en vraie grandeur par une liaison de type informatique. Transmission série synchrone isolée opto électronique.

• VERSION I

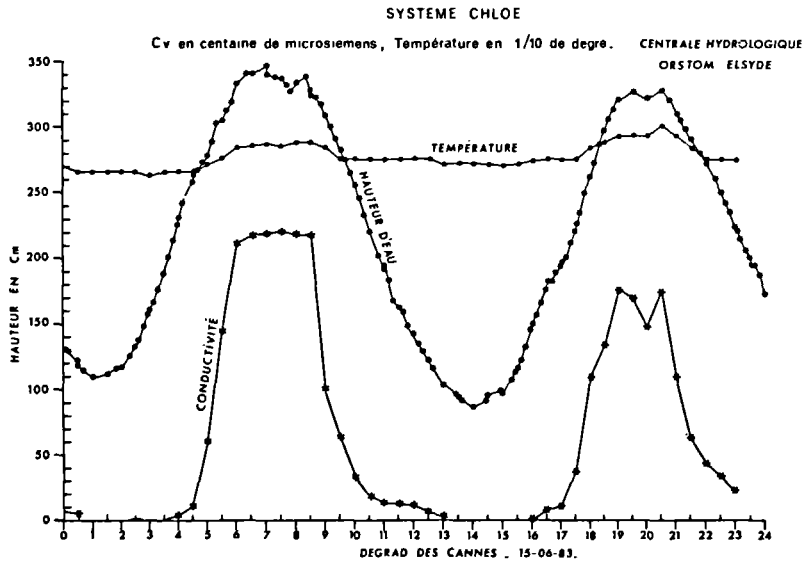
- Mesure des niveaux et température des liquides de densité stable ($d = 1$ en standard).
- Etendue des mesures : 10 mètres (en standard).
- Température : 0 à 50° C.
- Précision :
 - hauteur 0,1% pleine échelle
 - température 1/10° C.
- Vitesse de poursuite des niveaux : 0,5 cm/s mini.
- Temps de mesure : 7 sec.
- Consommation : 13 à 17 mA.
- Tension d'alimentation 11,5 à 15 V.
- Dimensions \varnothing 70 long 300 mm.
- Réalisation PVC.
- Masse : 3 kg.
- Liaison : câble blindé 12 m (jusqu'à 1,5 km sur demande).

VERSION II

- Mesure des niveaux et température des liquides homogènes de densité variable.
- 2 capteurs permettent de s'affranchir de la masse volumique dans le calcul de la profondeur d'immersion.
- Précision hauteur : 0,2 à 1% pleine échelle suivant la taille de la sonde (50 cm à 1 cm).
- Temps de mesure : 10 s.
- Masse : 3,5 kg.
- Réalisation PVC, \varnothing 70 mm.

Autres caractéristiques identiques à la sonde SPI-I.





```

STATION No 1      S.P.I. No 1
LIEU D'INSTALLATION = PORT DE CAYENNE
Mise en route le 1 6 83 a 17 h 23
ENREGISTREMENT SUPPLEMENTAIRE TOUTES LES 10 MINUTES
POUR UNE VARIATION DE 5 Cm. DE HAUTEUR D'EAU
CARTOUCHE ELSYDE CE64 No 00001      EXPLOITEE LE 20 8 83

COMMENTAIRES
BONDE SPI 2 CAPTEURS
CALCUL AUTOMATIQUE DE LA MASSE VOLUMIQUE
MESURE DE LA CONDUCTIVITE en centaines de uS
TELETRANSMISSION SATELLITE ARGOS
1 6 83      17 30      EAU =190      Cond.=103      Temp= 29.3
            17 40      194
            17 45      196
            18 0      EAU =198      Cond.=108      Temp= 29.3
            18 15      204
            18 30      EAU =209      Cond.=102      Temp= 29.3
            18 33      111
            18 45      118
            19 0      EAU =217      Cond.=148      Temp= 29.3
            19 3      220
            19 13      240
            19 15      249
            19 30      EAU =258      Cond.=133      Temp= 29.3
            19 33      256
            19 53      263
            20 0      EAU =275      Cond.=177      Temp= 29.3
            20 3      268
            20 15      275
            20 30      EAU =275      Cond.=118      Temp= 29.3
            20 53      269
            21 0      EAU =265      Cond.=114      Temp= 29.3
            21 30      EAU =270      Cond.=294      Temp= 29.3
            21 33      276
            22 0      EAU =275      Cond.=294      Temp= 30.2
            22 3      271
            22 33      266
            22 30      EAU =265      Cond.=294      Temp= 30.2
            22 33      261
            23 0      EAU =254      Cond.=118      Temp= 29.3
            23 3      252
            23 13      245
            23 30      EAU =240      Cond.=125      Temp= 29.1
            23 33      238

2 6 83      0 0      EAU =234      Cond.=165      Temp= 28.4
            0 3      230
            0 13      233
            0 30      EAU =224      Cond.=104      Temp= 28.4
            0 53      214
            1 0      EAU =212      Cond.=103      Temp= 28.2
            1 3      209
            1 13      198
            1 30      EAU =195      Cond.=103      Temp= 28.4
            1 43      191
            1 50      EAU =184      Cond.=117      Temp= 28.4
            1 53      182
            2 13      177
            2 30      EAU =168      Cond.=117      Temp= 28
            2 33      169
            2 53      164
            3 0      EAU =162      Cond.=117      Temp= 28
            3 3      EAU =162      Cond.=117      Temp= 27.7

```

Exemple de listing obtenu par relecture d'une cartouche.

ORSTOM ELSYDE

systeme OEDIPE

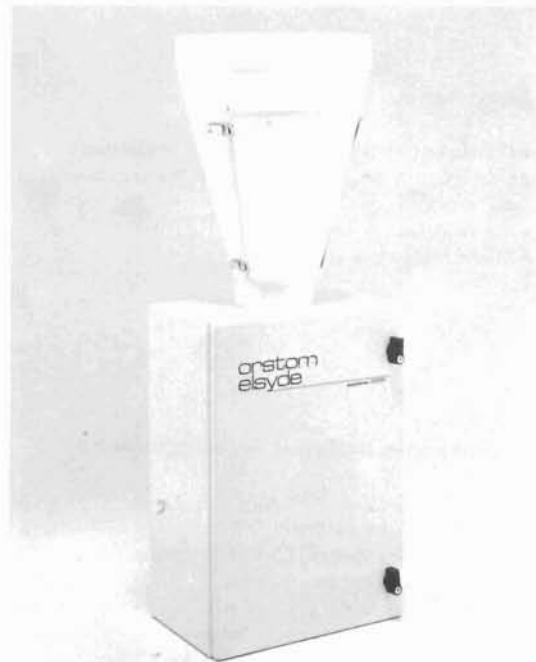
Organe d'enregistrement digital d'information pluviométrique

OEDIPE est un système autonome dont la fonction consiste à mémoriser l'histogramme des basculements d'un pluviomètre à augets.

L'enregistrement est réalisé sur une cartouche mémoire statique non volatile (EPROM) de grande capacité permettant la saisie de 16 384 basculements datés à la seconde près. La très faible consommation garantit un fonctionnement sur batterie pendant plus de 8 mois. Un terminal de poche visualise sur le terrain le cumul total, le taux de remplissage de la cartouche et vérifie la tension batterie.

En laboratoire, le module relecteur LCM assure le transfert des enregistrements sur tout ordinateur le dépouillement est automatique et instantané. Un effaceur UV permet la ré-utilisation des cartouches plus de 200 fois.

La télétransmission est assurée en option par une carte émettrice ARGOS implantée dans le coffret de l'enregistreur.



Le système OEDIPE reconditionné dans une armoire métallique étanche (600 x 400 x 250 mm), supportant un pluviomètre à augets basculeur à contact mercure «Préci Mécanique».

Présentation de l'enregistreur

- Coffret étanche plastique alimenté en 12 volts continus.
Raccordements par bornes et douilles.

Utilisation

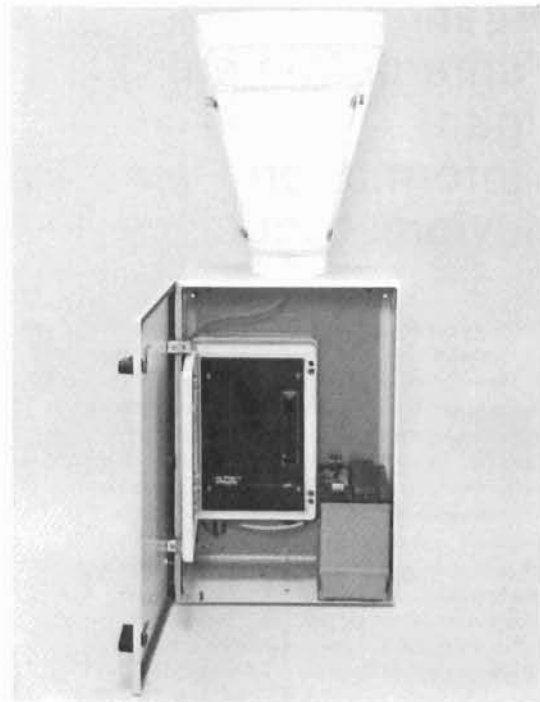
- Mise en marche automatique dès l'insertion de la cartouche.
- Test de vacuité et formatage balisé par une LED témoin.
- Chaque basculement de l'auge déclenche l'enregistrement de la date initialisée à 0 lors de la mise en service.

Enregistrement

- Cartouche EPROM effaçable aux UV et réutilisable.
- Capacité 64 K octets représentant 16384 basculements de l'auge.
- Boîtier aluminium hermétique.
- Dimensions : 115 × 115 × 20 mm.

Caractéristiques techniques de l'enregistreur

- Température - 10 à + 70° C.
- Humidité relative ≤ 100%.
- Tension d'alimentation 11,5 à 15 V continus.
- Courant consommé sous 12 volts
 - 3 mA en veille
 - 400 mA pendant le basculement.
- Dimensions : 350 × 250 × 150 mm.
- Poids : 5 kg.



MODULE DE LECTURE

- Directement connectable à tout système informatique.
- Liaison série RS 232 C.
- Fonction test vérifiant l'effacement correct des cartouches.
- Transfert des données en code ASCII.
- Alimentation 220 V \sim
- Consommation 30 W.
- Coffret aluminium aux normes 3 U.
- Dimensions 138 × 124 × 106 mm.
- Poids : environ 1,5 kg.

MODULE EFFACEUR

- Système effaceur par U.V.
- Durée d'effacement d'une cartouche : 30 minutes.
- Minuteur automatique.
- Alimentation 220 V \sim
- Consommation : 15 W.
- Coffret aluminium avec normes 3 U.
- Dimensions : 138 × 124 × 106mm.
- Poids : environ 1 kg.

TERMINAL DE POCHE

- Se connecte sur l'enregistreur OEDIPE et communique sur un afficheur LCD :
 - numéro de l'enregistreur
 - cumul total des basculements
 - durée d'enregistrement
 - durée au dernier basculement
 - nombre d'octets écrits dans la cartouche CE 64
 - état de la tension batterie par rapport à 11,8 volts.
- Boîtier plastique hermétique.
- Alimentation par le système enregistreur.
- Dimensions : 200 × 130 × 50.
- Poids : environ 0,8 kg.

Exemple de listing de dépouillement.

STATION No 3

LIEU D'INSTALLATION : CHARTRES

Mise en route le 19 02 84 a 06 h 00

ENREGISTREMENT DE HH MM SS POUR CHAQUE BASCULEMENT
CORRESPONDANT A 0.2 mm DE PRECIPITATION

CARTOUCHE ELSYDE CE64 No 00005 EXPLOITEE LE 27 02 84

COMMENTAIRES

STATION TEST

PLUVIOMETRE 0.2 mm

CUMUL DES PRECIPITATIONS POUR CHAQUE HEURE

CUMUL DES PRECIPITATIONS PAR JOUR

TELETRANSMISSION SATELLITE ARGOS

22 02 84 * RELEVÉ DES PRECIPITATIONS

DATE	* HEURE Cumul	(mm) * HH MM SS	Mesure (mm)*		
22 02 84	07 00 00	0.0			
	08 00 00	0.0			
	09 00 00	0.0			
	10 00 00	0.0			
	11 00 00	0.0			
	12 00 00	0.0			
	13 00 00	0.0			
	14 00 00	0.0			
	15 00 00	0.0			
			15 02 14	0.2	
			15 08 12	0.2	
			15 18 21	0.2	
		16 00 00	0.6		
		17 00 00			
	18 00 00				
23 02 84			18 15 10	0.2	
			18 20 19	0.2	
			18 26 43	0.2	
			18 45 07	0.2	
		19 00 00	0.8		
		20 00 00	0.0		
		21 00 00	0.0		
		22 00 00	0.0		
		23 00 00	0.0		
		00 00 00	0.0		
				00 05 46	0.2
		01 00 00	0.2		
				01 55 56	0.2
		02 00 00	0.2		
			02 48 21	0.2	
	03 00 00	0.2			
			03 58 26	0.2	
	04 00 00	0.2			
			04 49 46	0.2	
	05 00 00	0.2			
			05 31 19	0.2	
	06 00 00	0.2			
PRECIPITATIONS TOTALES du 22 02 84		2.6 mm. (6 h TU / 6 h TU)			

ANNEXE V



Annuaire hydrologiques

- Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer • Années • 1949-1950-1951-1952-1953-1954-1955-1956-1957 (1 volume par année).
- Annuaire hydrologique des États d'Outre-Mer de la Communauté des Territoires et Départements d'Outre-Mer, du Cameroun et du Togo. • Année • 1958.
- Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer : (Zones concernées : Territoires et Départements d'Outre-Mer) • Années • 1959 • 1960-1961-1962 (1 vol.) • 1963-1964-1965 (1 vol.).
- Annales hydrologiques de la France d'Outre-Mer : (Zones concernées : Territoires et Départements d'Outre-Mer) • Années • 1966-1967-1968 (1 vol.) • 1969-1970-1971 (1 vol.) • 1972-1973-1974 (1 vol.).
- Annuaire hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer : (Zones concernées : États africains d'expression française et République Malgache) • Années • 1959 • 1960 • 1961 • 1962-1963 (1 vol.).
- Annales hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer : (Zones concernées : États africains d'expression française et République Malgache) • Années • 1964-1965 (1 vol.) • 1966-1967 (1 vol.) • 1968-1969 (1 vol.) • 1970-1971-1972-1973 (1 vol.).

ANNEXE VI



État des monographies hydrologiques ORSTOM (juin 1984)

P. CHAPERON

On a recensé les monographies hydrologiques de bassins inter-États (ex : bassin du Niger) ou nationales (ex : les régimes hydrologiques du Cameroun) ainsi que les principaux rapports à caractères monographiques (ex : monographie de l'Oum Er R'Bia, Maroc).

AFRIQUE

Afrique occidentale

- LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM) C ROCHETTE, 1974, DONNÉES UTILISÉES : AOÛT 1965
- LE BASSIN DU FLEUVE VOLTA (MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM N° 5), F MONIOD, B POUYAUD ET P SECHET, 1977, DONNÉES UTILISÉES : FÉVRIER 1974.
- LE BASSIN DU FLEUVE NIGER : NIGER SUPÉRIEUR ET BANICUVETTE LACUSTRE- NIGER MOYEN.
– AUVRAY 1970 DONNÉES UTILISÉES : 1963.
– Y BRUNET-MORET, J P LAMAGAT ET M MOLINIER, (MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM N° 8). 1986. DONNÉES UTILISÉES : 1982.
- BÉNIN • MONOGRAPHIE DE L'OUÈME SUPÉRIEUR, J RODIER, J SIRCOULON, 1963 • MONOGRAPHIE DU DELTA DE L'OUÈME, F MONIOD, J SIRCOULON, J RODIER, J COLOMBANI, 1972.
- BURKINA-FASO (EX. HAUTE-VOLTA) • BASSIN DE LA VOLTA (CF. SUPRA).

CÔTE D'IVOIRE • MONOG. HYDROL. DU BASSIN DE LA BIA, 1950 • HYDROLOGIE DU BANDAMA, H CAMUS 1972 • APERÇU SUR LES RÉGIMES HYDRO-PLUVIOMÉTRIQUES (J SIRCOULON-G GIRARD-P TOUCHEBEUF) IN « LE MILIEU NATUREL DE LA CÔTE D'IVOIRE » MÉMOIRE ORSTOM N° 50, 1971.

GUINÉE • MONOG. HYDROL. DE KONKOURE, M ROCHE 1959.

MALI • BASSIN DU SÉNÉGAL (CF. SUPRA) • BASSIN DU NIGER (CF. SUPRA).

MAURITANIE (NÉANT).

NIGER • BASSIN DU NIGER (CF. SUPRA) • QUELQUES ÉTUDES SUR L'AIR (KORI TELOUA) ET LES VALLÉES SÈCHES (VALLÉES DE BADI-GUECHERI, MAGGIA, GOULBI DE MARADI...)

SÉNÉGAL • BASSIN DU SÉNÉGAL (CF. SUPRA) • BASSIN DE LA GAMBIE.

– ÉTUDE HYDROLOGIQUE PROVISOIRE DU BASSIN CONTINENTAL, P CHAPERON-N GUIGUEN, 1974.

– SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS HYDRO-PLUVIOMÉTRIQUES (EN COURS).

TOGO • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU MONO. A BOUCHARDEAU-M ROCHE, 1965 • ÉTUDE PÉDO-HYDROLOGIQUE AU TOGO (RÉGION MARITIME ET DES SAVANES) 1966.

Afrique Centrale

• LE BASSIN DU FLEUVE CHARI (MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM N° 2) B BILLON, J GUISCAFRE, J HERBAUD ET G OBERLIN, 1974 (AOÛT 1967).

• LE BASSIN DE LA RIVIÈRE SANAGA (MON. HYDROL. ORSTOM N° 3) P DUBREUIL, J GUISCAFRE, J-F NOUVELOT ET J-C OLIVRY, 1975 (DONNÉES : 1973).

• LE BASSIN DU LAC TCHAD.

– ÉDITION PROVISOIRE, A BOUCHARDEAU, R LEFÈVRE, 1957.

– MONOGRAPHIE P TOUCHEBEUF, 1969.

– RÉVISION (P TOUCHEBEUF, A CHOURET ET G VUILLAUME) POUR PUBLICATION PRÉVUE DANS MON. HYDR. ORSTOM (DONNÉES 1984).

• LE BASSIN DU FLEUVE LOGONE (EN 6 PARTIES) B BILLON, A BOUCHARDEAU, S PIEYNS, C RIOU, J RODIER ET M ROCHE, 1967.

CAMEROUN • BASSIN DE LA HAUTE-BÉNOUÉ (A BOUCHARDEAU, BRESSON, J RODIER) 1953 • BASSIN DE NYONG. J-C OLIVRY, 1978 • RÉGIMES HYDROLOGIQUES DU CAMEROUN.

J-C OLIVRY THÈSE DE DOCTORAT 1984, A PARAÎTRE IN « MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM ».

CENTRE AFRIQUE • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DE L'OUBANGUI (A ENTREPRENDRE).

CONGO • MONOGRAPHIE DU KOUILOU-NIARI, J RODIER, AIME, M ROCHE, 1960 • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU BASSIN SUPÉRIEUR DU NIARI (EN AMONT DE LOUDIMA), G HIEZ, P TOUCHEBEUF, B BILLON ET P CHAPERON, 1965.

GABON • RÉGIMES HYDROLOGIQUES DU GABON, J LERIQUE (EN COURS).

TCHAD • BASSIN DU LAC TCHAD (CF. SUPRA). • ÉTUDE DES POTENTIALITÉS DU BASSIN CONVENTIONNEL DU LAC TCHAD, J COLOMBANI, Y BRUNET-MORET, G VUILLAUME ET A LAFFORGUE, 1979.

Afrique australe

MADAGASCAR • BASSINS DE L'IKOPA ET DE LA BETSIBOKA, M ALDEGHERI, 1964 • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU MANGOKY, M ALDEGHERI, 1967 (OCTOBRE 1961) • RÉGIMES HYDROLOGIQUES MALGACHES, M ALDEGHERI (EN COURS) • ÉTUDES HYDROLOGIQUES DU BASSIN DE LAC ALAOTRA, 1981.

RÉUNION • HYDROLOGIE SUPERFICIELLE DE LA RÉUNION (5 TOMES), LE GOURIERES, 1960.

Afrique du Nord

MAROC • MONOGRAPHIE DE L'OUM ER R'BIA, F MONIOD-M ROCHE, 1972 • MONOGRAPHIE DU BASSIN DE TENSIFT, Y BRUNET-MORET, J CRUETTE ET J FEAT, 1976 • MONOGRAPHIE DU BASSIN DU HAUT-SEBOU, M ROCHE, Y BRUNET-MORET ET H DOSSEUR, 1977.

TUNISIE • LE BASSIN DE LA MEDJERDAH (MONOG. HYDR. ORSTOM N° 6), J RODIER, J COLOMBANI, J CLAUDE ET KALLEL, 1981 (AOÛT 1975).

Afrique de l'Est

ÉTHIOPIE • ÉTUDE DU BASSIN DU WABI SHEBELLE, P BAUDUIN, 1974.

AMÉRIQUE

Départements Outre-Mer

GUADELOUPE • LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DE LA GUADELOUPE, P CHAPERON, Y L'HOTE ET G VUILLAUME, MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUES ORSTOM N° 7, 1985.

GUYANE • LES RÉGIMES HYDROLOGIQUES EN GUYANE FRANÇAISE, G HIEZ, P DUBREUIL, 1964.

MARTINIQUE • LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DE LA MARTINIQUE (MON. HYDR. ORSTOM N° 4), J GUISCAFRE, J-C KLEIN ET F MONIOD, 1976 (MARS 1972).

Amérique du Sud

BOLIVIE • ÉTUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE DES BASSINS AMAZONIENS DE BOLIVIE, M A ROCHE (MONOGRAPHIE A PRÉVOIR A L'ISSUE DU PROJET PHICAB).

BRÉSIL • MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DE JAGUARIBE, P DUBREUIL, G GIRARD ET J HERBAUD, (1965).

PACIFIQUE

NOUVELLE CALÉDONIE • RÉGIMES HYDROLOGIQUES DE NOUVELLE CALÉDONIE, F MONIOD, MLATAC, 1968 • RÉGIMES DE NOUVELLE CALÉDONIE, J DANLOUX, R GOUYET (EN COURS).

TAHITI • RÉGIMES HYDROLOGIQUES DE TAHITI, L FERRY (EN COURS).

N B CET ÉTAT CITE LE TITRE DE L'OUVRAGE, LES NOMS DES AUTEURS ET LA DATE DE LA PARUTION S'IL Y A UNE SECONDE DATE. ELLE SE RÉFÈRE AUX DONNÉES LES PLUS RÉCENTES UTILISÉES POUR LA RÉDACTION

ANNEXE VII

Liste restreinte d'aménagements hydrauliques étudiés

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE (1)

GUINÉE • KOULOURÉ (USINE D'ALUMINE).

CÔTE D'IVOIRE • AYAMÉ SUR LA BIA • KOSSOU SUR LE BANDAMA (BUTS MULTIPLES) • BUYO, SOUBRE SUR LA SASSANDRA.

NIGER • KANDADJI SUR LE NIGER (BUTS MULTIPLES).

CAMEROUN • LAGDO SUR LA BÉNOUÉ • EDEA, NACHTIGAL SUR LA SANAGA.

GABON • POUBARA SUR L'OGEAVÉ • TCHIMBELE, SUR LA MBEI.

MADAGASCAR • ROGEZ SUR LA VOHITRA.

BRÉSIL • PAULO ALFONSO, SOBRADINHO SUR LE SAO FRANCISCO.

URUGUAY • BAYGORRIA SUR LE RIO NEGRO.

ALIMENTATION URBAINE

CONGO • POINTE NOIRE.

SÉNÉGAL • DAKAR (RECHARGE NATURELLE DE LA NAPPE).

GUYANE • CAYENNE.

ÉQUATEUR • QUITO (RECHARGE ARTIFICIELLE DE LA NAPPE).

GABON • LIBREVILLE.

FRANCHISSEMENT FERROVIAIRE

VOIE DU CFCO-MBINDA (CONGO). CHEMIN DE FER TRANSCAMEROUNAIS.

AMÉNAGEMENTS INTÈGRES

ETHIOPIE • WABI SHEBELLI.

BRÉSIL • JAGUARIBE.

(1) EN COLLABORATION AVEC ELECTRICITÉ DE FRANCE

ANNEXE VIII

L'hydrologie et la télétransmission dans le programme de lutte contre l'onchocercose dans le bassin de la Volta

d'après B. Philippon (1), L. Le Barbe (2) et R. Le Berre (3)

Généralités : l'onchocercose et ses vecteurs

L'onchocercose humaine, ou cécité des rivières est causée par la filaire *Onchocerca volvulus*, ver filiforme vivant dans le derme de l'homme et transmise par des simules du complexe *Simulium damnosum* (petits mouches piqueurs de la famille des Simuliidae) qui présentent, entre autres, plusieurs caractéristiques marquantes.

Comme chez toutes les simules, les stades préimaginaux (œufs, larves, nymphes) sont aquatiques et rhéophiles ; en particulier, les larves sont mobiles mais fixées à faibles profondeurs sur des supports immergés dans le courant ; ce dernier leur apporte les substances alimentaires qu'elles sont incapables de rechercher activement et qu'elles filtrent passivement et sans discernement ; *S. damnosum* est une espèce exigeante, inféodée à des courants vifs (habituellement 0,70 - 2,0 m/s) correspondant classiquement à des zones de rapides) ;

— chez les adultes aériens (mouches) les femelles qui doivent obligatoirement prendre un repas de sang pour assurer la maturation de leurs œufs (soit tous les 3-4 jours environ) sont très agressives pour l'homme, qu'elles piquent de jour aux parties basses du corps et à l'extérieur des habitations : elles ont aussi une capacité de vol remarquable, atteignant plusieurs dizaines de kilomètres en vol dispersif, actif, à partir des lieux de développement et quelques centaines de kilomètres en vol migratoire, sans doute effectué en altitude avec l'assistance des vents saisonniers.

Les densités de simules n'en restent pas moins plus élevées à proximité des zones de rapides qui sont leurs lieux de développement (couramment appelés les « gîtes ») et les points de concentration des femelles migratrices parvenues au terme de leurs déplacements.

L'onchocercose est une maladie parasitaire cumulative c'est-à-dire que, en savane, sa gravité est dans une large mesure proportionnelle au degré d'infestation et d'exposition des individus à l'agent pathogène et donc à la densité de piqûres par les simules vectrices ; cela explique son appellation, justifiée en savane, de « cécité des rivières » puisque les lésions oculaires, manifestations cliniques les plus avancées, frappent significativement plus les villages riverains.

En fait, les intensités extrêmes de transmission onchocercienne sont marquées par le non peuplement des vallées infestées. Cette redoutable conséquence économique de l'endémie qui s'ajoute à de terribles effets socio-démographiques et sanitaires, a contribué durant ces dernières décennies à donner une priorité spéciale à la lutte contre l'onchocercose.

(1) CHEF DE L'UNITÉ DE LUTTE ANTIVECTORIELLE, OMS/OCP, OUAGADOUGOU

(2) HYDROLOGUE, ORSTOM, LOMÉ

(3) ENTOMOLOGISTE MÉDICAL, OMS/VBC/ECV, GENÈVE.

Principes de lutte

En l'absence de médicament facilement utilisable à grande échelle en milieu rural africain, la seule forme d'attaque possible pour briser le cycle homme-parasite-vecteur est pour le moment la lutte contre les simulies vectrices.

Actuellement, au stade opérationnel, cette lutte est exclusivement larvicide et chimique. Elle repose sur le principe d'applications répétées d'insecticides facilement biodégradables, non rémanents, et aussi spécifiques que possible, très faiblement dosés, formulés de façon à « porter » aussi loin que possible au fil de l'eau et à faible profondeur. Ces « larvicides » sont appliqués chaque semaine en amont de chaque « gîte » ou ligne de gîte (zone de rapides connue pour être colonisée par les larves de *S. damnosum* à la période considérée). Les applications peuvent être faites par voie terrestre, fluviale ou aérienne. Dans tous les cas, des dispositifs appropriés permettent de moduler les quantités délivrées et le temps d'écoulement en fonction de l'insecticide, des concentrations choisies, de la configuration du cours d'eau, etc.

L'Abate (téméphos) en concentré émulsionnable de 20 % de matière active, qui avait succédé au DDT au début des années 1970, est pour l'instant le produit qui répond le mieux aux spécifications précédentes ; il fut pendant une décennie le seul larvicide utilisé et reste le plus largement employé. Actuellement, le chlorphoxime, autre concentré émulsionnable d'organo-phosphoré est également utilisé ainsi qu'une formulation de *Bacillus thuringiensis sérotype H 14* (Bt H 14, insecticide biologique) dans les régions où se sont développées des résistances du vecteur aux organo-phosphorés.

Les concentrations théoriques utilisées varient de 0,05 à 0,1 mg/l pendant 10 min en fonction du débit des cours d'eau (proportionnalité inverse) avec les concentrés émulsionnables d'organo-phosphorés et sont de 1,6 mg/l pendant 10 min avec les formulations de *Bt H 14* (indépendamment des débits).

Quel que soit l'insecticide utilisé, les concentrations doivent impérativement avoir un effet létal de 100 % sur les populations larvaires de simulies atteintes par la vague insecticide et un effet négligeable sinon nul sur la faune aquatique non cible, en premier lieu les poissons.

Lors de chaque épandage, la connaissance du débit du cours d'eau à traiter est par conséquent un facteur essentiel de la qualité et de l'efficacité des applications de larvicides : les sous-dosages risquent d'être inefficaces contre les vecteurs et d'avoir de graves conséquences épidémiologiques, tandis que les surdosages sont préjudiciables à l'environnement ; dans les deux cas, il y a gaspillage d'insecticide et des moyens logistiques d'application.

Pour un même insecticide, le nombre de points d'application et le choix de leurs emplacements dépend très largement de facteurs hydrologiques, débit et configuration des cours d'eau (largeur, répartition des courants, des rapides, des eaux mortes, etc.). D'une façon générale, aux basses eaux ou sur les petits cours d'eau, les gîtes sont constitués par l'affleurement de seuils rocheux séparés, par des zones étales au courant insignifiant où l'insecticide se décante : sa portée est alors quasiment nulle et chaque rapide doit faire l'objet d'une application individuelle (traitements gîte par gîte, applications multiples de très petites quantités de larvicides) ; aux hautes eaux, au contraire, la masse d'eau en mouvement est dotée d'une vitesse de courant suffisante à elle seule pour transformer les innombrables supports végétaux submergés en une

multitude de gîtes diffus ; la portée et l'espacement des applications sont alors maximum, et des épandages d'organo-phosphorés dosés de moitié par rapport à ceux de saison sèche (mais volumétriquement bien plus importants) peuvent être efficaces sur quelques dizaines de kilomètres.

Le programme de lutte contre l'onchocercose dans le bassin de la Volta (OCP)

Mis en place en 1974 et planifié sur 20 ans, il intéresse près de 900 000 km² répartis sur 7 États ouest-africains (Bénin, Côte-d'Ivoire, Ghana, Burkina-Faso, Mali, Niger, Togo).

Son objectif n'est pas d'éradiquer le vecteur, mais d'en contenir les populations de manière à interrompre la transmission de la maladie ou du moins à la maintenir, pendant une durée supérieure à celle de la vie du parasite chez l'homme, en deçà du niveau de risque oculaire chez les communautés riveraines qui pourront ainsi occuper ou reconquérir les vallées inhabitées.

La lutte chimique antilarvaire pratiquée à grande échelle selon les principes définis ci-dessus est jusqu'à présent la seule tactique utilisée.

Les capacités de vol du vecteur imposent les traitements larvicides sur des superficies considérables pour limiter les effets des réinvasions et recontaminations, ce qui explique la taille du Programme : 18 000 km de cours d'eau irrigant 764 000 km² sont ainsi actuellement sous surveillance continue (kilométrage qui se réduit à quelques milliers en saison sèche). Le traitement sur de telles distances nécessite des milliers de points d'application par semaine et le recours à une flotte aérienne d'épandage. Celle du Programme se compose actuellement de neuf hélicoptères (dont un gros porteur et deux de prospection) et de deux avions.

Parvenu presque à mi-chemin de sa durée de vie escomptée et après 6 à 9 années de traitement (selon les régions), le Programme a déjà enregistré de remarquables succès, dont certaines retombées dépassent même les prévisions :

- la transmission onchocerquienne est interrompue ou réduite à un niveau insignifiant dans 80 % de l'aire initiale ;
- l'infection et la maladie régressent de façon spectaculaire ; la mortalité naturelle de la population des filaires parasitent les individus infectés atteint parfois déjà près de 50 % ;
- dans de nombreux endroits de l'aire traitée où le handicap onchocerquien a été levé se dessinent ou se concrétisent des mouvements spontanés de repeuplement ou de reconquête stables.

La part des études hydrologiques à OCP

La part de l'hydrologie est forcément importante dans l'épidémiologie d'une maladie comme l'onchocercose strictement inféodée aux eaux courantes, qui sont de surcroît le théâtre de l'unique forme de lutte pratiquée contre ce fléau.

Etant donné l'exigence de respecter des normes relativement strictes en matière de dosage des insecticides, la nécessité de disposer au préalable d'un excellent réseau de stations limnimétriques bien étalonné, calqué sur celui des rivières à traiter, est évidente. L'entretien de ce ré-

seau en cours de campagne et le réétalonnage de ses stations, pour compenser les avatars des variations hydrologiques (détarages, changements du lit mineur, création de retenues, etc.) sont aussi des composantes d'un programme de lutte antisimulies.

Dans le contexte d'amélioration de rapport coût-efficacité, l'intervention de l'hydrologue est justifiée à plusieurs autres titres :

- meilleur ajustement des circuits d'application et optimisation des nombres et des emplacements des points d'épandages, par une meilleure connaissance de la diffusion des différents produits dans l'eau et du comportement de la vague larvicide au fil du courant (portée), en fonction des configurations locales des cours d'eau ;
- études hydrauliques locales sur certains grands complexes de rapides d'importance stratégique particulière, ou notoirement difficiles à réduire, qui constituent d'énormes réservoirs de simulies et sont des sources de recontamination de très vastes régions : Bas Bandama, gorges de Bui par exemple ;
- mise au point d'un système simple d'estimation des débits sur les plus importantes des nombreuses rivières qui ne sont pas justiciables d'une échelle de crue en raison de leurs petits débits, de traitements très saisonniers, parfois suspendus certaines années, de l'impossibilité d'assurer les lectures, etc.
- participation à l'élaboration d'un système de prévision des risques entomo-épidémiologiques, par intégration des données hydrologiques disponibles auprès des services nationaux spécialisés (mesures de niveaux et de débits en particulier), des données d'observation de huit années de survol quotidien du réseau hydrographique par OCP, et des informations entomologiques relatives à la productivité simulidienne réelle ou potentielle des zones de rapides.

Bien que reposant sur une stratégie planifiée (épandages systématiques espacés de 7 jours), les calendriers d'opérations larvicides sont corrigés empiriquement, en particulier en ce qui concerne le choix des biefs à traiter (parfois aussi le choix du larvicide ou le type d'aéronef), ce qui se traduit essentiellement par des suspensions intentionnelles plus ou moins prolongées de traitement sur des biefs plus ou moins longs et nombreux, dont résultent évidemment des économies parfois considérables d'heures de vol et de consommation de larvicide (et donc de « repos » pour la faune aquatique non cible). Bien qu'en nette expansion depuis quelques années, cette pratique des suspensions pourrait encore certainement être étendue ; d'autre part, certaines décisions de suspension ne peuvent actuellement être prises qu'extemporanément sur place, ce qui économise certes de l'insecticide mais ne réduit nullement les heures de vol.

L'avantage d'un système de prévision permettant de décider de la tactique à adopter avant le décollage des aéronefs est évident ;

- amélioration de l'exactitude du dosage de l'insecticide ; actuellement les lectures d'échelles de crues servant au calcul des doses sont faites au mieux 4 jours (parfois jusqu'à 8 !) avant l'application, ce qui aux hautes eaux et aux saisons intermédiaires peut se traduire par d'importantes erreurs de dosage. Ainsi, une première évaluation révèle que 40 % seulement des traitements de grands cours d'eau seraient dosés correctement, les 60 % restants se partageant de façon égale entre sur et sous dosages. Etant donné l'ampleur du Programme, les dépenses inutiles correspondantes pourraient atteindre plusieurs centaines de milliers de dollars.

Le rôle possible de la télétransmission dans l'action d'OCP

La télétransmission des mesures limnimétriques se présente comme le meilleur moyen pour raccourcir le trop long délai entre lecture et traitement, pour travailler pratiquement en temps réel et obvier aux gaspillages qui viennent d'être exposés. Il est apparu à OCP, après consultation d'un groupe d'experts (Télétransmission des données hydrologiques dans la lutte contre *Simulium damnosum* / Compte rendu d'une réunion informelle : 7-15 mars 1983 / Siège d'OCP / Ouagadougou Burkina-Faso ; 77 p. 2 cartes, 4 annexes) que l'amélioration du rapport coût-efficacité escomptée par l'introduction de cette technique pouvait justifier une étude pilote sous l'égide du Programme.

Le système de satellites Argos a été considéré comme le mieux adapté aux objectifs et conditions de l'étude pilote (efficacité et fiabilité avérées, pérennité, 8 passages quotidiens à la latitude de Ouagadougou, mesure d'un seul paramètre) et son choix a été retenu.

Il convient d'abord d'équiper les stations limnimétriques sélectionnées de limnigraphes ainsi que de stations émettrices (balises) et de codeurs alimentés par piles (piles sèches ou panneaux solaires). L'efficacité, la fiabilité et l'économie de l'ensemble sont maintenant éprouvées dans les conditions opérationnelles tropicales.

L'installation d'une station de réception directe des données renvoyées par le satellite et l'abonnement au fichier mensuel sur bande magnétique du système Argos apparaît comme une solution mieux appropriée au projet, que l'interrogation par telex du centre Argos de Toulouse ou du système international des télécommunications météorologiques.

La solution *a priori* séduisante d'une station mobile de réception embarquée à bord des aéronefs de traitement n'est pas retenue, car susceptible d'augmenter les durées de vol (détours pour le survol des balises), d'accroître les tâches du pilote, d'obérer la sécurité et la qualité des traitements et de nuire à la standardisation des opérations de lutte.

La zone pilote sélectionnée est le cours moyen de l'Oti, et le bassin de ses affluents la Kéran et la Kara, dans le nord du Togo. Ce choix obéit à des critères entomologiques (bonnes connaissances de la bio-écologie des vecteurs), opérationnels (zone traitée « en routine » avec un seul aéronef, présence d'un secteur d'évaluation et d'une base aérienne d'OCP à Kara) et hydrologiques (diversité des cours d'eau, bon réseau de stations limnimétriques, proximité d'une expertise hydrologique à Lomé).

Cinq stations limnigraphiques s'ajouteront aux trois existantes et toutes seront équipées de balises Argos. La station réceptrice sera prêtée par l'ORSTOM et installée au siège d'OCP à Ouagadougou.

Cette étude pilote donnera lieu à une évaluation des améliorations du rapport coût-efficacité qui décidera de l'extension ou non de la tactique à l'ensemble de la zone d'OCP. Cette évaluation devra être particulièrement approfondie et détaillée, compte tenu de l'ampleur d'une telle extension et de son coût ; mais il convient dès maintenant de noter que, puisque le réseau hydrographique de la zone d'OCP n'a pu être doté d'une station limnimétrique par bief et affluent surveillé, *a fortiori* chacun de ses cours d'eau ne saurait être équipé d'une balise Argos. En outre, le gain de temps entre lecture d'échelle et traitement ne sera de toute façon que relatif et n'atteindra pas l'extem-

poranité. C'est dire que les autres types d'intervention d'études hydrologiques mentionnés au point 4 seront, de toutes façons, nécessaires.

Mais il faut souligner que l'instauration d'un système de télétransmission dans les structures d'OCP aurait nombre de retombées intéressantes. En effet, les capacités du système seraient loin d'être saturées, la collecte d'autres informations soit hydrologiques soit météorologiques pourrait être ajoutée au recueil des informations d'OCP, et la station de réception pourrait être utilisée par d'autres services nationaux ou multinationaux ; une collaboration fructueuse pourrait en résulter, pour une meilleure connaissance des phénomènes pluviométriques et hydrologiques, ainsi que des eaux de surface par les services nationaux, dont les techniciens pourraient aussi bénéficier d'une formation ou d'un recyclage approprié.

Toutes retombées qui ne pourraient que contribuer à l'intégration d'OCP dans les programmes d'aménagement et actions de développement aussi bien des services nationaux des pays participants que des autres programmes régionaux, multinationaux et internationaux.

N.B. LES TITRES PARUS DANS LES COLLECTIONS ET PÉRIODIQUES SONT RÉPERTORIÉS DANS L'INVENTAIRE PRÉCÉDENT.

N.B. PRÈS DE 90 % DES DOCUMENTS RÉPERTORIÉS REPRÉSENTENT DES RAPPORTS D'ÉTUDES, SOUVENT EXÉCUTÉS SUR CONTRATS (LITTÉRATURE GRISE) ; L'ACCESSIBILITÉ DÉPEND DES CONDITIONS CONTRACTUELLES DANS CE DERNIER CAS.

ANNEXE IX



Bibliographie hydrologique ORSTOM 1950-84

Documents publiés et répertoriés. Total de 2 718 titres

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE. RÉGIONS CONCERNÉES

- AFRIQUE OCCIDENTALE 709 DOCUMENTS : CÔTE D'IVOIRE 158 • NIGER 124 • BURKINA-FASO 109 • MALI 92 • TOGO 67 • SÉNÉGAL 51 • 6 AUTRES PAYS 108.
- AFRIQUE CENTRALE 613 DOCUMENTS : DONT TCHAD 211 • CAMEROUN 178 • CONGO 105 • GABON 43 • 6 AUTRES PAYS 76.
- MADAGASCAR 144 DOCUMENTS
- DÉPARTEMENT FRANÇAIS D'OUTRE-MER 251 DOCUMENTS : DONT ANTILLES (MARTINIQUE, GUADELOUPE) 144 • GUYANE 64 • RÉUNION 43.
- TERRITOIRE FRANÇAIS D'OUTRE-MER 129 DOCUMENTS : DONT NOUVELLE-CALÉDONIE 105 • TAHITI 24.
- AMÉRIQUE LATINE ET CARAIBES 109 DOCUMENTS : DONT BRÉSIL 81 • ÉQUATEUR 14 • 5 AUTRES PAYS 14.
- ASIE DU SUD-EST ET PACIFIQUE SUD 21 DOCUMENTS SOIT AU TOTAL 2 196 DOCUMENTS.

DOCUMENTS MÉTHODOLOGIQUES ET DIVERS SANS OBJECTIFS GÉOGRAPHIQUES PARTICULIERS 522 DOCUMENTS.

Collections et périodiques

COLLECTIONS DES MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES ORSTOM

8 TITRES PARUS, 2 A PARAÎTRE

- LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (C ROCHETTE), 411 P. + 3 CARTES ANNEXES (NOIR) ISBN 2-7099-0344-X

- LE BASSIN DU FLEUVE CHARI (B BILLON, J GUISCAFRE, J HERBAUD, G OBERLIN) 450 P. + 5 CARTES ANNEXES (NOIR) ISBN 2-7099-0329-6

- LE BASSIN DE LA RIVIÈRE SANAGA (P DUBREUIL, J GUISCAFRE, J F NOUVELLOT, J C OLIVRY) 350 P. + 4 CARTES ANNEXES (NOIR) ISBN 2-7099-0392-X

- LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DE LA MARTINIQUE (J GUISCAFRE, J C KLEIN, F MONIOD), 392 P. + 9 CARTES ANNEXES (NOIR) ISBN 2-7099-0392-X

- LE BASSIN DU FLEUVE VOLTA (F MONIOD, B POUYAUD, P SECHET), 514 P. + 4 CARTES ANNEXES (NOIR) / 6 MICROFICHES ISBN 2-7099-0469-1

- LE BASSIN DE LA MEJERDAH (J A RODIER, J COLOMBANI, J CLAUDE, R KALLEL) 452 P. + 7 CARTES ANNEXES (NOIR) + 4 MICROFICHES ISBN 2-7099-0595-7

- LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DE LA GUADELOUPE (P CHAPERON, Y L'HÔTE, G VUILLAUME) 2 TOMES : 834 P. + 3 CARTES ANNEXES (NOIR) + 1 CARTE (COULEUR) + 4 MICROFICHES ISBN 2-7099-0761-5

- MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU FLEUVE NIGER
TOME I NIGER SUPÉRIEUR
TOME II CUVETTE LACUSTRE, NIGER MOYEN
PAR Y BRUNET-MORET, P CHAPERON, J P LAMAGNAT, M MOLINIER
PARIS 1986.

- RÉGIMES DES FLEUVES ET DES RIVIÈRES DU CAMEROUN (J C OLIVRY) (A PARAÎTRE)
MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU LAC TCHAD (C VUILLAUME, A CHOURET) (A PARAÎTRE)

CAHIERS ORSTOM SÉRIE HYDROLOGIE

1964-66 5 NUMÉROS • 1967-85 PÉRIODIQUE TRIMESTRIEL, VOLUME IV, 1, 2, 3, 3 A VOL. XXI.

1986 • LANCEMENT NOUVELLE REVUE SEMESTRIELLE HYDROLOGIE CONTINENTALE. ORSTOM ÉDITEUR

Liste bibliographique complète

- 1950 A 1976 • BIBLIOGRAPHIE HYDROLOGIQUE. ORSTOM ÉDITEUR 2 VOLUMES.
- 1977 A 1984 • PRINCIPALES PUBLICATIONS DU SERVICE HYDROLOGIQUE DE L'ORSTOM PAR P JARRE (1977) ET J SIRCOULON (1978-84). PARUTION ANNUELLE IN CAHIERS ORSTOM, SÉR. HYDROL. VOL. XVI A VOL. XXI.

Bibliographie hydrobiologique ORSTOM 1964-83

ENVIRON 400 TITRES RÉPERTORIÉS DANS L'OUVRAGE ORSTOM 1983 « RECHERCHES HYDROBIOLOGIQUES RÉALISÉES EN ZONE TROPICALE ». CERTAINS SONT PARUS DANS LES CAHIERS ORSTOM, SÉRIE HYDROBIOLOGIE (PUIS REVUE D'HYDROBIOLOGIE) DEPUIS 1967.

Conditions d'accessibilité

- ORSTOM/SERVICE DES PUBLICATIONS, 70-74 ROUTE D'AULNAY F-93140 BONDY.
- ORSTOM/LABORATOIRE D'HYDROLOGIE MINI PARC, BATIMENT 2 ZOLAD RUE DES APOTHECAIRES F-34100 MONTPELLIER.

MÉTHODES, ACQUIS ET PERSPECTIVES

DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE FRANÇAISE

EN ZONE INTERTROPICALE

DANS LE DOMAINE DE L'UTILISATION AGRICOLE

DE L'EAU

J.C. LE GOUPIL
CIRAD

M. EL DIN
ORSTOM

P. 157 ■ INTRODUCTION ■ **P. 157** ■ LES ACQUIS DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE TROPICALE DANS LE DOMAINE DE L'UTILISATION AGRICOLE DE L'EAU / CARACTÉRISATION DES CLIMATS ET AGROCLIMATS / ÉVALUATION ET EXPRESSION DES RISQUES ET DES POTENTIALITÉS CLIMATIQUES POUR LA PRODUCTION AGRICOLE - ZONAGE AGRO-PÉDO-CLIMATIQUE / OBJECTIFS / ACQUIS / ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES CLIMATS ET PRÉDICTIONS CLIMATIQUES A COURT ET MOYEN TERMES / OBJECTIFS / ACQUIS / ÉTUDES DES RELATIONS EAU-SOL-PLANTE-CLIMAT / OBJECTIFS / ACQUIS / CARACTÉRISATION HYDRIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES SOLS / ALIMENTATION ET BESOINS EN EAU DES CULTURES / MODÉLISATION DES RELATIONS EAU-SOL-PLANTE-ATMOSPHÈRE / ADAPTATION DES CULTURES AUX CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE / L'IRRIGATION : UNE TECHNIQUE CONTRE-ALÉATOIRE DE LA PLUVIOMÉTRIE / TECHNIQUES ET MÉTHODES D'IRRIGATION / IRRIGATION ET ÉNERGIE / IRRIGATION ET SYSTÈMES DE CULTURE / CONCLUSION SUR LES ACQUIS : LES PRODUITS DE LA RECHERCHE ACTUELLEMENT PROPOSABLES AU DÉVELOPPEMENT ■ **P. 169** ■ LE POTENTIEL DE RECHERCHE / LE DISPOSITIF DE TERRAIN / COLLABORATIONS AVEC LES AUTRES ORGANISMES DE RECHERCHES / LE RÉSEAU DE RECHERCHE SUR LA RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE / LES ACTIVITÉS DE FORMATION ■ **P. 171** ■ PERSPECTIVES ET PROGRAMMES PRIORITAIRES POUR L'UTILISATION AGRICOLE DE L'EAU / ÉTUDES RÉGIONALES SUR LES AGROCLIMATS / ITINÉRAIRES TECHNIQUES - SYSTÈMES DE CULTURES POUR UNE MEILLEURE VALORISATION AGRICOLE DE L'EAU / AGROMÉTÉOROLOGIE - AVERTISSEMENT AGRICOLE / LA PETITE HYDRAULIQUE AGRICOLE EN MILIEU PAYSAN / ÉCONOMIE DE L'EAU ET AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRIQUES / PRISE EN CONSIDÉRATION DES ZONES « TROPICALES HUMIDES » AFFECTÉES PAR LA SÉCHERESSE ■ **P. 179** ■ CONCLUSION **P. 181** ■ RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES PRINCIPALES

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : F. 24262 - 3

Cpte : A

**METHODS, ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS
OF FRENCH AGRICULTURAL RESEARCH IN
INTERTROPICAL ZONES: THE AGRICULTURAL
USE OF WATER**

J.C. LE GOUPIL
CIRAD

M. ELDIN
ORSTOM

P. 157 ■ INTRODUCTION ■ **P. 157** ■ ACHIEVEMENTS OF TROPICAL AGRICULTURAL RESEARCH REGARDING THE AGRICULTURAL USE OF WATER / CHARACTERIZATION OF CLIMATES AND AGROCLIMATES / EVALUATION AND EXPRESSION OF WEATHER RISKS AND POTENTIAL FOR AGRICULTURAL PRODUCTION / OBJECTIVES / ACHIEVEMENTS / ANALYSIS OF WEATHER TRENDS AND SHORT - AND MEDIUM-TERM WEATHER FORECASTING / OBJECTIVES / ACHIEVEMENTS / RESEARCH ON WATER-SOIL-PLANT-CLIMATE RELATIONSHIPS / OBJECTIVES / ACHIEVEMENTS / HYDRIC AND HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF SOIL / CROP WATER REQUIREMENTS / MODELLING OF WATER-SOIL-PLANT-ATMOSPHERE RELATIONSHIPS / ADAPTATION OF CROPS TO WATER SUPPLY CONDITIONS / IRRIGATION: AS A RAINFALL COUNTER-RISK TECHNIQUE / IRRIGATION METHODS AND TECHNIQUES / IRRIGATION AND ENERGY / IRRIGATION AND CROP SYSTEMS / CONCLUSION: RESEARCH GAINS THAT MAY NOW BE PROPOSED FOR DEVELOPMENT ■ **P. 169** ■ RESEARCH POTENTIAL / IN THE FIELD / COOPERATION WITH OTHER RESEARCH AGENCIES / RESEARCH NETWORK ON DROUGHT RESISTANCE / TRAINING ACTIVITIES ■ **P. 171** ■ PROSPECTS AND PRIORITY PROGRAMS REGARDING THE AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT / REGIONAL STUDIES ON AGROCLIMATES / TECHNICAL ITINERARIES - CROP SYSTEMS TO MAKE BETTER AGRICULTURAL USE OF WATER / AGROMETEOROLOGY - AGRICULTURAL WARNING SYSTEMS / SMALL SCALE IRRIGATION PROJECTS / WATER MANAGEMENT AND LARGE IRRIGATION PROJECTS / CONSIDERATION OF "MOIST TROPIC" ZONES AFFECTED BY DROUGHT ■ **P. 179** ■ CONCLUSION ■ **P. 181** ■ BIBLIOGRAPHY

Méthodes, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale dans le domaine de l'utilisation agricole de l'eau

En zone intertropicale, l'importance de l'alimentation hydrique des cultures n'est plus à démontrer. L'actuelle période de sécheresse qui sévit depuis une quinzaine d'années, a mis en évidence la sensibilité des systèmes agricoles aux aléas climatiques.

Compte tenu de l'importance de ce facteur, les recherches ont principalement porté sur les problèmes de *valorisation agricole* de l'eau. Le tableau 1 ci-après résume la finalité des actions de recherche pour le développement, ainsi que les thèmes scientifiques étudiés pour la réalisation de ces objectifs.

Dans une première étape, les travaux de recherche ont eu un objectif d'acquisition de connaissances de bases dans les thèmes scientifiques et techniques de l'utilisation agricole de l'eau. La mobilisation progressive de cet important référentiel technique a permis, dans une deuxième étape, une orientation plus globale, plus intégrée des travaux de recherche, traduisant, par ce fait, le souci d'apporter des solutions opérationnelles aux problèmes du développement rural. Cette évolution des priorités se retrouve dans l'analyse des acquis et des perspectives de la recherche agronomique tropicale dans le domaine de l'utilisation agricole de l'eau.

Les acquis de la recherche agronomique tropicale dans le domaine de l'utilisation agricole de l'eau

La finalité des travaux de recherche et expérimentation entrepris dans le domaine de l'alimentation hydrique des cultures vivrières a été de mettre au point, puis de diffuser des techniques de cultures permettant une valorisation optimale de l'eau compte tenu du climat, du sol et des disponibilités en eau. Ces travaux peuvent être regroupés sous 3 thèmes principaux :

- caractérisation des climats et agroclimats ;
- études des relations eau-sol-plante-climat ;
- l'irrigation de complément : une technique contre-aléatoire de la pluviométrie.

Methods, achievements et prospects french agricultural research in intertropical zones: the agricultural use of water

There need hardly be further demonstration of the importance of the supply of water in the area between the tropics. The ongoing drought which has lasted for some fifteen years highlighted the sensitivity of agricultural systems to the vagaries of weather.

In view of the importance of this factor, research has focused largely on the problems of making optimum agricultural use of water. Table 1 summarizes the development research aims and the scientific topics studied with a view to fulfilling those aims.

In a first stage, research work was oriented toward gaining basic knowledge of the scientific and technical aspects of the agricultural use of water. The progressively greater utilization of this technical reference materials made it possible in a second stage to take a broader, more integrated approach to research work, which hence came to reflect the desire to find workable solutions to the problems of rural development. This shift in priorities will be readily discernable in an analysis of the achievements of and outlook for tropical agricultural research in the field of the agricultural use of water.

Achievements of tropical agricultural research regarding the agricultural use of water

The aim of the research and experimentation work carried out in the area of food crop watering has been to develop and then disseminate farming techniques which make it possible to make the best possible use of water in light of the climate, soil conditions and water availability. These efforts may be classified under three major topics :

- characterization of soil conditions and agroclimates;
- research on water-soil-plant-climate relationships;
- supplementary irrigation: a technique against the rainfall hazard.

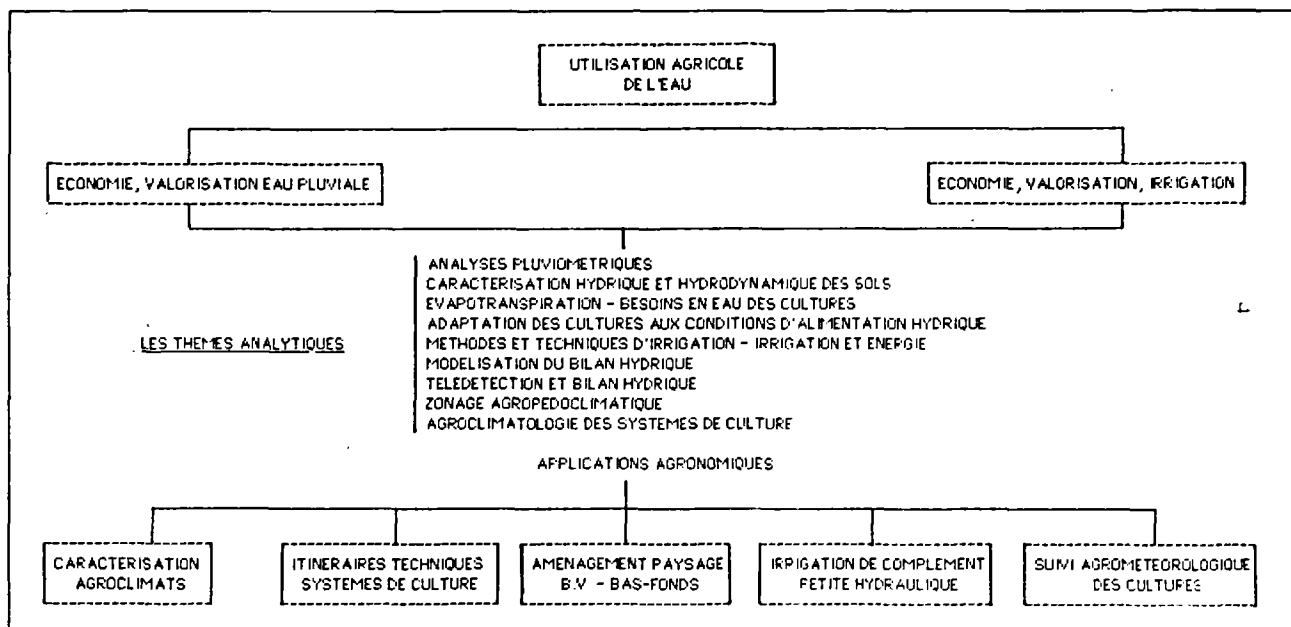


Tableau 1 : Thèmes de recherche et finalités de l'utilisation agricole de l'eau
Research topics and finalities in the agricultural use of water

Caractérisation des climats et agroclimats

Il s'agit ici d'études agroclimatiques dont l'objet est de formuler les relations relativement pérennes et probables existant entre le climat d'une zone et son agriculture : évaluation des potentialités et des risques pour la production.

Elles sont réalisées généralement à l'échelle régionale et concernent également l'évolution des climats et la prédiction à court et moyen termes du type de saison des pluies que l'on peut espérer chaque année.

ÉVALUATION ET EXPRESSION DES RISQUES ET DES POTENTIALITÉS CLIMATIQUES POUR LA PRODUCTION AGRICOLE – ZONAGE AGRO-PÉDO-CLIMATIQUE

• OBJECTIFS

On se propose de déterminer en termes de probabilités l'occurrence des principaux risques climatiques agricoles : sécheresse, excès d'eau, gel, grêles (altiplano bolivien) et d'évaluer l'aptitude de chaque zone pour la production agricole. Ces études agro-climatiques peuvent être complétées par la prise en compte du facteur sol en tant que variable intervenant dans le stockage et la restitution aux plantes des précipitations. Le mode d'expression le plus courant des résultats obtenus est le zonage régional agro-pédo-climatique. A cette échelle régionale, il est évident que le paramètre sol-réservoir hydrique ne peut être que globalement et sommairement pris en considération, traduisant des valeurs moyennes régionales.

• ACQUIS, en zone intertropicale

L'eau étant le principal facteur limitant des rendements, l'essentiel des recherches entreprises dans ce domaine a porté sur « l'offre climatique en eau », c'est-à-dire la plu-

Characterization of climates and agroclimats

This area of endeavor refers to agroclimatological research aimed at formulating the relatively long-term relationships that exist between a given area and its agriculture: evaluation of crop production potential and risks.

These studies are generally regional in scope and also consider changes in the climate and short- and medium-term weather forecasting, such as of the type of rainy season that may be expected each year.

EVALUATION AND EXPRESSION OF WEATHER RISKS AND POTENTIAL FOR AGRICULTURAL PRODUCTION

• OBJECTIVES

This is an effort to determine, in terms of probabilities, the occurrence of the major climatic risks to agriculture: drought, excess water, frost, hail (Bolivian high plain), as well as to assess the suitability of each zone for agricultural production. These agro-climatological studies may be completed by taking into account soil factors as a variable affecting the storage of precipitation. The most common way of expressing findings is regional zoning by agro-pédo-climatic conditions. On such a regional scale, it is obvious that the soil-as-water-reservoir parameter can be considered only in global and summary terms, reflecting average regional values.

• ACHIEVEMENTS

As water is the principal factor limiting harvests, the bulk of the research carried out in this area has dealt with the "climatic supply of water", i.e. rainfall, and the "climatic demand for water", i.e. potential evapotranspiration.

viométrie et sur « la demande climatique en eau », c'est-à-dire l'évapotranspiration potentielle.

Deux voies ont été explorées ; la première est la collecte des informations climatiques et la mise à disposition de ces informations, la seconde est l'analyse et le traitement de ces informations.

- Collecte - Saisie - Critique des données climatiques

Les organismes de recherche n'ont pas pour vocation de gérer un réseau systématique et structuré de mesures, enregistrement et collecte des variables climatiques, mais disposent d'un ensemble de parcs météorologiques en accompagnement à leurs programmes de recherches agronomiques. Ce réseau, mis en place et exploité conjointement avec les institutions nationales météorologiques, dispose d'un fichier particulièrement important pour l'Afrique de l'Ouest, qui s'étend maintenant à d'autres implantations au Brésil, Bolivie, Vénézuéla, Costa Rica, Nicaragua, Antilles, La Réunion.

— Un processus de « collecte-saisie-prétraitement » des données climatologiques basé sur l'utilisation de stations automatiques a été mis au point en collaboration avec l'INRA ; un réseau fonctionne depuis plus de 3 années à La Réunion.

— Un fichier informatisé des pluies journalières de l'ensemble des stations des pays d'Afrique de l'Ouest adhérents au Conseil Inter-États d'Études Hydrologiques (CIEH) a été réalisé dans le cadre d'une convention passée avec cet organisme. Il porte sur la totalité des données acquises depuis la création de ces stations. Toutes les données mises sur support informatique ont été critiquées, en particulier par confrontation aux originaux (carnets d'observations). Ce fichier « opérationnel » des pluies est en cours de mise à jour, jusqu'à 1985 inclus.

- Analyse-traitement des informations agroclimatiques

Dans ce domaine, les travaux sont spécifiquement orientés vers un traitement des données pluviométriques pour une utilisation agronomique. Plusieurs logiciels de traitement de données sont actuellement opérationnels :

— des logiciels de saisie, critique et analyse des données pluviométriques. Une méthode dite du « vecteur régional » a été mise au point. Elle permet par approximations successives de constituer un fichier de données pluviométriques de référence pour chaque zone réputée homogène. La validation des données de chaque station se fait par comparaison (double masse) à cette référence, dite « vecteur régional » (Hiez, 1977).

— Logiciels permettant l'analyse fréquentielle des données pluviométriques après ajustement de l'échantillon à une loi théorique appropriée (méthode des moments et méthodes du maximum de vraisemblance) (Brunet-Moret, 1969).

— Une caractérisation du régime pluviométrique à l'échelle nationale (Côte d'Ivoire, Gigou, 1972 ; Sénégal, Dancette, 1982) utilisable d'un point de vue agronomique.

— Une méthode de suivi en temps réel de la pluviométrie de l'année en comparaison avec la médiane historique (Nicaragua, Sénégal, Maraux, 1985, Dancette, 1984).

— Une possibilité d'estimation en zone sahélienne ($P < 500$ mm) des pluviométries à partir des données de température de surface fournies par les satellites météorologiques Météosat et NOAA (Séguin, Fréteaud, Assad 1985).

- Zonage régional agro-pédo-climatique

— Une méthode a été proposée pour le zonage agro-climatique (Eldin, 1983).

— Une méthode de zonage agro-pédo-climatique basée

Two different approaches have been tried: first, gathering climatic data and making this information available, and second, processing and analyzing these data.

- Collection, acquisition and analysis of climatic data

The functions of research agencies do not include the administration of a systematic and structured network for the measurement, recording and gathering of data on climatic variables, but they do have access to a number of weather stations that exist alongside their agricultural research programs. In West Africa, this network, established and operated jointly with national weather bureau, maintains particularly sizable files, and coverage now extends also to other facilities in Brazil, Bolivia, Venezuela, Costa Rica, Nicaragua, the Antilles and La Reunion.

— A process entailing the "gathering, capture and preprocessing" of climatological data based on the use of automatic weather stations has been developed in cooperation with INRA *: a network has been in operation on Reunion for more than three years.

— A computerized file on daily rainfall for all the weather stations in the West African member countries of the Interstate Council on Hydrological Research (CIEH) has been developed within the framework of an agreement signed with that agency. It incorporates all the data obtained since the stations were first established. All the data already on the computer have been critically evaluated, in particular by comparison with the original documents (notebooks of readings). This "operational" file on rainfall is now being updated through 1985.

- Analysis and processing of agroclimatic data

In this area, work has been aimed specifically at the processing of rainfall data for agronomic applications. Several data processing programs are currently operational:

— programs for capturing, critiquing and analyzing rainfall data. One method, called the "regional vector" method, has been finalized. Using successive approximation, it makes it possible to establish a reference file of rainfall data for each area considered to be homogeneous. Validation of the data for each station is by (duplicate) comparison to the aforementioned "regional vector" reference (Hiez, 1977);

— programs for the frequency analysis of rainfall data after adjustment of the sample to a suitable theoretical formula (moments method and maximum likelihood method) (Brunet-Moret, 1969);

— characterization of the rainfall pattern on a national scale (Cote d'Ivoire: Gigou, 1972; Senegal: Dancette, 1982) usable for agricultural purposes;

— a method for real-time monitoring of the current year's rainfall in comparison with the historical average (Nicaragua: Maraux, 1985; Senegal: Dancette, 1984);

— a possibility for estimating rainfall in the Sahel region (where $R < 500$ mm) on the basis of surface temperature data provided by METEOSAT and NOAA weather satellites (Seguin, Fréteaud and Assad, 1985).

- Agro-pédo-climatological zoning by region

— A method for agroclimatological zoning has been proposed (Eldin, 1983).

— A method has been proposed for agro-pédo-climatological zoning based on the use of a model Water

* INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE.

sur l'utilisation d'un modèle de Bilan Hydrique prenant en compte différentes réserves en eau utile du sol, a été proposée (Forest, Reyniers, 1985) (Lhomme, Eldin, 1985).

— Des zonages de ce type ont été réalisés au Costa Rica (Rojas, 1983), en Jamaïque, en Bolivie, en Côte d'Ivoire (Eldin, 1971, Forest, Valet, 1983), au Brésil (Steinmetz, Forest, Reyniers, 1985), au Sénégal (Dancette, 1983).

ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES CLIMATS ET PRÉDICTIONS CLIMATIQUES A COURT ET MOYEN TERMES

• OBJECTIFS

Par l'analyse des séries chronologiques de pluies, on se propose de faire la part des fluctuations aléatoires et celle d'éventuelles « tendances » au changement climatique. La longue période de sécheresse qu'a connu récemment le Sahel (15 à 17 ans selon les régions) peut-elle être considérée comme un « accident climatique » (aspect aléatoire) ou traduit-elle une évolution du climat vers une période plus sèche ?

De même, la variabilité interannuelle des précipitations est particulièrement forte en zone intertropicale : les saisons des pluies se suivent et ne ressemblent ni par leur durée, ni par leur intensité. Pour permettre aux agriculteurs de mettre en place des stratégies agricoles adaptées à la nature de la saison des pluies attendue, on se propose de prédire, avec quelques semaines ou quelques mois d'anticipation, le type de saison des pluies que l'on peut espérer pour l'année en cours.

• ACQUIS

• Analyse de l'évolution des climats

Des analyses de séries chronologiques ont été réalisées pour plusieurs stations de Sénégal, du Sénégal, du Burkina Faso, du Mali, du Niger pour lesquelles on dispose de données de pluies depuis le début de ce siècle (Albergel, 1985 ; Carbonnel, 1985 ; Olivry, 1983).

• Prédiction à court terme (quelques semaines)

En s'appuyant sur l'observation qu'un début précoce et intense de la saison des pluies en zone sahélienne, entraîne l'occurrence plus ou moins probable d'une saison des pluies plus abondante qu'elle n'est en médiane, une recherche de corrélations a permis d'évaluer les probabilités d'obtention ou de dépassement de certains seuils de précipitations annuelles à partir des mesures pluviométriques effectuées au cours des deux premiers mois de la saison des pluies. C'est ainsi qu'à Niamey, par exemple, en travaillant sur un échantillon de 73 ans de pluies mensuelles, on a pu établir qu'il y a 86 % de chances que la pluviométrie annuelle soit supérieure à 570 mm si les pluviométries des mois de mai et juin sont elles-mêmes supérieures à leurs médianes respectives : 23 et 74 mm (Franquin, 1984).

• Prédiction à moyen terme (quelques mois)

Une équipe de chercheurs, basée au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (France), et travaillant en collaboration avec la Météorologie Nationale, étudie les déplacements de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) sur l'Afrique de l'Ouest et le Golfe de Guinée, à partir de l'imagerie satellitaire disponible.

La précocité, la durée et l'intensité de la saison pluvieuse sur l'Afrique Sahélienne dépendent pour beaucoup des déplacements et de la position, à une date donnée, de la zone intertropicale de convergence.

Une bonne connaissance du déterminisme des déplacements de l'ITCZ devrait permettre une prédiction, à quel-

Balance taking into account various water reserves usable by the soil (Forest and Reyniers, 1985; Lhomme and Eldin, 1985).

— This type of zoning has been done in Costa Rica (Rojas, 1983), Jamaica, Bolivia, Cote d'Ivoire (Eldin, 1971, Forest and Valet, 1983), Brazil (Steinmetz, Forest and Reyniers, 1985) and Senegal (Dancette, 1983).

ANALYSIS OF WEATHER TRENDS AND SHORT - AND MEDIUM-TERM WEATHER FORECASTING

• OBJECTIVES

By analyzing chronological series of rainfall data, an effort is made to assess the random fluctuations and possible "trends" of climatic change. Should the long period of drought recently experienced by the Sahel (15 to 17 years depending on the region) be considered to be an "accident of weather" (random aspect) or does it reflect a shift in the climate toward a drier period?

Similarly, the year-to-year variability of precipitation is particularly acute in the intertropical zone: the rainy seasons come one after another but neither their lengths nor their intensities are comparable. In order to enable farmers to devise agricultural strategies suited to the nature of the anticipated rainy season, an effort is being made to predict, several weeks or months in advance, the type of rainy season that may be expected in the current year.

• ACHIEVEMENTS

• Analysis of climatic trends

Analysis of chronological series have been carried out for several stations in Senegal/Gambia, Senegal, Burkina Faso, Mali and Niger, for which rainfall data are available since the early part of this century (Albergel, 1985; Carbonnel, 1985; Olivry, 1983).

• Short-term forecasting (several weeks)

Based on the observation that an early and intense start of the rainy season in the Sahel region indicates the more or less likely occurrence of a rainy season more abundant than the norm, the analysis of correlations has made it possible to assess the probability of obtaining or exceeding certain thresholds for annual precipitation on the basis of rainfall measurements carried out during the first two months of the rainy season. Thus in Niamey, for example, working from a 73-year sample of monthly rainfall statistics, it has been possible to determine that there is an 86 per cent chance that annual rainfall will exceed 570 mm if the rainfall in May and June exceeds the respective monthly medians of 23 mm and 74 mm (Franquin, 1984).

• Medium-term forecasting (several months)

A team of researchers working out of the Center for Space Meteorology in Lannion, France, in cooperation with the National Weather Service is studying the movement of the intertropical convergence (ITCZ) in West Africa and the Gulf of Guinea using available satellite imagery.

The timing, duration and intensity of the rainy season in Sahelian Africa depend in large measure on the displacement and on the position on a given date of the intertropical convergence zone.

Accurate knowledge of what determines ITCZ displacement should make it possible to predict the type of rainy season that will occur several months in advance, and, as a consequence, to develop on a case-by-case basis the agricultural strategy that would appear to be most suitable. Encouraging results have already been obtained

ques mois, du type de saison des pluies qui va survenir et donc de développer dans chaque cas, la stratégie agricole paraissant la mieux adaptée. Des résultats encourageants sont déjà obtenus en ce qui concerne la prédiction des années anormalement sèches (formation insuffisante d'amas convectifs) (Citeau, 1986).

Études des relations eau-sol-plante-climat

• OBJECTIFS

Ces études, expérimentations et recherches, ont été conduites à l'échelle de la parcelle avec pour objectif de déterminer, pour chaque situation considérée, la meilleure utilisation possible de l'eau disponible en fonction des données du milieu physique, de la stratégie agricole, et du contexte économique et humain. Cette utilisation rationnelle de l'eau est variable selon le but visé : maximisation des rendements compte tenu des potentialités du milieu, optimisation économique des moyens investis, recherche d'une plus grande sécurité de production...

L'application opérationnelle de ces résultats, sous une forme plus globale et intégrée, intéresse le développement rural à l'échelle de grandes zones ou de grands périmètres homogènes.

• ACQUIS

- Caractérisation hydrique et hydrodynamique des sols

L'utilisation, depuis plus de 15 ans, de l'humidimètre à neutrons, du densitomètre gamma, de tensiomètres, a permis la mise au point d'une méthode simple et opérationnelle de mesures au champ des stocks et flux d'eau dans le sol, qui permet :

- la caractérisation hydrique et hydrodynamique des sols et la définition de leurs aptitudes à l'irrigation et/ou au drainage ;
- le suivi de l'alimentation hydrique des cultures ;
- la mise au point, en liaison avec les besoins en eau, d'avertissements à l'irrigation.

La caractérisation hydrique et hydrodynamique des principaux sols africains a été faite :

- sols sableux au Sénégal et en Libye ;
- sols ferrallitiques en Côte d'Ivoire et au Sénégal ;
- sols ferrugineux au Sénégal, Burkina Faso, Niger et Côte d'Ivoire ;
- sols andiques à La Réunion ;
- sols alluviaux delta du Sénégal, Algérie, etc.

Cette caractérisation porte sur la perméabilité, la conductivité hydraulique, la profondeur humectable et la réserve en eau utile de ces sols.

Les figures 2 et 3 donnent des exemples, par une représentation graphique de cette caractérisation hydrique et hydrodynamique pour 2 types de sols très différents de la Vallée du Fleuve Niger (terrasses de Sona-Lossa au Niger, S. Valet, 1980).

Cet important programme de caractérisation hydrique et hydrodynamique des sols a été mené en étroite collaboration avec :

- le Centre d'Études Nucléaires de Cadarache, pour la mise au point, le test puis la diffusion du matériel de mesure de l'humidité et de la densité des sols ;
- l'Institut de Mécanique de Grenoble (IMG) pour tout ce qui traite de la circulation de l'eau en milieu saturé ;
- l'Agence Internationale des Énergies Atomiques de Vienne (IAEA) qui a très souvent soutenu financièrement et techniquement ces études.

as regards the prediction of abnormally dry years (insufficient formation of convective masses) (Citeau, 1986).

Research water-soil-plant-climate relationships

• OBJECTIVES

These studies, experimentation and research have been conducted on the plot level with a view to determining, for each station considered, the best possible use of the available water in accordance with the data on the physical environment, the agricultural strategy and the economic and human circumstances. Such rational use of water varies depending on the aim sought: maximum yield given the environmental potential, economic optimization of the resources invested, search for greater production security.

The operational application of these results, in a more global and integrated manner, will interest the rural development on the scale of large homogeneous areas or perimeters.

• ACHIEVEMENTS

- Hydric and hydrodynamic characterization of soils

The use of the neutron humidimeter, the gamma densitometer, and of tensiometers for over 15 years has made it possible to devise a simple and operational method of taking field measurements of water stocks and flows within the soil which make it possible to:

- characterize the soil hydric and hydrodynamically and define its irrigability and/or drainage capacity;
- monitor the supply of water to crops;
- develop a system of irrigation alerts that take water requirements into account.

The major African soil types have been classified hydric and hydrodynamically as follows:

- sandy soils in Senegal and Libya;
- ferrallitic soils in Cote d'Ivoire and Senegal;
- ferruginous soils in Senegal, Burkina Faso, Niger and Côte d'Ivoire;
- andic soils in La Reunion;
- alluvial delta soils in Senegal, Algeria, etc.

This soil characterization is predicated on the permeability, water conductivity, irrigable depth and usable water reserves of the soils.

Figures 2 and 3 (from S. Valet, Niger, 1978) graphically represent examples of this hydric and hydrodynamic characterization for two vastly different types of soils from the Niger River valley (Sona-Lossa terraces in Niger).

This important program of hydric and hydrodynamic characterization of soils has been carried out in close cooperation with:

- the Cadarache Nuclear Research Center (CEA), for the development, testing and subsequent dissemination of soil humidity and density measurements equipment;
- the Grenoble Institute of Mechanics (IMG), for matters relating to the circulation of water in a saturated medium;
- the International Atomic Energy Agency, which has frequently supported this research financially and technically.

- Crop water supply and requirements

Results have been obtained as regards the effect of hydric, duration, intensity and variable frequency stresses on the hydric state of various varieties of rice (Bois, 1984).

A fundamental aspect of this research program involves water transfers and water efficiency in the soil-plant-

• Alimentation et besoins en eau des cultures

– Des résultats concernant l'effet de stress hydriques, de durée, d'intensité et de fréquence variables sur l'état hydrique de diverses variétés de riz ont été obtenus (Bois, 1984).

Ce programme de recherches comporte une partie fondamentale touchant aux transferts et à l'efficacité de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère. Il s'agit de travaux de physiologie des interactions plante-eau, réalisés au CEA de Cadarache dans le cadre d'un laboratoire commun CEA-CIRAD-ORSTOM et de travaux de terrain qui se déroulent en Côte d'Ivoire pour ce qui concerne le riz pluvial et qui démarrent au Niger pour ce qui concerne le mil.

– Les besoins en eau des principales cultures vivrières ont été mesurés en diverses stations agronomiques de l'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Niger, Haute Volta, Côte d'Ivoire, Mali...). La méthodologie employée consiste à déterminer, tout au long du cycle végétatif des cultures, le « coefficient cultural K » reliant les besoins en eau en conditions non limitantes et l'évaporation en bac normalisé, classe A. Exception faite pour les travaux fins de physiologie ou de génétique, la précision de cette méthodologie est très largement suffisante et la généralisation de cette méthode de détermination des besoins en eau basée sur l'utilisation des coefficients culturaux est en cours.

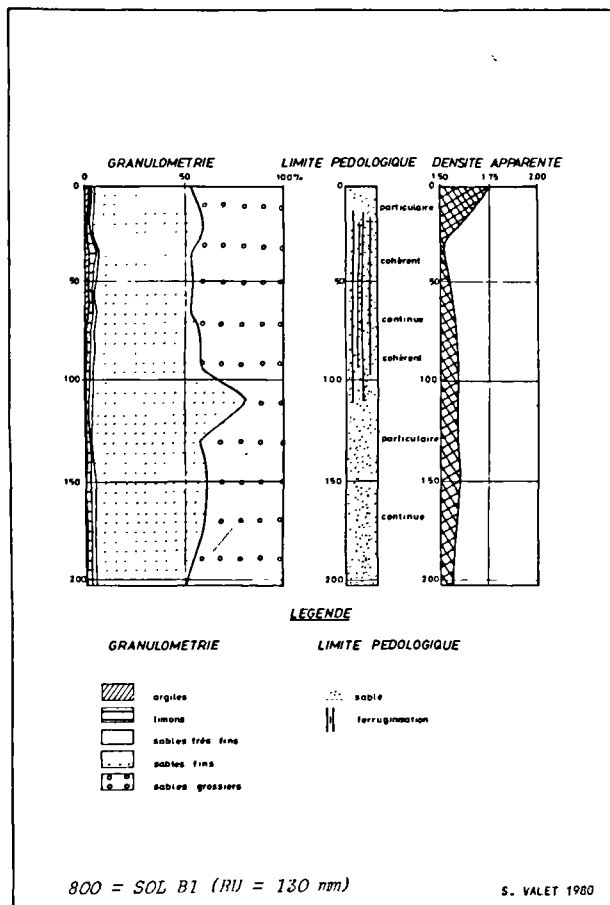


Fig. 1. Sona 800 - sol peu évolué
Sona 800 - little developed soil

atmosphere system. These water-plant interaction physiology studies were carried out by CEA in Cadarache in a common CEA-CIRAD-ORSTOM laboratory, with field work in Côte d'Ivoire as regards rainfed rice and initial studies in Niger on millet.

– The water requirements of the major food crops have been measured at various agricultural stations in West Africa (Senegal, Niger, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Mali). The methodology used consists in determining, throughout the crop's plant cycle, the "crop coefficient K" relating water requirements in non-limiting conditions to evaporation in a standardized Class A tank. Except for the delicate physiological and genetic aspects of the work, the precision of this methodology is largely sufficient, and the dissemination of this method for determining water requirements on the basis of using crop coefficients is now in progress.

Many studies have been carried out on crop water supply; these began at the Tarna station in Niger and the Mogtedo station in Burkina Faso, and then rapidly spread throughout the research infrastructure of North Africa (Algeria, High Cheliff), West Africa (Senegal, Niger, Burkina Faso, Côte d'Ivoire), the Antilles and La Reunion, and to cover almost all food crops (millet, sorghum, groundnuts, maize, rice, sugar cane, etc.) (Dancette, 1983; Kalms, 1982; Chardy, 1971; Chopart, 1974; Legoupil, 1974; Loynet, 1974).

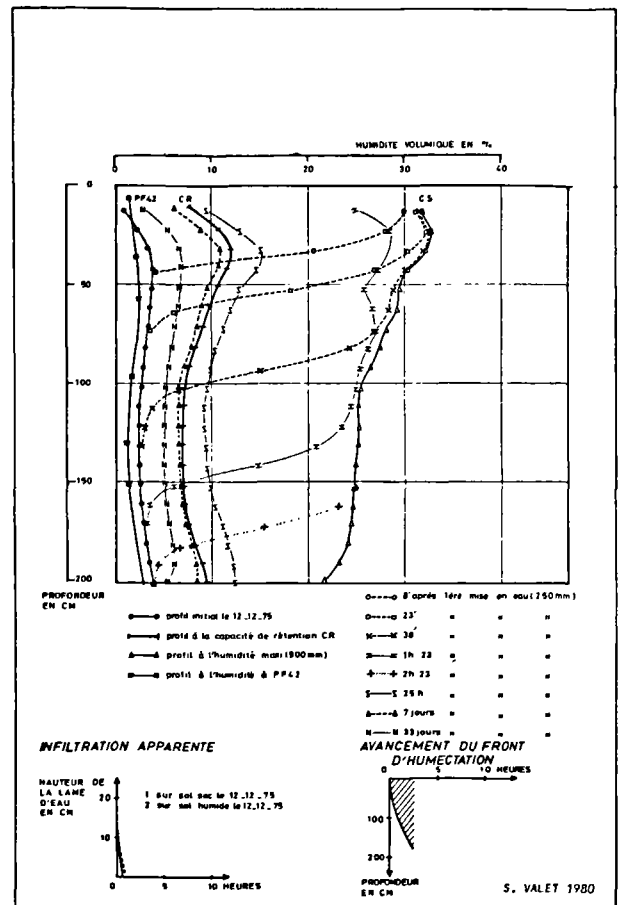


Fig. 2. Sona cinétique tube 800 - profils hydriques
Sona kinetic tube 800 - water profiles

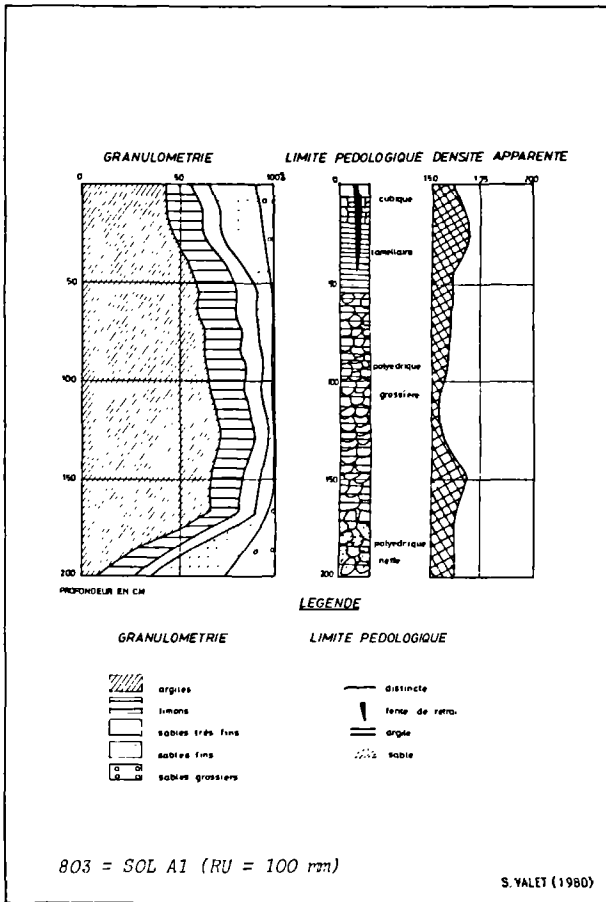


Fig. 3. Sona 803 - vertisol
Sona 803 - vertisol

De nombreux travaux ont été effectués sur l'alimentation en eau des cultures ; ils ont débuté sur les stations de Tarna au Niger et Mogtedo au Burkina Faso puis se sont rapidement généralisés sur l'ensemble du dispositif de recherches en Afrique du Nord (Algérie, Haut Cheliff), en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Niger, Burkina Faso, Côte d'Ivoire), aux Antilles (Réunion, etc.) et sur la quasi totalité des cultures vivrières (mil, sorgho, arachide, maïs, riz, canne à sucre, etc.) (Dancette, 1983 ; Kalms, 1982 ; Charoy, 1971 ; Chopart, 1974 ; Legoupil, 1974 ; Loy-net, 1974...).

La méthodologie d'estimation et mesure de l'alimentation hydrique des cultures a beaucoup évolué au cours des dernières années, passant des évapotranspiromètres au bilan hydrique in situ par humidimètre à neutrons et tensiomètres puis au bilan énergétique climatique. On peut, à ce propos, affirmer que ces méthodes ne sont pas exclusives l'une de l'autre et que leur application est très largement fonction des conditions de l'environnement et de la finalité recherchée.

Pour réaliser ce programme, on a très rapidement (1968) mis en œuvre une politique de coopération scientifique avec d'autres organismes de recherche, d'enseignement ou de développement : le CEA (Centre d'Étude Atomique) de Cadarache • l'Institut de Mécanique de Grenoble • l'Institut National de la Recherche Agronomique, stations de Montfavet, Versailles, Toulouse • les compagnies Nationales d'Aménagements du Sud de la

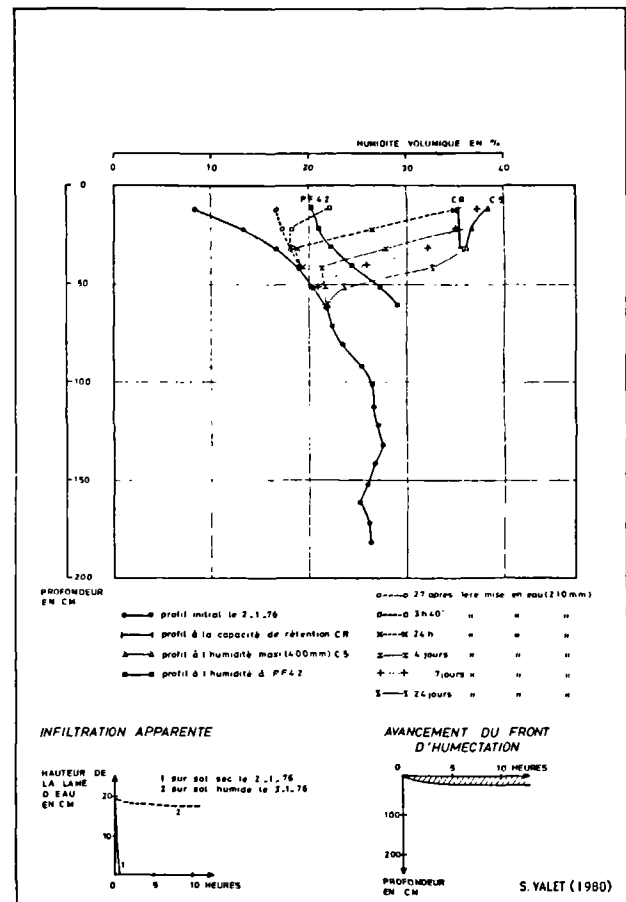


Fig. 4. Sona cinétique tube 803 - profils hydriques
Sona kinetic tube 803 : water profiles

The methodology for estimating and measuring the water supply to crops has evolved a great deal in recent years, shifting from evapotranspirometers, to the water balance on site, to neutron humidimeters and tensiometers, and then to the climatic energy balance. In this regard, it may be noted that these methods are not mutually exclusive and that application of them depends largely on environmental conditions and the aim pursued.

To carry out this program, a scientific cooperation policy was very rapidly set up (1968) with other research, educational or development agencies: Cadarache CEA (Nuclear Research Center) • Grenoble Institute of Mechanics • National Institute for Agricultural Research-Montfavet, Versailles and Toulouse stations the National Companies for the Development of Southern France (CNABRL, SCP, etc.) • WMO (World Meteorological Organization) • IAEA (International Atomic Energy Agency), Vienna, etc.

Cooperation was also established with a number of US universities, generally resulting in visits by young American engineers at the French stations for purposes of conducting doctoral research.

In several stations in North Africa and West Africa, the measurements of water requirements and water supplies of crops and the characterizations of soils have made it possible to move ahead with research on determining the plant cycle phases which are particularly sensitive to water shortages. Accordingly, water response curves

France (CNABRL, SCP...) • l'OMM (Organisation Mondiale de Météorologie) • l'AIEA (Agence Internationale des Études Atomiques) de Vienne • etc.

Une collaboration a été aussi mise en œuvre avec quelques universités américaines, se traduisant le plus souvent par l'accueil de jeunes ingénieurs américains sur les stations françaises en vue de la préparation d'une thèse.

Les mesures de besoins et d'alimentation en eau des cultures, les caractérisations hydriques des sols, ont permis, dans quelques stations d'Afrique du Nord et d'Afrique de l'Ouest, de pousser plus loin les recherches sur la détermination des phases végétatives particulièrement sensibles à un déficit d'alimentation hydrique. C'est ainsi que des courbes de réponse à l'eau ont pu être définies pour les principales cultures permettant ainsi de fixer pour chacune des cultures les différents seuils critiques d'alimentation hydrique.

On dispose ainsi actuellement, en complément du fichier opérationnel pluviométrique, d'un fichier coefficient culturaux $K = \text{ETM/EY}$ bac classe A, d'un fichier évaporation bac classe A et d'un fichier alimentation hydrique en conditions pluviales diverses, qui sont très utiles pour les études de modélisation des relations eau-sol-plante (Bilan hydrique).

Modélisation des relations eau-sol-plante-atmosphère

Les conditions pluviométriques en régions tropicales sont déterminantes. La température, l'état hygrométrique de l'air, le statut hydrique du sol varient au gré des séquences sèches ou pluvieuses et les cultures réagissent différemment en fonction des conditions spécifiques de l'environnement et de leurs aptitudes physiologiques.

La caractérisation à un instant donné d'une relation complexe eau-sol-plante-climat suppose l'appréhension et la mesure des variables, pluviométrie, évapotranspiration, réserve en eau du sol, enracinement, etc., ainsi que la prise en considération de la réalité agricole pour ce qui concerne le travail du sol, la date de semis, etc.

Si l'ensemble de ces mesures nécessaires pour caractériser une situation hydrique peut s'envisager ponctuellement, la généralisation de cette approche ne peut se faire que par la modélisation. C'est l'approche qu'a choisi de privilégier la recherche pour valoriser, au service de l'agriculture, les acquis importants de la recherche agronomique (Lhomme, Eldin, 1985).

Afin d'intégrer en quelques variables significatives pour la production au niveau de la parcelle, les multiples paramètres qui conditionnent l'utilisation par la plante de l'offre en eau, un modèle informatique de simulation du bilan hydrique a été mis au point et testé avec succès en de nombreuses localités (Forest, 1982). Ce modèle, conçu à partir de l'important référentiel technique et scientifique de la recherche agronomique tropicale, est un véritable outil d'analyse, de diagnostic et de décision. Basé sur l'équation du bilan hydrique suivante : $(P - \text{RUI} - \text{DR} - \text{ETR} + I \pm R \text{ SOL} = 0)$ où P = pluie ; RUI = ruissellement ; DR = drainage ; ETR = évapotranspiration réelle ; I = irrigation ; R = variation du stock d'eau du sol.

Ce modèle permet, à partir des données simples climatiques, physiologiques et agronomiques, le calcul des différents termes du bilan hydrique et d'une variable synthétique permettant une approche agronomique opérationnelle : un taux de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM).

Pour certaines cultures, en particulier les céréales tropicales (riz pluvial, maïs, sorgho...), une relation fiable a pu

être déterminée pour les principales cultures, making it possible to identify different critical water supply thresholds for each crop.

At present, therefore, we have access not only to the operational file on rainfall, but a file of crop coefficients $K = \text{ETM/EY}$ Class A tank evaporation file, and a file on water supply in various rainfall conditions, which are of great value for modelling water-soil-plant relationships (water budget).

• Modelling of water-soil-plant-atmosphere relationships

Rainfall conditions in tropical regions are decisive. The temperature, the hygrometric status of the air, and the hydric condition of the soil vary with the dry or rainy seasons, and crops react differently depending upon specific environmental conditions and their physiological capabilities.

Characterization of a complex water-soil-plant-climate relationship at a given moment presupposes the identification and measurement of the variables of rainfall, evapotranspiration, ground water reserves, root status, etc., as well as consideration of the agricultural realities as regards plowing, the timing of sowing, etc.

While all these measurements required to characterize a hydric situation can be envisaged in detail, use of this approach on a widespread basis can only be done via modelling. This is the approach to which researchers have opted to devote the most attention in order to derive the maximum advantages for agriculture from the important achievements of agricultural research (Lhomme, Eldin, 1985).

In order to reflect in just a few variables of significance for production at the plot level the many parameters which condition the use of the available water by the plant, a computer simulation model of the water budget has been developed and tested successfully in many localities (Forest, 1982). This model, conceived on the basis of the sizable technical and scientific reference base provided by tropical agricultural research, is a veritable analytical, diagnostic and decision-making tool that is based upon the following equation for the water budget: $(R - \text{RUN} = \text{DR} - \text{ETR} + I \pm \text{RSOIL} = 0)$ where R = rainfall; RUN = runoff; DR = drainage; ETR = real evapotranspiration; I = irrigation; and RSOIL = changes in the ground water supply.

This model makes it possible, on the basis of simple climatic, physiological and agronomical data, to calculate the various terms of the water budget and of a synthetic variable that makes it possible to take an operational agricultural approach: namely a ratio of satisfaction of water requirements (ETR/ETM).

For some crops, in particular tropical crops (rainfed rice, maize, sorghum), a low ratio could be established between the index of water requirement satisfaction and productivity. This is an essential knowledge gain for orienting agricultural development toward optimizing production in terms of rainfall.

On a regional scale, modelling of the water budget makes it possible to make recommendations as regards techniques and plant varieties.

Finally, the method is a valuable tool for orienting disciplinary research in areas such as plant improvement, plowing, etc.

There have already been many applications of this water budget modelling. Noteworthy among these are:

— agro-pedo-climatic zoning for suitability for rainfed rice

être établie entre indice de satisfaction hydrique et productivité. Il s'agit là d'un acquis essentiel pour conseiller le développement agricole pour l'optimisation des productions en fonction de la pluviométrie.

A l'échelle d'une région, la modélisation du bilan hydrique permet d'établir des recommandations de techniques et de variétés. C'est enfin, un outil performant pour l'orientation des recherches disciplinaires telles que : amélioration des plantes, travail du sol, etc.

Les applications de cette modélisation du bilan hydrique sont déjà nombreuses ; on peut citer :

- le zonage agro-pédo-climatique pour l'aptitude à la culture du riz pluvial en Côte d'Ivoire et au Brésil ;
- programmation, au Brésil, de la recherche en vue de l'amélioration de la réserve en eau disponible pour les racines (variétés et techniques culturales) ;
- conseils aux producteurs pour les dates de semis (région de Goiás au Brésil pour le riz) (Steinmetz, Forest, Reyniers, 1985) ;
- analyse des jours disponibles pour les travaux agricoles en fonction de la pluviométrie (Baron, 1985) ;
- pilotage prévisionnel de l'irrigation de complément en saison des pluies (Forest, Sabatier, 1985) ;
- pilotage de l'irrigation dans les périmètres agro-industriels (sucriers ou céréaliers...) (Forest, Goze, 1985) ;
- appui à l'analyse et à l'interprétation des images satellitaires (Fréteaud, Assad, 1985).

Ce programme de recherche pour la *modélisation des relations eau-sol-plante-climat* est conduit en étroite coopération avec :

– l'AGRHYMET (CILSS) de Niamey, – l'OMM de Genève par le biais des projets agrométéorologiques pilotes en Afrique de l'Ouest, – le CNES (Centre d'Études Spatiales de Toulouse, France), – l'INRA, – les différentes institutions nationales de recherche agronomique.

• Adaptation des cultures aux conditions d'alimentation hydrique

La Recherche Agronomique Tropicale dispose d'un acquis important sur l'adaptation des cultures aux conditions de sécheresse et aux conditions d'irrigation.

– Adaptation aux conditions de sécheresse

Du fait d'une approche pluridisciplinaire les travaux de sélection les plus complets sur la résistance à la sécheresse ont porté sur le riz pluvial (Bois, Conchat, Montronnet, 1984). Les variétés IRAT 10, IRAT 13, IRAT 104 ont ainsi été sélectionnées et diffusées pour leur tolérance à la sécheresse. Pour les autres cultures (sorgho, maïs, arachide), on dispose également de variétés bien adaptées aux conditions de sécheresse du fait de leur sélection en conditions naturelles limitantes (Reyniers et al., 1982).

Un acquis important concerne les mécanismes de tolérance à la sécheresse et la méthodologie d'identification et d'établissement des critères de sélection pour la résistance à la sécheresse en fonction du milieu édaphoclimatiques. L'importance de la profondeur d'enracinement a été mise en évidence grâce à la mise au point d'une méthodologie de criblage variétal utilisant les traceurs radioactifs (Reyniers et al., 1979).

– Adaptation à l'irrigation

Toute étude des problèmes posés par l'économie de l'eau, ne peut être séparée des recherches phytotechniques. L'étude du matériel végétal existant et la sélection d'un matériel à haute potentialité sont en cours de réalisation afin de rentabiliser au mieux l'irrigation. Ce programme d'évaluation et de sélection variétale est conduit

en Côte d'Ivoire and Brazil;

– in Brazil, the scheduling of research with a view to improving the water reserve available for roots (crop varieties and techniques);

– advice to producers on sowing times (Goiás region in Brazil for rice) (Steinmetz, Forest and Reyniers, 1985);

– analysis of days available for agricultural work depending on rainfall (Baron, 1985);

– forecasting guidance for supplementary irrigation in the rainy season (Forest and Sabatier, 1985);

– coordination of irrigation in agroindustrial perimeters (sugar or cereal grain plantations) (Forest and Goze, 1985);

– support for the analysis and interpretation of satellite images (Fréteaud and Assad, 1985).

This research program for *the modelling of water-soil-plant-climate relationships* is carried out in close cooperation with:

– AGRHYMET (CILSS), Niamey – WMO, Geneva, through pilot agrometeorological projects in West Africa
– CNES (Center for Space Research), Toulouse, France
– INRA – various national agricultural research institutions.

• Adaptation of crops to water supply conditions

Tropical agricultural research has made significant strides as regards adapting crops to drought conditions and irrigation conditions.

– Adaptation to drought conditions

Thanks to a multidisciplinary approach, the most thorough possible selection process was carried out for drought resistance of rainfed rice (Bois, Conchat, Montronnet, 1984). IRAT 10, IRAT 13 and IRAT 104 varieties were thus selected and distributed owing to their tolerance to drought conditions. For the other crops (sorghum, maize, groundnuts), varieties that are well-adapted to drought conditions are also available owing to their selection in constraining natural conditions (Reyniers et al., 1982).

One important achievement relates to drought tolerance mechanisms and the methodology for identifying and defining the selection criteria for drought resistance as a function of the edaphoclimatic environment of a varietal screening methodology that uses radioactive tracers (Reyniers et al., 1979).

– Adaptation to irrigation

Any study of the problems raised by water conservation cannot disregard phytotechnical research. Study of the existing plant stock and the selection of a high potential plant variety is now under way with a view to taking maximum advantage of irrigation. This program of varietal evaluation and selection is being carried out in Niger and Senegal; it has already made it possible to determine varieties of the principal food crops that are perfectly suited to irrigation.

Example: IRAT 204 sorghum (stock): 70 quintals/ha at station • Argence or Aralba sorghum (hybrid): 40 quintals/ha in rural environment • IRAT81-IRAT 178 maize (hybrid): 116 quintals/ha potential, and 70 quintals/ha in rural environment.

au Niger et au Sénégal ; il permet, d'ores et déjà, de disposer pour les principales espèces vivrières, de variétés répondant parfaitement à l'irrigation.

Exemple : le sorgho IRAT 204 (lignée) : 70 qx/ha en station • le sorgho Argence ou Aralba (hybride) : 40 qx/ha en milieu paysan • le maïs IRAT 81 – IRAT 178 (hybride) : 115 qx/ha potentialité et 70 qx/ha en milieu paysan •

Irrigation : une technique contre-aléatoire de la pluviométrie

Les difficultés actuelles de l'économie rurale en zones sahélienne et soudano-sahélienne et les échecs relatifs des plans d'action basés sur une trop rapide intensification des systèmes de cultures ont amené la recherche agronomique à s'interroger sur les alternatives raisonnablement envisageables pour une amélioration du bilan vivrier en Afrique de l'Ouest.

L'analyse des difficultés de fonctionnement des aménagements hydroagricoles existants a conduit à raisonner l'irrigation non plus en terme de rendements maxima, mais plutôt en terme de sécurisation des rendements par la pratique d'apports d'eau venant en complément et en contre-aléas de la pluviométrie. Cette irrigation complémentaire de sécurisation est alors envisagée dans l'exploitation agricole traditionnelle comme un facteur d'intensification progressif du système de production et suppose :

- la mise à disposition des producteurs, des espèces et variétés valorisant l'irrigation,
- une gestion stricte d'une ressource en eau qui (souterraine ou de surface) est quantitativement souvent très limitée,
- l'utilisation d'une technologie d'irrigation peu coûteuse adaptée à cet objectif de sécurisation des cultures vivrières par l'irrigation complémentaire de la pluie.

Un programme de recherche sur les méthodes et techniques d'irrigation dans l'objectif d'améliorer l'efficacité des techniques classiques gravitaires d'irrigation est en cours depuis 1962. Ces expérimentations ont essentiellement porté sur :

LES TECHNIQUES ET MÉTHODES D'IRRIGATION

- La définition des normes de l'irrigation gravitaire en fonction des caractéristiques physiques du sol : Tarna, Mogtedo, 1962-1968 ; Lossa (Niger), 1980-1986.
- les tests agroéconomiques de différents systèmes de pompage et de distribution de l'eau (goutte-à-goutte, aspersion, pompage solaire, pompage thermique...) (Bambey, Sénégal, 1974-1980) (T.M. Duc, 1980)
- la mise au point de techniques et méthodes d'irrigation en utilisant des eaux salées (Algérie, Bambey, Sénégal) (Legoupil, 1974 ; Duc, 1980)
- l'influence des conditions climatiques (vent...) sur la répartition et l'efficacité de la distribution par aspersion.

IRRIGATION ET ÉNERGIE

Parmi les charges récurrentes liées à l'irrigation, le poste énergie est le plus lourd. Un programme de recherches a été mis en place (Niger : Losse ; Burkina Faso : Saria ; Sénégal : Bambey) pour valoriser énergétiquement les ressources du milieu (soleil, vent, biomasse). C'est dans le domaine de la biomasse que les résultats les plus probants ont été obtenus :

- Coût du Kw produit pratiquement équivalent à celui du

Irrigation as a rainfall counter-risk technique

The current problems of the rural economy in the Sahelian and Sudano-Sahelian zones and the relative failures of action plans based on excessively rapid intensification of the crop farming systems have caused agricultural researchers to question the reasonably conceivable alternatives for an improvement of the food crop assortment in West Africa.

Analysis of the operational problems of existing hydroagricultural developments has led to consideration of irrigation no longer in terms of maximum yields, but instead in terms of ensuring yields by the provision of water to supplement and counteract unpredictable rainfall levels. This supplementary safeguard irrigation is then considered within the framework of traditional agricultural activity as a factor for the gradual intensification of the production system. It presupposes the following:

- the availability of farmers, species and varieties that take advantage of irrigation;
- strict management of a water resource which, whether underground or on the surface, is often quite limited quantitatively;
- use of an inexpensive irrigation technology adapted to the objective of safeguarding food crops through irrigation to supplement rainfall.

A program of research on irrigation methods and techniques from the standpoint of improving the efficiency of conventional gravity powered irrigation techniques has been under way since 1962. This experimentation has been focused primarily on :

IRRIGATION METHODS AND TECHNIQUES

- definition of gravity irrigation standards in accordance with the physical characteristics of the soil (Tarna and Mogtedo, 1962-1968; Lossa, Niger, 1980-1986);
- agro-economic tests of various water pumping and distribution systems (trickle, sprinkling, solar pumping, thermal pumping, etc.) (Bambey, Senegal, 1974-1980) (T.M. Duc, 1980);
- development of irrigation techniques and methods making use of salt water (Algeria; Bambey, Senegal) (Legoupil, 1974; Duc, 1980);
- the influence of climatic conditions (wind, etc.) on the coverage and efficiency of distribution by sprinkling.

IRRIGATION AND ENERGY

Among the recurrent costs associated with irrigation, energy is the most onerous. A research program has been initiated (Lossa, Niger; Saria, Burkina Faso; Bambey, Senegal) to energetically take advantage of environmental energy sources (sun, wind, biomass). The most telling results have been achieved in the area of biomass:

- the cost per kilowatt is virtually identical to that of fuel oil, with a higher initial investment (taking into account the still experimental nature of the equipment) but with operating costs on the order of one tenth those for diesel. The experimental stage is now clearly in the past, both in the case of gas generators and of biogas digesters. Their threshold of application has also been clearly defined:
 - small rice perimeters (20-40 ha) for gas generators;
 - small food crop-truck garden perimeters (5-10 ha) within a system which associates agriculture and stock farming for biogas.

It bears noting that biogas has now to move into the testing phase in a real environment. The technical base

fuel avec un investissement initial supérieur (compte tenu du caractère encore expérimental des installations), mais avec des charges de fonctionnement de l'ordre du dixième du fuel. Le stade expérimental est aujourd'hui nettement dépassé que ce soit pour les gazogènes ou les digesteurs biogaz. Leur créneau d'application est de même nettement défini :

- petits périmètres rizicoles (20 à 40 ha) pour les gazogènes ;
- petits périmètres vivriers-maraîchers (50 à 10 ha) insérés dans un système associant agriculture et élevage pour le biogaz.

On notera que pour le biogaz, il s'agit, maintenant, de passer à la phase-test en milieu réel ; le référentiel technique dont on dispose étant particulièrement complet à tous les niveaux :

- Technologie de fermentation : 2 types de fermenteurs : le type discontinu et le type continu Transpaille (brevet IRAT) ont été testés avec succès et permettent de traiter des substrats pailleux (Forest, Farinet, 1984).
- Systèmes de cultures et d'élevage associés au Biogaz. Trois périmètres expérimentaux fonctionnent depuis 1 à 3 ans au Sénégal (Bambey), Niger (Lossa) et Burkina Faso (Saria).
- Matériel d'utilisation du Biogaz : test de moteurs adaptés à l'utilisation du Biogaz.

IRRIGATION ET SYSTÈMES DE CULTURES

Parallèlement aux recherches thématiques de base, un certain nombre de recherches ont été mises en place en vue d'élaborer des systèmes de production vulgarisables et définir, avec le paysannat, des modèles d'exploitation. Il est évident que les résultats obtenus dans ce domaine à Lossa et Tarna au Niger, à Bambey et N'Diol au Sénégal, ne sont pas transposables partout dans la totalité de leurs modalités et qu'ils devront être ajustés et complétés en fonction des contextes édaphiques et socio-économiques. Ils n'en constituent pas moins un référentiel technique important qui, de façon générale, permet :

- de déterminer les cultures et les variétés les mieux adaptées aux conditions du milieu, aux exigences de la rotation, à la capacité de la force de travail et aux opportunités du marché ;
- d'établir, de façon précise, le meilleur itinéraire technique pour chacune des cultures (nature des opérations culturales, niveau des inputs, besoins en eau d'irrigation, etc.) ;
- d'enregistrer les temps de travaux et de traction pour chacune des opérations culturales ;
- de proposer des variantes de rotation (Desselas, Duc, 1983).

Ce référentiel formé à partir des résultats expérimentaux a servi de base technique, qualitative et quantitative pour l'étude comparée des systèmes de cultures permettant de valoriser des disponibilités variables en eau, c'est-à-dire qu'à partir d'une part des données culturales et économiques disponibles et des ressources en eau mobilisables d'autre part, on peut apprécier maintenant l'intérêt des cultures du point de vue :

- de la rentabilité financière de la culture en calculant le ratio : marge brute par ha ;
- de la valorisation des ressources en eau d'irrigation en calculant le ratio : marge brute par m³ d'eau d'irrigation ;
- de la valorisation de la main-d'œuvre, en calculant le ratio : marge brute par heure de travail consacrée à la culture.

available is particularly sound at all levels:

- fermentation technology: 2 types of fermenters: the discontinuous type and the continuous type by Transpaille (IRAT patent) have been successfully tested and make it possible to treat straw-based substances (Forest and Farinet, 1984);
- crop and stock farming systems associated with biogas. Three experimental perimeters have been in operation for 1 to 3 years in Senegal (Bambey), Niger (Lossa) and Burkina Faso (Saria);
- equipment for use of biogas: testing of motors adapted for using biogas.

IRRIGATION AND CROP SYSTEMS

Alongside the basic thematic research, a number of research efforts have been initiated with a view to developing production systems suitable for dissemination and defining operational models with the help of farmers themselves. It is obvious that the results obtained in this regard at Lossa and Tarna, Niger, and at Bambey and N'Diol, Senegal, cannot be disseminated everywhere and in every respect, and that they will have to be adjusted and supplemented in light of the edaphic and socioeconomic circumstances. They nevertheless constitute an important technical reference base which, generally speaking, makes it possible to:

- identify the crops and varieties that are best suited to the environmental conditions, the requirements of plant rotation, the capacity of the labor force and market opportunities;
- establish precisely the best technical path to be followed for each crops (nature of farming operations, level of inputs, irrigation requirements, etc.);
- record working time and plowing time for each farm operation;
- propose variant crop rotation arrangements (Desselas and Duc, 1983).

This reference base established from experimental results has been used as the technical, qualitative and quantitative background for the comparative study of crop systems that make it possible to take advantage of variable water supply. In other words, based on the crop information and economic data available, on the one hand, and on resources in usable water on the other hand, it is possible now to assess the merits of irrigated crops from the standpoint of:

- the financial rate of return of the crop, by calculating the gross margin per hectare;
- the optimal use of irrigation water resources, by calculating the ratio of gross margin to square meter of irrigated land;
- the optimal use of labor, by calculating the ratio of gross margin to hour of agricultural labor.

Conclusion sur les acquis : les produits de la recherche actuellement proposés au développement

1. Analyse du risque pluviométrique à partir d'une base de données climatologiques opérationnelles.

2. Modélisation des relations production-climat (simulation du bilan hydrique) pour :

- l'appui à la recherche,
- l'identification des contraintes à la production,
- contribution à l'orientation des projets de développement.

3. Méthode de zonage agro-pédo-climatique pour l'étude de faisabilité de systèmes de production en fonction de différentes hypothèses d'environnement et de moyens.

4. Définition de potentialités et contraintes des sols par leur caractérisation hydrique et hydrodynamique (niveau parcelle et niveau bassin versant).

5. Mise à disposition du développement de la base de données, besoins en eau des principales cultures vivrières tropicales :

- mil, niébé, arachide, sorgho, maïs, canne à sucre, coton, cultures maraichères.

6. Test et mise à l'épreuve, en milieu paysan, de variétés, à haute potentialité valorisant l'irrigation : ex : Sorgho IRAT 204 – Maïs IRAT 81 – IRAT 178, etc.

7. Sécurisation des productions vivrières par l'irrigation de complément et la partie hydraulique agricole en milieu paysan.

8. Minimisation des coûts de production : énergie et fertilisant par le développement de la filière irrigation-biogaz-compost.

9. Appui technique aux opérations de mise en valeur hydro-agricole pour ajuster, en permanence, le référentiel technique à l'environnement agro-économique, et promouvoir les organisations de producteurs capables de gérer eux-mêmes l'innovation.

10. Proposition d'outils pratiques d'aide à la décision :

- avertissement agrométéorologique,
- avertissement à l'irrigation – pilotage,
- optimisation des équipements agricoles en fonction des objectifs économiques et des moyens disponibles.

11. Proposition de techniques de culture hydroponiques hors sol pour la production légumière sous serre et abri.

Conclusion on achievements: research gains that may now be proposed for development

1. Analysis of rainfall risk using an operational climatological data base.

2. Modelling of production-climate relationships (simulation of water budget) for:

- support of research
- identification of production constraints;
- contribution to orientation of development projects.

3. Method of agropedoclimatic zoning for feasibility studies on production systems in light of various environmental and resource assumptions.

4. Definition of soil potential and constraints on the basis of hydric characterization and hydrodynamic characterization (plot and catchment level).

5. Availability of the expanded data base, water requirements of the principal tropical food crops:

- millet, cowpea, groundnut, sorghum, maize, sugar cane, cotton, market garden crops.

6. Test and practical introduction in rural areas of high potential varieties that take full advantage of irrigation, e.g. IRAT 204 sorghum, IRAT 81 maize, IRAT 178 maize, etc.

7. Safeguarding of food crop production through supplementary irrigation and the role of agricultural water in the rural environment.

8. Minimization of production costs: energy and fertilizer through the development of the irrigation-biogaz-compost chain.

9. Technical support for operations to develop hydroagricultural systems to permanently adapt the technical reference base to the agro-economic environment, and to promote producer organization that are able to manage innovation themselves.

10. Proposal of practical tools for use in decision making:

- agrometeorological warning systems;
- irrigation monitoring;
- optimization of agricultural equipment in light of economic objectives and resources available.

11. Proposal of hydroponic above-ground farming techniques for the production of vegetables in greenhouses and shelters.

Le potentiel de recherche

Le dispositif de terrain

Ne sont comptabilisés ici que les chercheurs qui, au titre de la coopération française, œuvrent le plus souvent au sein des organismes nationaux de recherches agronomiques.

LE DISPOSITIF CIRAD

THEME	ZONE	FRANCE	SAHELIENNE	SOUDANO-SAHEL	SOUDAN-GUINEE GUINEENNE	TOTAL
Agroclimatologie Agrométéorologie Eau-Sol-Pite-Climat		3	Sénégal 1 Institut du Sahel 1 Aghrymet 1	Burkina 1 Mali 1 Guadeloupe 1	La Réunion 2 Côte d'Ivoire 2 Brésil 1 Nicaragua 1	15
Amélioration résist. à la sécheresse		1	Sénégal 2	Burkina 1	Côte d'Ivoire 2	6
Aménagements B.Y., Bas-fonds			Vénézuela 1	Sénégal 1 Burkina 1	Côte d'Ivoire 1	
Irrigation Petite hydraulique		3	Mauritanie 1 Niger 3 Sénégal 2	Burkina 1 Guadeloupe 1 Mali 1	La Réunion 1 Martinique 1	25
Grands aménagements hydro-agricoles			Cameroun 1 Sénégal 2		Côte d'Ivoire 2 Madagascar 1	
TOTAL		7	15	10	14	46

Le rôle de la cellule France est essentiellement un rôle d'animation coordination des actions de recherche conduites Outre-Mer, de mise au point de logiciels informatiques et de formation de stagiaires et thésards et enfin d'interface avec les autres organismes de recherche français et internationaux collaborant aux actions de terrain.

LE DISPOSITIF ORSTOM

THEME	ZONE	FRANCE	ZONE ARIDE	ZONE SEMI-ARIDE	ZONE SEMI-HUMIDE	TOTAL
Agroclimatologie Agrométéorologie Eau/Sol/Plante		2	Niger 2 Brésil 6	Bolivie 3	Togo 1 Nicaragua 3	17
Amélioration de la résistance à la sécheresse		1	Niger 2		Côte d'Ivoire 1	4
Aménagements B.Y. - Bas-fonds		3	Sénégal 4 Burkina 2 Tunisie 1		Côte d'Ivoire 5	15
TOTAL		6	17		10	36

Research potential

In the field

The figures below reflect only those researchers who, as part of French technical assistance, are most frequently working within national agricultural research agencies.

CIRAD TEAM

The role of the France unit is largely to orient and coordinate the research efforts carried out abroad, to develop computer programs and train interns and graduate students, and finally with other French and international research organizations cooperating with efforts in the fields.

ORSTOM TEAM

Collaborations avec les autres organismes de recherche

ORGANISMES FRANÇAIS

- CEA (Centre d'Étude Atomique) de Cadarache • avec lequel une coopération étroite a été mise en œuvre depuis 1966 tant dans le domaine de la caractérisation hydrique et hydrodynamique des sols que dans l'étude des relations eau-sol-plante-atmosphère et la photosynthèse.
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique • Des appuis scientifiques, conseils méthodologiques, accueil de stagiaires sont apportés par l'IMG, le CEPE en particulier. Participation également à des programmes thématiques coordonnés par ce centre. Les thèmes principaux de collaboration portent sur les bilans hydriques mesurés dans les sols, la transpiration des plantes, l'étude de l'évolution du climat au SAHEL.
- INRA : Institut National de la Recherche Agronomique • Des chercheurs de cet Institut ont des programmes communs avec le CIRAD et l'ORSTOM, en particulier sur l'utilisation de la télédétection (INRA, Avignon).

En matière d'études racinaires et de relation eau-sol-plante, l'INRA Toulouse apporte un appui méthodologique.

- CNES : Centre National d'Études Spatiales • Le LERTS du CNES collabore sur l'utilisation de la télédétection pour évaluer les termes du bilan hydrique au Sénégal.
- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- GERSAR : Groupement d'Études et de Réalisations de Sociétés d'Aménagement Régional • Ces deux institutions ont passé un accord avec le CIRAD pour exploiter, en vue de la petite irrigation, les eaux souterraines en Afrique au Sud du Sahara.
- SOMDIA : Société d'Organisation, Management, des Industries Alimentaires Agricoles • Le CIRAD et la SOMDIA ont créé un groupement Agriforce pour la diffusion en milieu rural de la filière Biogaz-Compost-Transpaille dont l'objectif est de mettre à la disposition des populations rurales une énergie renouvelable et un résidu organique permettant la restauration des sols.
- AGROPOLIS • A Montpellier, s'est constitué un groupement, AGROPOLIS, formé de différentes institutions de recherche et d'enseignement. L'ORSTOM et le CIRAD, qui en font partie, collaborent avec les autres membres, en particulier dans le domaine de la formation.

ORGANISMES ÉTRANGERS

Instituts Nationaux de Recherches • Sociétés de Développement Africain • Toutes les actions de terrains sont basées sur des programmes conjoints avec les institutions nationales : ISRA, IBRAZ, INRAN, IER, IDESSA, etc.

En matière de Recherche-Développement, des collaborations sont établies avec les sociétés de développement.

- AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) • Cette agence appuie nos programmes financièrement, scientifiquement et techniquement au Sénégal et en Côte d'Ivoire.
- OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie)
- Programme conjoint agrométéorologie (Mali, etc.).
- EMBRAPA (Recherche Agronomique Brésil) • Échange de chercheurs, programme conjoint.
- ICRISAT • Pas de relation malgré une complémentarité possible : coopération soumise à un accord-cadre précis.
- IIMI (International Institute for the Management of the Irrigation) • Institut en cours de création. Liaisons amorcées.

Cooperation with other research agencies

FRENCH AGENCIES

- CEA: Cadarache Nuclear Research Center • Close cooperation has been carried out since 1966 with this center, in the field of hydric and hydrodynamic characterization of soils as well as for the study of water-soil-plant relationships and photosynthesis.
- CNRS: National Center for Scientific Research • Scientific support, methodological advice, and intern training are provided by IMG and CEPE in particular. Also participation in topic-oriented programs coordinated by this center. The principal areas of cooperation involve the water budget as measured in the soil, plant transpiration, and study of climate shifts in the Sahel.
- INRA: National Institute for Agricultural Research • Researchers from this Institute participate in joint programs with CIRAD and ORSTOM, in particular on the use of remote detection (INRA, Avignon).

In the area of root studies and studies of the water-soil-plant relationship, INRA Toulouse provides methodological support.

- CNES: National Center for Space Research • LERTS of CNES collaborates on the use of remote detection to evaluate the parameters of the water budget in Senegal.
- BRGM: bureau of Geological and Mining Research.
- GERSAR: Regional Development Companies' Research and Implementation Group • These two institutions have signed an agreement with CIRAD to use underground water in Sub-Saharan Africa for small-scale irrigation purposes.
- SOMDIA: Agricultural and Food Industry Organization and Management Company • CIRAD and SOMDIA have set up an Agriforce group for rural dissemination of the Transpaille biogas-compost system, the aim of which is to make a renewable energy source and source of organic residues that can replenish the soil available to the rural population.
- AGROPOLIS • The AGROPOLIS group, made up of various research and education institutes, was established in Montpellier. ORSTOM and CIRAD, which are members, cooperate with the others, in particular as regards training.

FOREIGN AGENCIES

National Research Institutes • African Development Corporations • All the field work is based on joint programs with the national institutions: ISRA, IBRAZ, INRAN, IER, IDESSA, etc.

In the case of research and development, this cooperation is with development corporations.

- IAEA: International Atomic Energy Agency • This agency supports our programs financially, scientifically and technically in Senegal and Côte d'Ivoire.
- WMO: World Meteorological Organization • Joint agrometeorological program (Mali, etc.)
- EMBRAPA: Agricultural Research — Brazil • Exchange of researchers, joint program.
- ICRISAT • No relations at present despite possible complementarity. Cooperation subject to a specific framework agreement.
- IIMI: International Institute for the Management of Irrigation • Institute now being established. Ties being initiated.
- ADRAO: Association for the Development of Rice Farming in West Africa • Existing relations in the Senegal

- ADRAO (Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest) • Relations existantes sur la vallée du Fleuve Sénégal (ISRA = coordinateur). Possibilité certaine de coopération dans l'aspect économie – valorisation de l'eau. Collaboration avec l'ADRAO à Bouaké.
- CIEH (Centre Inter-État des Études Hydrauliques) • Liaisons très étroites – Opérations conjointes sur : – valorisation de l'eau, – petite hydraulique, – fichier opérationnel des pluies en Afrique de l'Ouest.
- CILSS (Comité Interafricain de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) • Des collaborations sont réalisées avec AGRHYMET et INSAH.

Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse

Pour mieux coordonner et valoriser les recherches dans le Sahel sur l'économie de l'eau, le CIRAD, l'ORSTOM, sous l'impulsion de la Coopération Française, ont proposé aux différentes Institutions Nationales des pays de cette zone et aux Institutions de Recherche Agronomique des pays industrialisés d'élaborer un Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse.

Un projet a été élaboré suite à différents séminaires de la concertation.

Les activités de formation

Le CIRAD et l'ORSTOM ont engagé un ensemble d'actions de formation scientifique en étroite association avec le Laboratoire du Génie Rural de l'ENGREF (École Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts), l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (USTL) et le Centre National d'Enseignement Agronomique pour les Régions Chaudes (CNEARC).

Il s'agit d'assurer la promotion scientifique de jeunes ingénieurs de haut niveau qui sont orientés sur des thèmes porteurs : télédétection, microclimatologie, électronique, modélisation, rationalisation des techniques d'irrigation et agro-énergie.

Parallèlement, une formation de type pédologique via des prestations d'enseignement, dans le cadre du module « maîtrise de l'eau en agriculture », est organisée par le CNEARC.

• Parallèlement, une formation de base est effectuée dans le cadre du module « maîtrise de l'eau en agriculture » organisé par le CNEARC avec le concours du CIRAD et de l'ORSTOM.

Enfin, une formation en recyclage et approfondissement méthodologique est concrétisée par l'accueil, au sein de nos laboratoires, de nombreux ingénieurs seniors en provenance de pays partenaires.

Perspectives et programmes prioritaires pour l'utilisation agricole de l'eau

L'important référentiel technique et scientifique disponible au niveau de la recherche agronomique permet d'envisager des actions de recherche intégrées aux opérations développement rural, dont l'objectif est de mettre au point, puis de diffuser, une stratégie d'aide à la décision

River valley (ISRA = coordinateur). The possibility of cooperation in the water saving and development area is certain. Cooperation with ADRAO in Bouaké.

• CIEH: • Interstate Center for Water Research • Very close ties. Joint operations on water development, small scale water supply systems, operational file on rainfall in West Africa.

• CILSS: • Inter-African Committee to Combat Drought in the Sahel • Cooperation with AGRHYMET and INSAH.

Research network on drought resistance

In order to improve coordination and take maximum advantage of research conducted in the Sahel on water conservation, CIRAD and ORSTOM, at the prompting of the French technical assistance authorities, have proposed the development of a research network on drought resistance to the various national institutions of the countries in that area and to the agricultural research institutes of the industrial countries.

A proposal has been drawn up following several joint seminars.

Training activities

CIRAD and ORSTOM have carried out a number of scientific training activities in close cooperation with the Rural Engineering Laboratory of ENGREF (National School of Rural Engineering; Waters and Forests), the University of Science and Technology of Languedoc (USTL) and the National Center of Agricultural Education for Warm Climates (CNEARC).

The aim is to promote the scientific advancement of young high-level engineers oriented toward the main themes of remote detection, microclimatology, electronics, modelling, rationalization of irrigation techniques and agroenergy.

Alongside this, pedological type training through educational services, within the framework of the "water control in agriculture" module, is organized by CNEARC.

As well, basic training is carried out within the framework of the "water control in agriculture" module organized by CNEARC with the assistance of CIRAD and ORSTOM.

Finally, refresher training and methodological enhancement is provided at our laboratories to many senior engineers from partner countries.

Prospects and priority programs for the agricultural use of water

The sizable technical and scientific reference base available in the area of agricultural research makes it possible to consider undertaking research efforts that are integrated into rural development operations, the objective of which is to develop and then disseminate a strategy for helping with decision making in areas where the unpredictability of rainfall is the major factor limiting agricultural production.

The current orientation of French tropical agricultural research (in the area of the agricultural use of water) is characterized by the following general orientations:

dans les régions où l'aléa pluviométrique est le principal facteur limitant à la production agricole.

L'orientation actuelle de la recherche agronomique tropicale française (dans le domaine de l'utilisation agricole de l'eau) est caractérisée par les orientations générales suivantes :

- poursuite des études au niveau régional sur les agroclimats.
- Itinéraires techniques – Systèmes de cultures pour une meilleure valorisation de l'eau.
- Développement de l'agrométéorologie à l'échelle de la zone homogène et de la parcelle.
- Développement de la petite hydraulique en milieu paysan.
- Prise en considération des zones « tropicales humides » affectées par la sécheresse.

Cette priorité donnée aux actions de recherches liées au développement ne peut s'envisager que parallèlement à la poursuite, voire l'intensification des études sur l'influence des autres facteurs climatiques (température, rayonnement...) sur la croissance et la production des cultures tropicales.

Études régionales sur les agroclimats

Il s'agit en priorité de poursuivre les actions engagées en matière de saisie et traitement des données, de caractérisation des agroclimats et d'analyse sur les évolutions et prédictions pluviométriques.

- Collecte, saisie, critique et traitement de données climatiques

La mise à jour du fichier pluviométrique, et du fichier besoins en eau des cultures reste une priorité.

- Analyse des évolutions climatiques – Prédictions climatiques

Les études porteront sur :

- la structure temporelle des événements pluvieux afin de préciser les ressources probables en eau pour les plantes. Ce travail doit aboutir à la mise au point d'un modèle stochastique des pluies capables de générer des scénarios de pluies quotidiennes respectant la dépendance entre pluies successives. Ce modèle sera ajusté dans un premier temps, sur les relevés pluviométriques de longue durée effectués sur 400 stations du Mali et Burkina Faso, qui seront scindés en deux périodes (avant 1968 « période humide » et après 1968 « période sèche »).
- Le suivi régional des pluies à partir des données fournies par les satellites météorologiques Meteosat et NOAA dans l'infrarouge thermique. Ce travail, actuellement en cours au Sénégal, est basé sur les corrélations pluviométrie-température radiative dans les zones où la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 600 mm, c'est-à-dire dans les zones où l'eau est le principal facteur limitant des rendements.
- La recherche d'analyse et explication des phénomènes climatiques, permettant de rendre les prédictions plus opérationnelles et plus sûres. Dans le cas de la prédiction à moyen terme, il faut chercher à expliquer pourquoi les amas convectifs qui s'accumulent à certaines périodes au-dessus du Sahel tantôt précipitent et tantôt ne précipitent pas. Collaboration aux divers programmes internationaux, tels que TOGA.

– Conduct of studies on agroclimates at the regional level;

- Technical itineraries – Crop systems aimed at better use of water;
- Development of agrometeorology on the scale of the homogeneous zone and the plot;
- Development of small water systems in a rural environment;
- Consideration of the "moist tropic" zones affected by the drought.

This priority accorded to research activities associated with development is inconceivable outside the context of the pursuit, if not to say intensification, of research on the influence of other climatic factors (temperature, sun exposure, etc.) on the growth and production of tropical crops.

Regional studies on agroclimates

This amounts to giving priority to efforts undertaken with regard to data collection and processing, the characterization of agroclimates and the analysis of rainfall trends and predictions:

- Collection and processing of climatic data

The updating of the rainfall file and the file on crop water requirements remains a priority.

- Analysis of climatic shifts – Weather forecasting

Studies will cover the following:

- the time structure of rainfall events, so as to define the likely water resources available for plants. This work should result in the development of a stochastic model for rainfall that is capable of generating daily rainfall scenarios that reflect the dependence between the size of successive rainfalls. This model will be adjusted during an initial phase on the basis of the long-term rainfall statistics from 400 stations in Mali and Burkina Faso, which will be separated into two periods (before 1968, "wet period", and after 1968, "dry period").
- The regional monitoring of rainfall on the basis of data provided by the Meteosat and NOAA weather satellites using thermal infrared. This work, currently under way in Senegal, is based upon correlations between rainfall and radiative temperature in areas where the annual rainfall does not exceed 600 mm, i.e. in zones where water is the principal yield-limiting factor.
- Research devoted to analyzing and explaining climatic phenomena, making it possible to provide more operational and more accurate predictions. In the case of medium-term forecasting, an effort should be made to explain why the convective masses which accumulate above the Sahel at certain times sometimes do and sometimes do not result in precipitation. Cooperation with various international programs, such as TOGA.

Itinéraires techniques – Systèmes de cultures, pour une meilleure valorisation agricole de l'eau

En agroclimatologie, les buts sont de permettre aux producteurs de mieux connaître (diagnostic) et augmenter et stabiliser la productivité de son terroir en fonction de ses caractéristiques pédoclimatiques.

En matière de diagnostic, ces objectifs de recherche dépendront du niveau actuel de compréhension sur les relations entre productivité et termes du bilan hydrique. Lorsque cette relation est mal connue comme pour le cotonnier, les recherches porteront sur son établissement.

Dans le cas des céréales et des légumineuses, cette relation est connue comme une précision suffisante pour qu'un meilleur diagnostic puisse être réalisé à partir de la simple pluviosité. Dès lors, les études porteront sur l'estimation et la cartographie des termes du bilan hydrique significatif des cultures. Elles nécessiteront un effort méthodologique particulier sur l'évaluation du réservoir hydrique du sol, et donc sur l'influence des caractéristiques morphopédologiques sur la capacité de rétention en eau et le développement racinaire.

LA RECHERCHE D'ESPÈCES ET VARIÉTÉS VALORISANT AU MIEUX LES RESSOURCES EN EAU DISPONIBLE

- Amélioration de l'offre en eau au niveau du réservoir sol

En matière d'augmentation et de stabilisation de la productivité du terroir par une meilleure efficacité de la pluviosité, les solutions recherche seront d'améliorer le réservoir sol et son remplissage.

Pour améliorer les dimensions du réservoir sol, seront étudiées l'influence des techniques de travail et de fertilisation des plantes et variétés cultivées et de l'acidification.

Pour améliorer son remplissage, les études porteront sur l'influence des propriétés de surface et leur évolution au cours des saisons pluvieuses, fonction des techniques de travail et du recyclage de la matière organique.

Il apparaît, à ce niveau, tout à fait indispensable de tester la validité de la modélisation en s'appuyant sur les résultats des expérimentations agronomiques « de longue durée » et multilocaux qui sont disponibles en Afrique de l'Ouest. Dans cette optique, un référentiel complet des résultats de ces essais est indispensable.

- Amélioration de la tolérance à la sécheresse du matériel végétal

Les orientations des recherches pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse suivent deux voies principales :

– recherche d'accumulation dans une même variété de différents mécanismes d'adaptation

L'arachide est la culture qui, dans ce domaine, a fait l'objet des études les plus poussées. La méthodologie utilisée vise à sélectionner les géniteurs présentant les meilleures caractéristiques d'adaptation à la sécheresse par la durée de leur cycle ou leur profondeur d'enracinement ou leur capacité de succion de l'eau du sol... Une sélection récurrente est ensuite mise en œuvre à partir de ces géniteurs.

– Étude des interactions entre variétés et milieu

Des recherches sur les interactions plantes-milieux ont pour objectif de déterminer la zone pédoclimatique convenant à une variété.

Technical itineraries – Crop systems to make better agricultural use of water

In agroclimatology, the aims are to enable producers more accurately to identify (diagnose) and to increase and stabilize the productivity of their land depending on its pedoclimatic characteristics.

As regards diagnostics, these research aims will depend on the current level of understanding of the relationship between productivity and the terms of the water budget. When this relationship is poorly known, as for cotton, research will be aimed at determining it.

In the case of cereal grains and leguminous plants, the relationship is known with sufficient precision for better diagnostics to be devised on the basis of rainfall alone. Then, studies will turn to estimating and mapping the characteristics of the water budget that are meaningful for crops. They will require a special methodological effort with regard to evaluation of ground water reserves and therefore on the influence of morphopedological characteristics on water retention capacity and root development.

RESEARCH ON THE SPECIES AND VARIETIES THAT MAKE BEST USE OF AVAILABLE WATER RESOURCES

- Improvement of water supply retained in the soil

As regards increasing and stabilizing land productivity through more efficient rainfall, research solutions will be to improve soil water retention and the fulfilling its potential.

In order to improve the size of the soil reservoir, studies will be made of the influence of plowing and plant fertilization techniques, the plants and varieties raised, and acidification.

In order to improve the level, research will be devoted to the influence of surface characteristics and of changes in them during the rainy seasons, in light of plowing and organic material recycling techniques.

It appears at this level absolutely essential to test the validity of the modelling by reference to the results of "long-term" and multilocal agricultural experimentation available in West Africa. In this perspective, a complete reference based on the results of these tests is essential.

- Improvement of drought tolerance of plant stock

Research to improve drought tolerance is following two major approaches:

– research on accumulation in a same variety of various adaptation mechanisms.

The most thorough studies on this topic have been conducted with respect to groundnuts. The methodology used is aimed at selecting root stock with the best characteristics of adapting to the drought through the length of their cycle, the depth of their roots, or their ability to extract water from the ground. A recurrent selection process is then carried out using this root stock.

– Study of interactions between varieties and environment.

Research on plant-environment interactions is intended to determine the pedoclimatic zone that is suitable for a given variety.

The method used is based, in a first stage, on networks of multilocal tests in order to determine the relationship between varietal classification and the characteristics of the water budget. In a second stage, more precise experimental arrangements that will make it pos-

La méthode utilisée s'appuie, dans une première étape, sur les réseaux d'essais multiloaux pour déterminer la relation classement variétal et termes du bilan hydrique. Dans une deuxième étape, des dispositifs expérimentaux plus fins permettent, pour une variété donnée, de quantifier et hiérarchiser les facteurs de l'alimentation hydrique les plus explicatifs. L'étape ultérieure consistera en une cartographie des zones pédoclimatiques les plus adaptées à chacune des variétés prises en considération.

Agrométéorologie – Avertissement agricole

(Organisation d'actions visant à l'élaboration d'une stratégie d'aide à la décision dans le domaine agricole)

Il s'agit de suivre au jour le jour – en temps quasi réel – le fonctionnement de la culture, sa consommation en eau, sa photosynthèse, l'élaboration de sa production. Pour ce faire, on utilise des modèles analytiques dans lesquels les grandeurs météorologiques sont les variables et les caractéristiques biologiques et édaphiques sont les paramètres des systèmes étudiés. Par simulation de la variation des paramètres de ces modèles, on cherche à déterminer les interventions qui paraissent les plus judicieuses pour la réalisation de l'objectif de production que l'on s'est fixé. On débouche ainsi sur la mise en place d'un système de recommandations et d'avertissements agricoles concernant, par exemple, le labour, la date et la densité du semis, les irrigations, la fumure, les traitements phytosanitaires... *et d'une façon générale les techniques culturales et le calendrier agricole.*

La mise au point et l'utilisation des ces modèles supposent de nombreux acquis dans les domaines de la météorologie, de la pédologie, de la physiologie végétale. Ces acquis existent même si certains doivent encore faire l'objet d'approfondissement, mais sont en fait peu souvent exploités de façon opérationnelle dans le monde agricole.

Quelles en sont les causes ?

– Des raisons structurelles peuvent être avancées. En effet, les différentes structures susceptibles d'acquérir des informations dans ce domaine sont parfois nombreuses.

Les résultats sont donc dispersés et exploités de façon ponctuelle, indépendamment les uns des autres. Dire qu'ils gagneraient à être regroupés et exploités à un niveau régional ou national est une évidence.

– L'hétérogénéité de ce que nous avons appelé ci-dessus « le monde agricole » peut aussi être avancée comme explication.

Schématiquement et pour illustrer ces différences, nous scinderons cette entité en trois groupes d'acteurs : • les paysans • les développeurs • les décideurs. Ces trois catégories utilisent des informations différentes à des niveaux différents :

- *Catégorie* • Paysans • Développeurs • Décideurs •
- *Informations attendues* • techniques • éléments de décision • économiques • potentialités • prévision •
- *Domaine d'intervention* • exploitation • parcelle • micro-région • région • pays •

Les moyens à employer et le travail à effectuer ne sont pas les mêmes pour satisfaire l'attente de ces trois catégories professionnelles. Pour le problème évoqué, à savoir « l'avertissement agricole », il convient donc de définir précisément à qui l'on souhaite l'adresser.

Dans l'état actuel du développement de l'agriculture, en zone aride et semi-aride, il apparaît nécessaire de se

sible, for a given variety, to quantify and rank the water supply factors that are the most telling. The following stage will consist in mapping the pedoclimatic zones best suited for each of the varieties considered.

Agrometeorology – Agricultural warning systems

(ORGANIZATION OF ACTIONS AIMED AT DEVELOPING A STRATEGY FOR AIDING DECISION MAKING IN AGRICULTURE)

This amounts to day-to-day monitoring – virtually in real time – of the way the crop is progressing, its water consumption, its photosynthesis, and the development of its production. To do this, we use analytical models in which meteorological magnitudes serve as variables and the biological and edaphic characteristics are the parameters of the systems under study. Through a simulation of the changes in these models' parameters, an effort is made to determine the steps which appear to be the most judicious with a view to achieving the production objective set. This is the first step, therefore, toward establishing a system of agricultural recommendations and notices concerning, for example, plowing, the timing and density of sowing, irrigation, fertilization, and phytosanitary treatments, and in general of farming techniques and the agricultural schedule.

The development and use of these models assume many achievements in the areas of meteorology, pedology, and plant physiology. These achievements exist even if some of them merit further examination, but in fact are rarely used operationally in the agricultural work.

What are the causes of this?

– structural reasons may be posited. Indeed, many different structures are often able to acquire information in this area. The results are therefore dispersed and used locally only, independently of one another. It goes without saying that gains would ensue from grouping them and using them on a regional or national level.

– The heterogeneous nature of what we called the "agricultural world" above may also be a possible explanation.

Schematically and to illustrate these differences, this "world" may be broken down into three major active groups: farmers, developers, and decision makers. These three categories use different information at different levels:

Category • Farmers • Developers • Decision makers •

Information expected • Technical • Decision-making factors Economic • potential-related, forecasts •

Area of intervention • Farm • plot • Microregion • Region • country •

The resources to be used and the work to be carried out in fulfilling the expectations of each of these three professional categories are not the same. For the problem raised, namely "agricultural notices", it is therefore advisable to define the target audience precisely.

In the present state of development of agriculture in arid and semi-arid zones, it appears necessary to confine the audience to developers and decision makers; agricultural notices to farmers in the course of the crop season should come at a later stage depending on the success of an operation aimed at providing decision making factors to decision makers and developers.

limiter aux développeurs et aux décideurs ; l'avertissement agricole en cours de campagne aux paysans constituant une étape ultérieure dépendant du succès d'une opération visant à la fourniture d'éléments de décision aux décideurs et aux développeurs.

L'objectif poursuivi est de mettre au point une stratégie d'aide à la décision (au niveau décideur et développeur) dans les régions où les aléas climatiques, et plus particulièrement l'irrégularité de la pluviométrie, sont devenus le principal facteur limitant de la production agricole.

Les principes de base d'une telle action sont :

- de s'appuyer sur l'ensemble des services agricoles et paraagricoles, régionaux et nationaux,
- d'exploiter les résultats déjà acquis avant d'entamer de nouveaux programmes de recherche.

Pour être effective, cette stratégie nécessitera :

- la création d'un service de diffusion des recommandations utilisant les informations d'un réseau d'avertissements agrométéorologiques,
- des enquêtes de terrain pour la collecte des données de base,
- un zonage agropédoclimatique,
- l'exploitation et la synthèse des résultats obtenus sur des essais longue durée,
- des actions de recherches et expérimentations pour tester et quantifier l'influence des techniques culturales sur l'amélioration du bilan hydrique,
- la mise en place d'un programme de recherche en télédétection spatiale pour évaluer la productivité régionale. Plusieurs critères, canaux et combinaisons de canaux sont à l'étude, les uns pour estimer les consommations en eau réelles des cultures, les autres pour évaluer la quantité de biomasse produite. Ces deux approches sont complémentaires car elles prennent en compte des pas de temps différents et abordent l'estimation des productions régionales sous deux angles différents : l'état hydrique d'une part et la quantité de biomasse d'autre part. Dans ce domaine de l'estimation de la biomasse, la complémentarité entre bilan hydrique simulé au niveau régional et son image satellitaire devrait permettre l'établissement de relations entre bilan hydrique et espérance de rendements, à un stade précoce du stade végétatif,
- l'application des résultats obtenus aux problèmes réels du développement par la création d'un réseau d'avertissements agrométéorologiques,
- la mise au point d'un service de diffusion des recommandations au milieu professionnel agricole.

La petite hydraulique en milieu paysan aménagement de bassins-versants et bas-fonds

PETITE HYDRAULIQUE EN MILIEU PAYSAN

L'objectif de l'irrigation de complément pratiquée en contre-aléas des pluies est de sécuriser la production vivrière traditionnelle. Cette irrigation constitue la première étape dans le processus d'intensification, elle permet l'assimilation du facteur irrigation qui, dans ce cas, n'est pas perçu comme un élément perturbateur. Le développement de l'irrigation complémentaire contre-aléatoire des pluies va de pair avec le développement de la petite hydraulique agricole en milieu paysan (micro-périmètres) basée sur la valorisation des ressources hydriques tant souterraines que de surfaces qui, en Afrique de l'Ouest, sont nombreuses, éparpillées et le plus souvent de faibles potentialités.

L'introduction de l'irrigation dans l'exploitation agricole traditionnelle est alors envisagée comme un facteur d'in-

The objective pursued is to devise a strategy for aiding decision making (at the decision maker and developer level) in regions where climatic unpredictability, in particular irregular rainfall, has become the major factor limiting agricultural production.

The basic principles of such an action are to:

- gain support of actions from all regional and national agricultural and para-agricultural services;
- use the results already obtained before undertaking new research programs.

In order to be effective, this strategy will require:

- the creation of an office for disseminating the recommendations, using information from a network of agrometeorological notices;
- field surveys for gathering basic data;
- agropedoclimatic zoning;
- utilization and summarization of the results obtained from long-term testing;
- research and experimentation activities to test and quantify the impact of farming techniques on improvement in the water budget;
- introduction of a space teledetection research program to evaluate regional productivity. Several criteria, channels and combinations of channels are under study, some for use in estimating real water consumption of crops, others for assessing the quantity of biomass produced. These two approaches are complementary, as they take into account different time phases and approach the estimation of regional production from two different angles: the hydric status on the one hand, and the quantity of biomass from the other. In this area, the estimation of biomass, and complementarity between the water budget simulated at the regional level and its satellite image, should make it possible to determine relationships between the water budget and anticipated yields at an early stage of the plant cycle;
- application of the results obtained to real development problems through the creation of a network for agrometeorological notices;
- development of an agency for the dissemination of recommendations to agricultural professional circles.

Small water systems in the rural environment : development of catchments and bottom lands

SMALL WATER SYSTEMS IN THE RURAL ENVIRONMENT

The objective of supplementary irrigation for use in counteracting unpredictable rainfall is to safeguard the production of traditional food crops. This irrigation constitutes the first stage in the process of intensification associated with irrigation and permits the assimilation of the irrigation factor, which is not perceived to be a disruptive element in this case. The development of supplementary irrigation for counteracting unpredictable rainfall goes hand in hand with the development of small agricultural water systems in the rural environment (micro-perimeters) based on the optimization of both underground and surface water resources, which, in West Africa, are numerous, sparse and most often of low potential.

The introduction of irrigation into traditional agricultural operations is then envisaged as a factor for the gradual intensification of the production system, necessitating:

- making species and varieties suited to supplementary irrigation available to producers,

tensification progressif du système de production, nécessitant :

– la mise à la disposition des producteurs, des espèces et variétés répondant à l'irrigation complémentaire,

– l'optimisation de l'efficacité des ressources en eau mobilisables, ce qui entre autre signifie une distribution efficace de l'eau à la parcelle, un calcul d'optimisation de l'apport d'eau (bilan hydrique) et une minimisation du coût de m³ d'eau pompée.

• Les concepts de base de l'irrigation de sécurisation et de la petite hydraulique en milieu paysan

– La simplicité apparaît être la condition essentielle pour assurer le succès de cette technique dans le monde rural.

– L'utilisation agricole de la ressource en eau doit tendre vers une optimisation des rendements par unité de volume d'eau et non vers une maximisation des rendements totaux. Ce qui signifie : – l'application en saison des pluies d'une faible dose d'irrigation pour la sécurisation des rendements sur une surface aussi grande que possible, – l'irrigation en saison sèche d'une surface très réduite.

– Le développement de l'irrigation de sécurisation dans le cadre d'un programme régional de petite hydraulique nécessite, pour son succès, une réelle participation financière (totale ou partielle) des producteurs. Cette hypothèse se fonde sur l'idée qu'il faut rompre avec la logique du « don », génératrice de déception, et y substituer une logique de la participation, génératrice du développement. Le niveau des investissements étant d'ailleurs sensiblement plus faible que dans un aménagement hydro-agricole classique, puisque dans l'hypothèse (la moins favorable) d'un forage profond de 50 m débitant 5 à 6 m³/heure et un micro-périmètre de 3 ha équipés, le total des investissements est de l'ordre de 12 500 US \$, soit environ 2 millions de FCFA/ha (le coût du forage entrant pour 50 % dans ce prix).

– La sécurisation des productions vivrières de saison des pluies, pour tendre en premier vers l'autosuffisance alimentaire, est l'objectif majeur. La mise en place de cultures intensives fourragères et légumières, sur des surfaces très réduites en saison sèche, doit contribuer à l'obtention d'un revenu monétaire suffisamment attractif pour fixer les producteurs sur leur terre et limiter ainsi l'exode rural dont on connaît maintenant les conséquences sociales et financières.

– L'association agriculture-élevage permet la pratique de la culture attelée et l'utilisation des résidus organiques pour maintenir voire améliorer le potentiel de fertilité des sols.

– Le système de production fait une place importante à l'arbre, tant pour le bois de chauffe et la production fruitière, que pour la protection anti-érosive des sols.

– La ressource en eau est par définition source d'inégalité car inégalement répartie, ceci conduit à intégrer les micro-périmètres dans un schéma régional de développement rural prenant en considération : – toutes les ressources en eau disponibles et les besoins en eau des populations et des troupeaux, – l'amélioration de la production agricole traditionnelle, – la place qu'occuperont les parcelles irriguées dans le système familial d'exploitation et de son évolution dans le temps en fonction de la disponibilité en force de travail, des revenus supplémentaires, du niveau d'investissement tolérable par le producteur, et enfin des possibilités d'absorber de nouvelles charges de fonctionnement.

– L'utilisation d'espèces et variétés nouvelles, plus productives que les espèces et variétés traditionnelles est une

– optimization of the efficiency of usable water resources, meaning inter alia an efficient distribution of water to the plot, a calculation of optimal water supply (water budget) and a minimization of the cost per cubic meter of pumped water.

• Basic concepts of safeguarding irrigation and small water systems in the rural environment

– Simplicity would appear to be the essential condition for guaranteeing the success of this technique in the rural world.

– The agricultural use of water resources must be aimed toward optimizing yields per unit volume of water and not toward a maximization of total yields. This means: – application during the rainy season of a small amount of irrigation to guarantee yields over the largest possible area – irrigation of a very reduced area during the dry season.

– The development of safeguard irrigation within the framework of a regional small water system program requires, to be successful, genuine financial participation (whether total or partial) on the part of producers. This hypothesis is based on the idea that it is necessary to break with the logic of the "grant", which generates disappointment, and replaces it by the logic of participation, which generates development. The level of investment is significantly lower than in a conventional hydroagricultural development as, using the (least favorable) assumption of a 50 m deep well with a flow of 5 to 6 cubic meters per hour and a microperimeter of 3 hectares with equipment, total investment is on the order of US \$12,500, or about CFAF 2 millions per hectare (the cost of the well accounts for 50 percent of the total).

– Safeguarding of food crops during the rainy season in order to move first toward food self sufficiency is the major objective. The introduction of intensive fodder and leguminous crops on extremely small areas during the dry season should contribute to earning sufficiently attractive monetary income to get producers to focus on their land and thereby limit the rural exodus, the social and financial consequences of which are now known.

– The cropfarming-stockfarming connection makes it possible to farm using draft animals and to use organic waste to maintain or improve the potential fertility of the soil.

– The production system accords a significant role to the tree, both for fuelwood and for fruit production and for protection of the soil against erosion.

– The water resource is by definition a source of inequality as it is unequally distributed, which suggests the need to establish microperimeters within a regional rural development plan taking into consideration: – all available water resources and the water needs of people and livestock – improvement of traditional agricultural production – the role that the irrigated plots will take in the family farming system and its evolution over time in terms of the availability of labor, additional income, the level of investment the producer can tolerate, and finally the possibilities of absorbing new operating costs.

– The use of new species and varieties that are more productive than the traditional ones is a necessity. Agricultural research has created or selected varieties of sorghum, maize, cowpea, rice, etc., which fully justify the extra costs incurred because of both irrigation and the necessary inputs.

nécessité. La recherche agronomique a créé ou sélectionné ces variétés, sorgho, maïs, niébé, riz, etc., qui valorisent parfaitement les coûts supplémentaires dus à la fois à l'irrigation et aux intrants nécessaires.

- Les axes de recherche liés à la petite hydraulique

La mise en œuvre de cette petite hydraulique agricole suppose :

- d'expérimenter et mettre au point les techniques de pompage de petits débits. En effet, le pompage de ces faibles débits (4-10 m³/h) à des charges maximum de 50 mètres nécessite la mise en œuvre de petites puissances de l'ordre de 0,8 à 1,0 Hp. La technologie actuellement disponible n'est pas encore adaptée à ces puissances trop importantes pour un pompage manuel et trop petites pour une motorisation. La solution optimale pourrait être l'exhaure animale ce qui justifie, entre autres, l'association agriculture-élevage ;

- d'expérimenter et mettre au point les techniques de distribution de l'eau à la parcelle, permettant de manipuler avec efficacité de faibles débits.

Les solutions récentes de mécanisation de l'irrigation à la raie (rampes à vannettes, gaines souples de distribution...) limitent le gaspillage de l'eau en amont de la parcelle, et permettent l'utilisation des débits plus faibles. Ces systèmes acheminent l'eau en tête de raie sous une très faible charge (H = 30 cm). L'eau est ensuite distribuée par des petits ajustages réglables (vannettes). Avec un débit de 0,3 à 0,4 l/s par vannette il est possible, sans manipulation, d'apporter une dose d'irrigation de 20 à 30 mm en moins de 50 minutes pour des longueurs de raies de 30 à 60 mètres.

Si séduisant soit-il, la vulgarisation d'un tel système d'irrigation en milieu paysan nécessite d'appréhender correctement tous les paramètres de son efficacité tant sur le plan hydraulique qu'économique.

- L'optimisation agro-économique de l'irrigation de complément qui est entre autre fonction : du choix d'espèces et variétés performantes qui valorisent l'irrigation et les intrants d'une évaluation la plus précise possible des besoins en eau d'irrigation de la mise en œuvre d'un système de culture optimisant les ressources disponibles.

AMÉNAGEMENTS DE BASSINS-VERSANTS ET BAS-FONDS

- L'intensification du système de cultures pratiquées (traction animale pour le travail du sol, fertilisation...), le déboisement, le défrichage et la mise en culture des sols peu profonds sur cuirasse des hauts de bassins-versants (sous l'influence de la pression démographique) conduisent à une dégradation des terres dont l'érosion par le ruissellement est l'effet le plus spectaculaire.

Il apparaît nécessaire, voire indispensable, de renforcer le programme de défense et restauration des sols, conservation et économie de l'eau, mis en place dans la région du Sine Saloum et à Fara Poura en Haute Volta et dans le projet pilote du Pidzar, Vénézuéla. Dans le cadre d'une action pluridisciplinaire intégrée, ce programme permettra la mise en place et le test des techniques d'aménagement, de travail du sol, de reboisement, des façons culturales, des rotations de cultures, etc., dans l'objectif d'améliorer le bilan hydrique, tant au niveau de la parcelle qu'au niveau du paysage (bassin-versant).

Ce programme doit permettre la mise au point des techniques d'aménagement et des systèmes de cultures qui conduiront à :

- réduire l'érosion par la maîtrise du ruissellement,

- Orientations of research on small water systems

The implementation of small agricultural water systems presupposes the following:

- experimentation with and development of low flow pumping techniques. Indeed, the pumping of these low flows (4-10 m³/h) a maximum of 50 meters requires outfitting with low power pumps on the order of 0.8-1.0 Hp. The technology currently available is not yet adapted to these powers, which are too large for manual pumping and too small for motorization. The optimum solution could be extraction using draft animals, one of several justifications for the association of cropfarming with stockfarming;

- experimentation with and development of techniques for the distribution of the water to the plot, making it possible to handle low flows efficiently.

Recent solutions for the mechanization of furrow irrigation (troughs with sluice gates flexible distribution hoses, etc.) limit the waste of water upstream from the plot and make it possible to use smaller flows. These systems route the water to the head of the furrow at a very low flow pressure (H = 30 cm). The water is then distributed by small adjustable governors (sluice gates). With a flow of 0.3 to 0.4 l/s per sluice gate it is possible, without manual handling, to provide irrigation of 20 to 30 mm in less than 50 minutes for furrow lengths of 30 to 60 meters.

As appealing as this may be, extension work and training for such an irrigation system in the small farming environment makes it necessary to correctly perceive all the parameters for its efficiency, both hydraulically and from the economic standpoint.

- Agro-economic optimization of supplementary irrigation, which among other things is dependent on: the choice of high performance species and varieties which take full advantage of irrigation and inputs; the most accurate possible assessment of irrigation water requirements; the introduction of a crop system that makes optimum use of available resources.

DEVELOPMENT OF CATCHMENTS AND BOTTOM LANDS

- The intensification of the farming systems used (draft animal traction for working the soil, fertilization, etc.), forest clearing and brush clearing and the cultivation of shallow soils on the crest of catchment slopes (the consequence of demographic pressure) are causing a deterioration of soils, of which the most spectacular impact is runoff erosion.

It would appear necessary, even essential, to strengthen the program for defending and restoring these soils, and for conserving and saving water, introduced in the Sine Saloum and Fara Poura regions of Burkina Faso and in the pilot project of Pidzar in Venezuela. In the framework of an integrated multidisciplinary effort, this program will make it possible to introduce and test techniques for soil development, plowing, reforestation, farming methods, crop rotation, etc., with a view to improving the water budget both at the plot level and at the area level (catchment basin).

This program should make it possible to refine soil development techniques and crop systems which will result in:

- reduced erosion through the control of runoff;
- improved infiltration at the level of the cultivated plot, working of the soil, integration of the tree into the crop system;

– améliorer l'infiltration au niveau de la parcelle cultivée, travail du sol, intégration de l'arbre dans le système du cultures...

– stocker les eaux de ruissellement préalablement maîtrisées et canalisées (waterway, watershed, retenues collinaires),

– réutiliser les eaux stockées en période d'alimentation hydrique déficitaire (contre-aléa des pluies).

• En ce qui concerne les aménagements de bas-fonds, ils résultent de la volonté d'intensifier la production agricole (essentiellement rizicole) dans ces zones inondables soumises à des variations brutales de régime hydrique.

Les échecs rencontrés par la riziculture irriguée et le coût des aménagements permettant une maîtrise totale de l'eau conduisent à préconiser des aménagement sommaires permettant de maîtriser les eaux de crue et/ou de ruissellement pour sécuriser l'alimentation en eau des rizières en ayant pour principales caractéristiques :

– d'être aussi simples que possible pour en simplifier au maximum la gestion,

– d'avoir un coût aussi faible que possible pour rentabiliser ces aménagements avec des techniques culturales facilement maîtrisables par les paysans,

– à court terme : l'objectif de la recherche agronomique est de réaliser un modèle de simulation permettant d'approcher le bilan hydrique au niveau des parcelles élémentaires sur le bassin-versant et le bas-fond du bassin-versant,

– à long terme : l'objectif est d'être capable de simuler des modifications d'état de surface (aménagements) et interpréter leur influence sur le bilan hydrique. En d'autres termes tester de petits aménagements.

Économie de l'eau et aménagements hydro-agricoles

Chaque projet hydro-agricole s'inscrit dans un contexte spécifique (physique, humain, social, économique). Il ne peut y avoir de standards universellement applicables. L'importance et la diversité des résultats disponibles, tant en ce qui concerne les techniques culturales, les espèces et variétés que les méthodes et techniques d'irrigation, font que pour chaque cas, un ensemble de solutions techniques peut être proposé aux paysans pour qu'ils élaborent eux-mêmes leurs nouveaux systèmes de production. L'intérêt technique et l'impact potentiel de ces innovations en milieu paysan étant testé et jugé dans les projets pilotes avant leur transfert à grande échelle.

La mise en place d'une cellule de recherche d'accompagnement à la mise en valeur est indispensable pour suivre, en permanence, les problèmes techniques qui peuvent survenir, ajuster les orientations agricoles initiales, procéder en permanence à l'actualisation du référentiel technique et effectuer les indispensables études permettant d'appréhender les évolutions à long terme des facteurs du milieu et éviter l'incidence souvent non négligeable des effets secondaires (salinisation, prise en masse, remontée de nappes...).

Prise en considération des zones « tropicales humides » affectées par la sécheresse

Les effets de la « sécheresse » de ces dernières années se font ressentir au niveau de l'alimentation hydrique des

– stocking of previously controlled and channelled runoff water (waterway, watershed, slope barriers);

– reuse of stored water in periods when water inflows are subpar (counteraction of unpredictability of rainfall).

• As regards the improvements of catchment basins, these result from the desire to intensify agricultural production (particularly in the case of rice) in floodable areas that are subject to sizable swings in water supply.

The failures with irrigated rice farming and the cost of such improvements that permit a total control of water suggested advocating reduced improvements which make it possible to control peak level water and/or runoff in order to safeguard the water supply of rice paddies, the principal characteristics of which would be:

– maximum possible simplicity so as to make management of them as easy as possible;

– lowest possible cost so as to profit from the improvements using farming techniques readily mastered by the farmer;

– in the short term: the objective of agricultural research is to devise a simulation model making it possible to determine the water budget at the level of the basic plots on the catchment and the bottom lands of the catchment;

– in the long term: the objective is to be able to simulate modifications in the surface condition (improvements) and interpret their impact on the water budget. In other words, to test small improvements.

Water conservation and hydroagricultural improvements

Each hydroagricultural project is part of a specific physical, human, social and economic context. There can be no universally applicable standards. The importance and the diversity of the available results, both as regards farming techniques, species and varieties, and as regards methods and techniques of irrigation, offer for each case a set of technical solutions that can be proposed to farmers so that they themselves will develop their new production systems. The technical impact and the potential impact of these innovations in the small farming environment are to have been tested and judged in pilot projects before they are transferred to the large scale.

The introduction of a research unit participating in the development process is essential so as to be able regularly to monitor the technical problems that may arise, adjust the initial agricultural orientations, regularly update the technical reference base, and carry out the essential studies that make it possible to identify long-term changes in environmental factors and thereby avoid the frequently significant impact of secondary effects of irrigation (salinization, solidification, raising of water tables, etc.).

Consideration of "moist tropic" zones affected by drought

The effects of the "drought" of recent years have been felt as regards the water supply of crops in zones heretofore considered to be privileged parts of the "moist tropics". This is particularly pronounced in the case of perennial crops such as oil palms, which are often situated in a limit ecology.

In continuation of the efforts undertaken, the priority actions will be as follows:

cultures des zones a priori plus privilégiées du « tropique humide ». Ceci est particulièrement marqué pour les cultures pérennes telles que le palmier à huile, qui se trouve parfois dans une écologie limite.

Dans le prolongement des actions entreprises, les actions prioritaires seront :

- étude de l'application rationnelle et économique de l'irrigation compte tenu des difficultés propres à l'expérimentation de cette technique sur les cultures pérennes en plantation de type industriel (nécessité de grandes surfaces pour limiter les effets d'oasis, difficulté de gérer indépendamment des expériences au sein de blocs industriels irrigués) ;
- en matière de physiologie de l'alimentation en eau du palmier des études complètes et coordonnées doivent être poursuivies : répartition de l'eau dans le sol selon les techniques, modes et fréquences d'apport, développement du système racinaire, régulation stomatique, température des feuilles, photosynthèse... Les études passées ont montré qu'en matière de réaction de l'arbre à l'irrigation, la notion d'ouverture stomatique était un bon indicateur de la qualité d'alimentation en eau de l'arbre sous réserve d'interpréter cette donnée en fonction de facteurs climatiques comme l'hygrométrie de l'air ;
- recherche d'une réponse à la question : « en zones tropicales humides à déficit hydrique naturel, l'irrigation permettra-t-elle d'atteindre ou non le potentiel du matériel végétal et si oui dans quelles conditions » ;
- en matière d'agronomie, il convient de rechercher toutes les solutions pour améliorer le rapport entre revenus et charges d'une palmeraie irriguée : type de matériel végétal, densité de plantation, fumures, association de cultures ;
- en matière de technologie en irrigation, les études devraient être poursuivies et rationalisées sur les techniques d'apport de l'eau, les méthodes de distribution de l'eau (en particulier sur l'intérêt des arrosages journaliers), les matériels concernés, les sources possibles d'énergie (utilisation des déchets par gazéification) ;
- recherches coordonnées pour déterminer les meilleures voies pour l'application du palmier irrigué en milieu paysan : aspects sociologique, technique, économique et financier.

Conclusion générale

L'acquis de la Recherche Agronomique Tropicale Française dans le domaine de l'utilisation agricole de l'eau est important et significatif. Le référentiel technique et scientifique disponible porte essentiellement sur la détermination des relations existantes ou probables entre le climat d'une zone et son agriculture, ainsi que sur l'analyse des mécanismes d'actions des facteurs climatiques, biologiques et édaphiques dans la relation Production-Alimentaire hydrique.

Cet acquis de la recherche permet d'envisager la poursuite de la mise en œuvre d'actions de recherche plus intégrées au développement rural, dont les objectifs seront de proposer différentes stratégies d'aide à la décision en fonction de situations agro-pédo-climatiques bien caractérisées. Ces applications opérationnelles nécessiteront :

- la poursuite des études thématiques pour l'analyse et la compréhension des phénomènes de base ;
- une nécessaire plus grande intégration de la recherche dans les opérations de développement, qui de ce fait

– étude de la rationalité et économique application de l'irrigation en light of the difficulties associated with experimentation with this technique with perennial crops in a plantation on an industrial scale (need for large surface areas to limit oasis effects, difficulty of independently managing experience within irrigated industrial blocks);

– as regards the water supply physiology of the palm tree, complete and coordinated studies must be made on the distribution of water in the soil depending on the techniques, means and frequency of providing same, the development of the root system, stomatic regulation, leaf temperature, photosynthesis, etc. The studies completed have shown that, as regards the tree's reaction to irrigation, the concept of stomatic opening was a good indicator of the tree's water supply quality so long as the datum was interpreted in light of climatic factors such as air hygrometry;

– search for an answer to the question of whether, in humid tropical zones with a natural water shortage, irrigation will make it possible or not to achieve the potential of the plant stock, and if so, under what conditions;

– as regards agronomy, an effort should be made to identify all solutions that might improve the relationship between income and costs for an irrigated palm plantation: type of plant stock, density of planting, fertilization, crop mix;

– as regards irrigation technology, studies should be pursued and rationalized on the techniques of providing water, water distribution methods (particularly in the merits or demerits of daily sprinkling), the materials concerned, and the possible energy sources (use of waste through gasification).

Coordinated research to determine the best approaches for using irrigated palm raising in the small-farmer environment: sociological, technical, economic and financial aspects.

General conclusion

The achievements of French Tropical Agricultural Research in the areas of the agricultural use of water are important and significant. The technical and scientific reference base available is devoted largely to the identification of the relationships which exist or are likely to exist between the climate of a zone and its agriculture, as well as to analysis of the mechanisms of actions of climatic, biological and edaphic factors in the production-water supply relationship.

These research gains make it possible to consider the continued implementation of research efforts more integrated with rural development, the objectives of which will be to propose different strategies to aid in decision making depending on clearly characterized agro-pedoclimatic situations. These operational applications will require:

– continued thematic studies to analyze and gain knowledge on the basic phenomena;

– a necessarily greater integration of research into development operations, which accordingly would constitute "land bases" for research;

– the introduction, testing and then dissemination of systems for providing agricultural recommendation notices. In view of the heterogeneous nature of the agricultural world, this operational agrometeorology will be oriented initially toward developers and decision makers. The final

constituent des « *bases terrains* » pour la recherche ;

– la mise en œuvre, le test, puis la diffusion de systèmes d'avertissements aux recommandations agricoles. Compte tenu de l'hétérogénéité du monde agricole, cette agrométéorologie opérationnelle s'intéressera, dans une première étape, aux développeurs et décideurs. L'avertissement agricole en cours de campagne aux paysans constituant l'objectif final ;

– la mise en œuvre de moyens nouveaux et supplémentaires sur le renforcement matériel et humain du dispositif de recherche. Ce renforcement devra être envisagé sur un plan régional et intégrer les structures nationales et internationales de recherche. Le réseau R₃S (Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse) pourrait être une des voies à privilégier pour ce renforcement.

objective would be to extend agricultural notice services during the course of the crop season to the farmers themselves;

– the implementation of new and additional means for the material and human strengthening of the research apparatus. This strengthening should be considered within the context of a regional plan and should integrate the national and international research structures. The R₃₃ Network (Drought Resistance Research Network) could be one avenue through which this strengthening could be carried out.

Référence bibliographiques principales

AVERTISSEMENT : CETTE BIBLIOGRAPHIE PAR THÈMES SCIENTIFIQUES MAJEURS DE L'UTILISATION AGRICOLE DE L'EAU CONCERNE UNIQUEMENT LES PRINCIPAUX TRAVAUX DU CIRAD ET DE L'ORSTOM DEPUIS 1975.

POUR LES TRAVAUX ANTÉRIEURS, ON POURRA SE RÉFÉRER A L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE PRÉSENTÉE DANS L'AGRONOMIE TROPICALE N° 30-2 DE 1975.

ZONAGE AGRO-PEDO-CLIMATIQUE

- ELDIN M • 1983 • A SYSTEM OF AGROCLIMATIC ZONING TO EVALUATE CLIMATIC POTENTIAL FOR CROP PRODUCTION. IN: CUSAK D.F. (ED.). AGROCLIMATIC INFORMATION FOR DEVELOPMENT. REVIEWING THE GREEN REVOLUTION. BOULDER, COLORADO, WESTVIEW, 83-91.
- ELDIN M • 1971 • DÉFICITS HYDRIQUES. DURÉE DE LA SAISON SÈCHE. CARTES ET NOTICE. ATLAS DE LA CÔTE D'IVOIRE. ABIDJAN. MIN. DU PLAN ORSTOM, INSTITUT DE GÉOGRAPHIE TROPICALE.
- ROJAS O / ELDIN M • 1983 • DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL AGROCLIMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE CANA DE AZÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM, L.) EN COSTA RICA. *TURRIALBA* 33 (1) 1-10.
- ROJAS O / ELDIN M • 1983 • ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA PARA EL CULTIVO DE CANA DE AZÚCAR EN COSTA RICA. *TURRIALBA* 33 (2) 151-160.
- FOREST F / REYNIERS F.N • 1985 • PROPOSITION DE CLASSIFICATION EN TERMES DU BILAN HYDRIQUE DES SITUATIONS AGROCLIMATIQUES DE RIZICULTURE PLUVIALE. CONFÉRENCE INTERN. RIZ PLUVIAL, DJAKARTA, MARS 1985.
- FOREST F / VALET S / LEVAVASSEUR M.T • 1983 • ÉTABLISSEMENT DE LA CARTE D'APTITUDE AGRO-PÉDO-CLIMATIQUE A LA CULTURE DU RIZ PLUVIAL EN CÔTE D'IVOIRE (CARTE + COMMENTAIRES).
- STEINMETZ S / FOREST F / REYNIERS F.N • CARACTÉRISATION DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE ET DU BILAN HYDRIQUE DU RIZ PLUVIAL POUR DIFFÉRENTES ZONE DE PRODUCTION DU BRÉSIL (EMBRAPA, DOC. 85).

CARACTÉRISATION AGRO-CLIMATIQUE – BESOINS EN EAU – DEMANDE CLIMATIQUE

- ALBERGEL J / CARBONNEL J.P / GROUZIS M • 1985 • PÉJORATION CLIMATIQUE AU BURKINA FASO, INCIDENCE SUR LA RES-SOURCE EN EAU ET SUR LA PRODUCTION VÉGÉTALE. *CAH. ORSTOM, SÉR. HYDROL.*
- CARBONNEL J.P • 1985 • ANALYSIS OF THE RECENT CLIMATIC EVOLUTION IN BURKINA FASO (UPPER VOLTA). NATURAL RESOURCES FORUM, UN, NEW YORK, VOL. 9, N° 1, 12 P.
- OLIVRY J.C • 1983 • LE POINT EN 1982 SUR LA SÈCHERESSE EN SÉNÉGAMBIE ET AUX ÎLES DU CAP-VERT. EXAMEN DE QUELQUES SÉRIES DE LONGUE DURÉE (DÉBITS ET PRÉCIPITATIONS). *CAH. ORSTOM, SÉRIE HYDROL.*, 20, 1, 47-69.
- FRANQUIN P • 1984 • AGROCLIMATOLOGIE ET AGROMÉTÉOROLOGIE EN ZONE TROPICALE SÈCHE D'AFRIQUE. *L'AGRONOMIE TROPICALE*, 39 (4) 301-307.
- CITEAU J / CAMMAS J.P / GOURIOU Y / GUILLLOT B • 1986 • REMARQUE SUR LA MIGRATION DE LA ZONE DE CONVERGENCE INTERTROPICALE EN ATLANTIQUE, LES TEMPÉRATURES DE SURFACE DU GOLFE DE GUINÉE, ET LA PLUVIOMÉTRIE EN AFRIQUE DE L'OUEST SAHÉLIENNE ET AU NORD-EST DU BRÉSIL. IN : « CLIMAT ET DÉVELOPPEMENT », ORSTOM, PARIS, 1983.
- FRANQUIN P • 1985 • MÉTÉOROLOGIE ET AGROSTRATÉGIES POUR LE SAHEL. *LA MÉTÉOROLOGIE* (N° 8), PP. 1-7.
- BOIS J.F / COUCHAT PH / MOUTONNET P • 1984 • ÉTUDE DE LA RÉPONSE A UN STRESS HYDRIQUE DE QUELQUES VARIÉTÉS DE RIZ PLUVIAL ET IRRIGUÉ. I. INCIDENCES SUR LA TRANSPIRATION. II. INCIDENCES SUR LA PHOTOSYNTÈSE. *PLANT AND SOIL* (80) 22-246.
- BRUNET-MOREY Y • 1969 • ÉTUDE DE QUELQUES LOIS STATISTIQUES UTILISÉES EN HYDROLOGIE. *CAHIERS ORSTOM, PARIS, SÉR. HYDROL.*, VOL. VI (3).
- HIEZ G • 1977 • L'HOMOGÉNÉITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES. *CAHIERS ORSTOM, PARIS, SÉR. HYDROL.*, VOL. XIV (2).

- COMBES J.C • 1983 • BILAN ÉNERGÉTIQUE ET HYDRIQUE DE L'ANANAS. UTILISATION OPTIMALE DES POTENTIALITÉS CLIMATIQUES (IRFA MPL 1983).
- DANCETTE C • 1983 • ESTIMATION DES BESOINS EN EAU DES PRINCIPALES CULTURES EN ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE. *AGRONOMIE TROPICALE* 38.4, 1983, PP. 281-294.
- DANCETTE C • 1983 • BESOINS EN EAU DU MIL AU SÉNÉGAL. ADAPTATION EN ZONE SEMI-ARIDE TROPICALE. *AGRONOMIE TROPICALE* 38.4, PP. 267-280.
- GÈNERE B • 1985 • RÉSEAU MULTILocal DE MESURES CLIMATIQUES A LA RÉUNION POUR UNE CONNAISSANCE FIABLE DU MÉSOCLIMAT ET L'APPUI A L'EXPÉRIMENTATION AGRONOMIQUE. *AGRONOMIE TROPICALE* 40.3, 1985.
- SEGUIN B / ASSAD E / FRETEAUD J.P / KERR Y.H / LAGOUARDE J.P • 1985 • ESSAI DU SUIVI DE L'ÉVAPORATION A PARTIR DE L'INFRA-ROUGE THERMIQUE PAR SATELLITE AU SÉNÉGAL. COL. SUR LES RECHERCHES FRANÇAISES EN MÉTÉOROLOGIE ET TÉLÉDÉTECTION SUR LE CONTINENT AFRICAIN. PALAISEAU 18-20 JUIN 1985.
- KERR Y.H / ASSAD E / SEGUIN B / FRETEAUD J.P / LAGOUARDE J.P • 1986 • ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION IN THE SAHELIAN ZONE BY USE OF METEOSAT AND NOAA/AHURR DATA. XXVI COSPAR. TOULOUSE, FRANCE, JUILLET 1986.
- ASSAD E / FRETEAUD J.P / SEGUIN B / LAGOUARDE J.P / KERR Y.H • 1986 • THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE DANS L'ESTIMATION DE L'ÉVAPORATION A L'ÉCHELLE RÉGIONALE. POSSIBILITÉ D'APPLICATION A L'AIDE D'IMAGES DU SATELLITE METEOSAT. CAS DU SÉNÉGAL. A PARAÎTRE DANS *AGRO. TROP.* 19 PGS.
- ASSAD E / SEGUIN B / KERR Y.H / FRETEAUD J.P / LAGOUARDE J.P • 1986 • LES APPORTS POSSIBLES DE METEOSAT DANS LE SUIVI D'HIVERNAGE AU SÉNÉGAL. XXVI COSPAR, TOULOUSE, JUIN 1986.
- CHAROY J / FOREST F / LEGOUILP J.C • 1978 • ÉVAPOTRANSPIRATION - BESOINS EN EAU DES CULTURES - RELATIONS EAU-SOL-PLANTE - ESTIMATION FRÉQUENTIELLE DES CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE EN CULTURE PLUVIALE ET IRRIGUÉE. COURS D'ENSEIGNEMENT ADHAREM-ENSAM, 1978.

CARACTÉRISATION HYDRIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES SOLS

- POSS R / SARAGONI H / FOREGET A • 1985 • ÉTUDE DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DANS LES TERRES DE BARRE. DOC. ORSTOM.
- VAUCLIN M / IMBERNON J / VACHAUD G • 1983 • ANALYSE COMPARATIVE DE DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE DES SOLS NON SATURÉS DE LA ZONE CENTRE NORD SÉNÉGAL. *AGRONOMIE TROPICALE* 38.3, 1983.
- VAUCLIN M / IMBERNON J / VACHAUD G / DANCETTE C • 1983 • DESCRIPTION EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION STOCHASTIQUE DES TRANSFERTS PAR LA MISE EN ÉCHELLE DES PROPRIÉTÉS HYDRODYNAMIQUES DES SOLS. COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'EMPLOI DES TECHNIQUES DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS DANS LES ÉTUDES SUR LA PHYSIQUE DES SOLS ET L'IRRIGATION. AIX-EN-PROVENCE, 19-22 AVRIL 1983. REPRINT FROM "ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES 1983", IAEA VIENNE, IAEA-SM 267/25, PP. 103-124.
- VACHAUD G / VAUCLIN M / IMBERNON J / PIERI C / DANCETTE C / DIATTA S • 1982 • ÉTUDE DES PERTES EN EAU ET EN MATIÈRES MINÉRALES SOUS CULTURE CONSIDÉRANT LA VARIABILITÉ SPATIALE DU SOL. 12^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE SCIENCES DU SOL. NEW DEHLI, FÉVRIER 1982.
- VACHAUD G / DANCETTE C / SONKO S / THONY J.L • 1978 • MÉTHODE DE CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE IN SITU D'UN SOL NON SATURÉ. APPLICATION A DEUX TYPES DE SOL DU SÉNÉGAL EN VUE DE LA DÉTERMINATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE. *ANNALES AGRONOMIQUES* 29.1, 1978, PP. 1-36.
- VALET S / MARCESSE J • 1980 • PROSPECTION HYDROPÉDOLOGIQUE, AMÉLIORATION FONCIÈRE ET ESSAIS D'IRRIGATION SOUS CULTURES, EN VUE DE L'AMÉNAGEMENT DES TERRASSES DU FLEUVE NIGER A TILLABERY. *AGRONOMIE TROPICALE*, 1980, TOME XXXV, P. 115.
- OLIVIN J / OCHS R • 1978 • PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES SOLS ET ALIMENTATION EN EAU DES OLÉAGINEUX PÉRENNES EN AFRIQUE DE L'OUEST. *OLÉAGINEUX* 33.1, OP. 1-12.

MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE DES CULTURES PLUVIALES

- FOREST F • 1984 • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE DES CULTURES PLUVIALES. PRÉSENTATION ET UTILISATION DU LOGICIEL BIP 4. IRAT MPL, 1984.
- FRETEAUD J.P / CORTIER B / DIAGNE N • 1986 • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE ET SUIVI AGROCLIMATIQUE DE L'HIVERNAGE. CAS DU SÉNÉGAL. IRAT DEVE MPL, 1986.
- LHOMME J.P / ELDIN M • 1985 • UN MODÈLE AGROCLIMATOLOGIQUE DE SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE DES CULTURES. IN : « BESOINS EN EAU DES CULTURES » : CONFÉRENCE INTERNATIONALE DE LA CIID, INRA, PARIS. 841-852.

MESURE ET AMÉLIORATION DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES. INFLUENCE DES FACTEURS AGRONOMIQUES

Cultures fruitières

- YASMAN M • 1983 • DYNAMIQUE DE L'EAU SOUS VERGER D'AGRUMES. COMPARAISON DE 3 TECHNIQUES CULTURALES D'ENTRETIEN DU SOL. IRFA MPL 1983.

Cultures oléagineuses

- DANIEL C / DE TAFFIN G • 1974 • CONDUITE DES JEUNES PLANTATIONS DE PALMIER A HUILE EN ZONE SÈCHE AU DAHOMEY. OLÉAGINEUX, 29, PP. 227-232.
- DANIEL C • 1979 • UTILISATION DU TEST STOMATIQUE POUR LE CONTRÔLE DE L'ALIMENTATION EN EAU EN PLANTATION DE PALMIERS A HUILE. C. N° 194. FAE OLÉAGINEUX, 34, 6, PP. 283-287.

Cultures vivrières

- CHOPART J.L / NICOU R / VACHAUD G • 1978 • LE TRAVAIL DU SOL ET LE MULCH PAILLEUX. INFLUENCES COMPARÉES SUR L'ÉCONOMIE DE L'EAU DANS LE SYSTÈME ARACHIDE-MIL AU SÉNÉGAL. PROCEEDING DU SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR L'UTILISATION DES RADIO-ISOTOPES DANS LES RELATIONS EAU-SOL-PLANTES. COLOMBO, 11-15/12/1978. IAEA SM/235/22, PP. 199-211.
- KALMS J.M / VACHAUD G / VAUCLIN M • 1982 • ÉTUDE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE DE DEUX VARIÉTÉS DE RIZ PLUVIAL A L'ÉCHELLE D'UNE PARCELLE. AGRONOMIE, 2 (9), PP. 871-883.
- DANCETTE C / HAMON G / VACHAUD G • 1978 • ÉTUDE COMPARÉE DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU EN SOL SABLEUX NU ET CULTIVÉ. MODALITÉS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DU MIL ET DE L'ARACHIDE EN CONDITIONS PLUVIALES DÉFICITAIRES, AU SÉNÉGAL. PROCEEDING DU SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR L'UTILISATION DES RADIO-ISOTOPES DANS LES RELATIONS EAU-SOL-PLANTES. COLOMBO 11-15/12/1978. IAEA SM/235/17, PP. 214-234.
- CHOPART J.L / KONE D • 1985 • INFLUENCE DE DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRAVAIL DU SOL SUR L'ALIMENTATION HYDRIQUE DU MAÏS ET DU COTONNIER EN CÔTE D'IVOIRE. AGRONOMIE TROPICALE 40.3, 1985.
- KALMS J.M / IMBERNON J • 1983 • MODALITÉ D'ALIMENTATION HYDRIQUE DU RIZ PLUVIAL. BILAN DES RECHERCHES MÉTHODOLOGIQUES EFFECTUÉES A BOUAKÉ EN CÔTE D'IVOIRE. AGRONOMIE TROPICALE, VOL. 38, 1983, PP. 198-205.
- FOREST F / KALMS J.M • 1984 • INFLUENCE DU RÉGIME D'ALIMENTATION HYDRIQUE SUR LA PRODUCTION DU RIZ PLUVIAL. SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE. AGRONOMIE TROPICALE, VOL. 39.1, 1984, P. 42.
- NICOU R / CHOPART J.L • 1979 • « LES TECHNIQUES D'ÉCONOMIE DE L'EAU DANS LES SOLS SABLEUX DU SÉNÉGAL ». IN : SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND CROP PRODUCTION IN THE TROPICS. ED. WILLEY AND SONS, 375-384.
- CHOPART J.L • 1980 • ÉTUDE AU CHAMP DES SYSTÈMES RACINAIRES DES PRINCIPALES CULTURES PLUVIALES AU SÉNÉGAL. IRAT MPL, 162 PAGES.

- FOREST F / LIDON B • 1984 • INFLUENCE DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA FLUCTUATION DU RENDEMENT D'UNE CULTURE DE SORGHO INTENSIVE. ICRIASAT 1984, PROCEEDING OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM, NOV. 1982.
- DESSELAS DUC • 1984 • MODÉLISATION DE SYSTÈMES DE CULTURES IRRIGUÉES EN ZONE CENTRE NORD SÉNÉGAL. DGRST. IRAT.
- DUC T.M • 1981 • ESSAI AU CHAMP DE L'IRRIGATION PAR PETITS ASPERSEURS ET GOUTTE A GOUTTE. ISRA.
- CHAROY J • 1970 • LES CULTURES IRRIGUÉES AU NIGER. RÉSULTATS DE 7 ANNÉES DE MESURES ET EXPÉRIMENTATIONS DANS LE GOULBI DE MARADI.
- GRANIER F • 1985 • DESSÈCHEMENT DU SOL ET INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES DE L'ÉTAT HYDRIQUE CHEZ LE PÊCHER. APPLICATION AU DÉCLENCHEMENT DE L'IRRIGATION. THÈSE USTL IRFA 1985.
- LEGOUPIL J.C • 1977 • ÉVOLUTION DE LA SALURE DU SOL SOUS IRRIGATION, AMÉNAGEMENT ET MISE EN VALEUR DES SOLS SALÉS. CONFÉRENCE ITA, MOSTAGANEM, 1977.
- CHAROY J / FOREST L / LEGOUPIL J.C • 1978 • ESSAIS D'OPTIMISATION D'UN PROJET D'IRRIGATION EN ZONE SAHÉLIENNE, PÉRIMÈTRE DE SONA AU NIGER. DGRST. LAT, 1978.
- LEGOUPIL J.C / LIDON B • 1983 • POUR UNE NOUVELLE APPROCHE DES AMÉNAGEMENTS HYDROAGRIQUES. N° SPÉCIALE EUROPE OUTRE MER, N° 643-644, 1983.
- LEGOUPIL J.C • 1984 • RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT POUR UNE MEILLEURE CONCEPTION ET EXPLOITATION DES AMÉNAGEMENTS HYDROAGRIQUES. AGRONOMIE TROPICALE, 39.2, 1984.
- LEGOUPIL J.C • 1985 • RESEARCH-DEVELOPMENT FOR IMPROVEMENT IN CONCEPTION AND EXPLOITATION OF IRRIGATION PROJECT. WATER RESEARCH COMMISSION. RSA, 1985.
- LEGOUPIL J.C / SABATIER J.L • 1986 • L'IRRIGATION DE COMPLÈMENT, UNE ALTERNATIVE A LA SÉCHERESSE. AGRONOMIE TROPICALE 1986, EN COURS DE PARUTION.
- GOUZES R / LEGOUPIL J.C / LELANDIS F • 1985 • GROUNDWATER AND RURAL DEVELOPMENT IN SUB SAHARAN AFRICAN. 85 DCG 001 BRGM, SEPTEMBRE 1985.
- DESSELAS L / DUC T.M. • 1984 • MODÉLISATION DE SYSTÈMES DE CULTURES IRRIGUÉES EN ZONE CENTRE NORD SÉNÉGAL. ÉVALUATION AGROÉCONOMIQUE DU PROJET FERME IRRIGUÉE BAMBEY. DGRST LAT, 1984.
- COMMANS P • 1971 • L'ARROSAGE DES PÉPINIÈRES DE PALMIER A HUILE EN SACS DE PLASTIQUE. OLÉAGINEUX, 26, 5, PP. 295-303.
- TCHIBOZO H.M / DE TAFFIN G • 1972 • UTILISATION DE LA TECHNIQUE DES FORAGES PONCTUELS POUR L'IRRIGATION D'UNE COCOTERAIE AU SUD-DAHOMEY. OLÉAGINEUX, 27, PP. 429-432.
- DE TAFFIN G / DANIEL C • 1976 • PREMIERS RÉSULTATS D'UN ESSAI D'IRRIGATION LENTE SUR PALMIER A HUILE (F-A). OLÉAGINEUX, 31, 10, PP. 413-421.
- CHAILLARD H / DANIEL C / HOUETO V / OCHS R • 1983 • L'IRRIGATION DU PALMIER A HUILE ET DU COCOTIER. « EXPÉRIENCE » SUR 900 HA EN RÉPUBLIQUE POPULAIRE DU BÉNIN. OLÉAGINEUX, 38, 10, PP. 520-534.

Documents généraux

- RÉSULTATS DE L'IRFA SUR LES BESOINS EN EAU DE L'ANANAS DANS « L'ANANAS SA CULTURE ». ÉDITÉ PAR MAISONNEUVE ET LA-ROZE.
- LA CULTURE DE L'ANANAS D'EXPORTATION EN CÔTE D'IVOIRE • (MANUEL DU PLANTEUR).
- VALORISATION AGRICOLE DES RESSOURCES PLUVIOMÉTRIQUES • (1983) • CIEH-IRAT • (ATELIER OUA DAOUGOU).
- RELATION EAU/SOL/PLANTE • BIOCLIMATOLOGIE • IRRIGATION • BILAN DES TRAVAUX • 1975 • (AGRONOMIE TROPICALE 30.2, 1975).
- OCHS R / DANIEL C • 1976 • RESEARCH ON TECHNIQUES ADAPTED TO DRY REGION IN OIL PALM RESEARCH. ÉDITÉ CHEZ CORLEY, HARDON WOOD, CHAP. 23, PP. 315-329.
- LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE, POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE • 1985 • 400 RÉFÉRENCES. ACTE DU COLLOQUE R₃S DAKAR.

