

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.

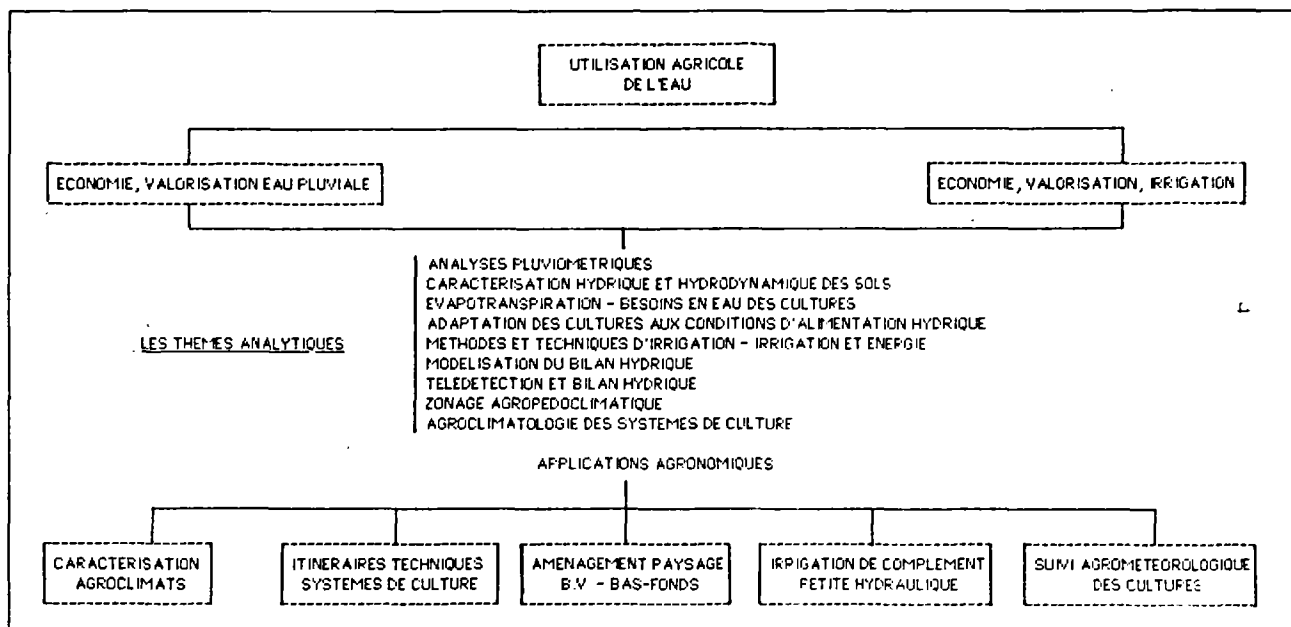


Tableau 1 : Thèmes de recherche et finalités de l'utilisation agricole de l'eau  
*Research topics and finalities in the agricultural use of water*

### 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.

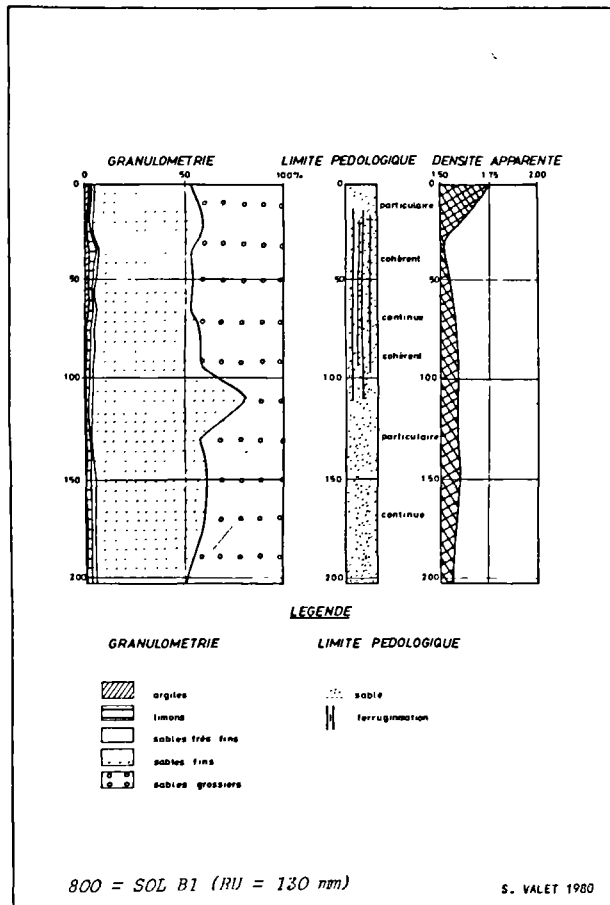


Fig. 1. Sona 800 - sol peu évolué  
Sona 800 - little developed soil

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).

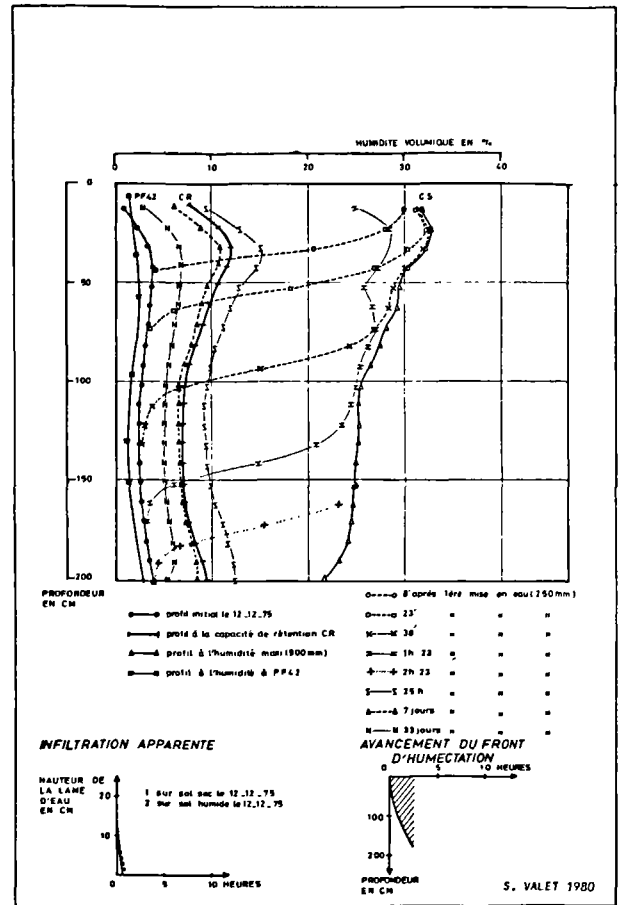


Fig. 2. Sona cinétique tube 800 - profils hydriques  
Sona kinetic tube 800 - water profiles



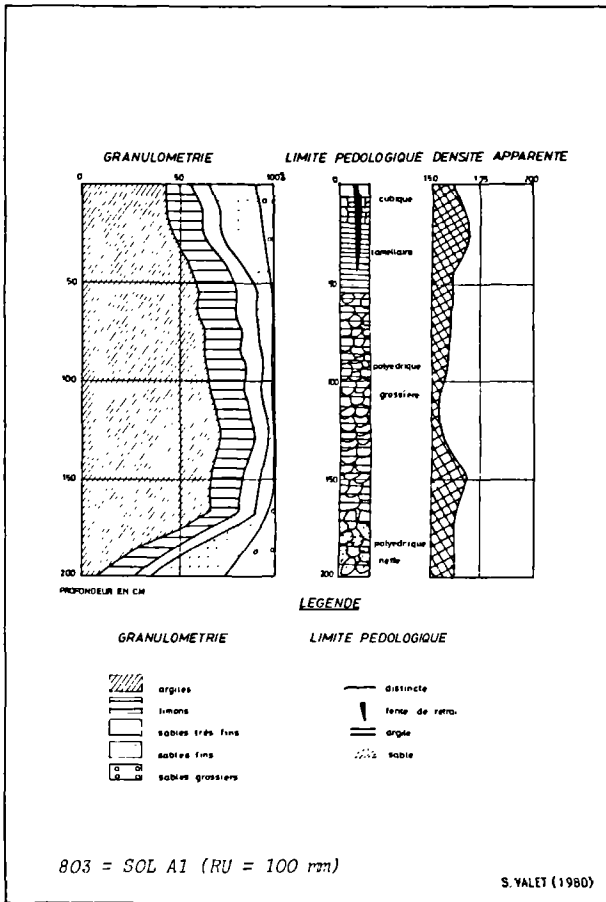


Fig. 3. Sona 803 - vertisol  
Sona 803 - vertisol

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

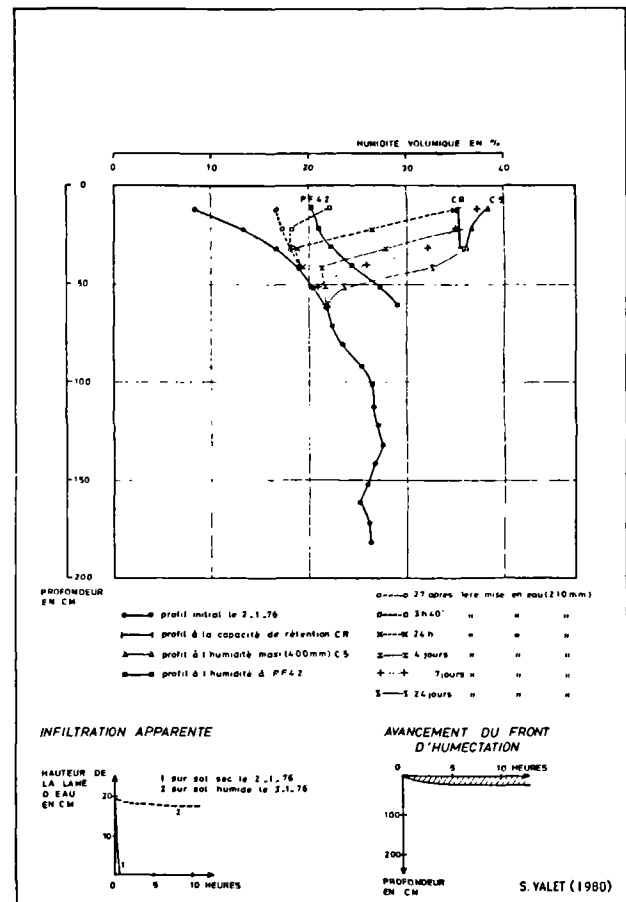


Fig. 4. Sona cinétique tube 803 - profils hydriques  
Sona kinetic tube 803 : water profiles

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  $K = ETM/EY$  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 :  $(P - RUI - DR - ETR + I \pm R SOL = 0)$  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  $K = ETM/EY$  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:  $(R - RUN = DR - ETR + I \pm RSOIL = 0)$  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);
- agroeconomic 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 m<sup>3</sup> 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 proposables 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	
<b>TOTAL</b>		<b>7</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>46</b>

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
<b>TOTAL</b>		<b>6</b>	<b>17</b>		<b>10</b>	<b>36</b>

## 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 – Prédications 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 multilocaux 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 lumière des difficultés associées avec l'expérimentation avec cette technique avec cultures pérennes en plantation à l'échelle industrielle (besoin de grandes surfaces pour limiter les effets d'oasis, difficulté de gérer indépendamment des expériences au sein de blocs industriels irrigués) ;

— en ce qui concerne la physiologie de l'alimentation en eau du palmier, des études complètes et coordonnées doivent être menées sur la répartition de l'eau dans le sol en fonction des techniques, modes et fréquences de fourniture, le développement du système racinaire, la régulation stomatique, la température des feuilles, la photosynthèse, etc. Les études réalisées ont montré que, en ce qui concerne la réaction de l'arbre à l'irrigation, le concept d'ouverture stomatique était un bon indicateur de la qualité de l'alimentation en eau de l'arbre sous réserve d'être interprété en fonction de facteurs climatiques tels que l'hygrométrie ;

— 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 de la plantation, et si oui, dans quelles conditions ;

— en ce qui concerne l'agronomie, un effort doit être fait pour identifier toutes les solutions qui pourraient améliorer la relation entre revenus et coûts pour une plantation irriguée de palmier : type de matériel végétal, densité de plantation, fertilisation, mélange de cultures ;

— en ce qui concerne la technologie de l'irrigation, des études doivent être poursuivies et rationalisées sur les techniques de fourniture de l'eau, les méthodes de distribution (particulièrement en ce qui concerne les mérites ou inconvénients de l'arrosage journalier), les matériels concernés, et les sources possibles d'énergie (utilisation des déchets par gazéification).

Des recherches coordonnées pour déterminer les meilleures voies pour l'application du palmier irrigué en milieu paysan : aspects sociologiques, techniques, économiques et financiers.

## Conclusion générale

Les réalisations de la Recherche Agronomique Tropicale Française dans les domaines de l'utilisation agricole de l'eau sont importantes et significatives. La base technique et scientifique disponible est essentiellement dédiée à l'identification des relations qui existent ou sont susceptibles d'exister entre le climat d'une zone et son agriculture, ainsi qu'à l'analyse des mécanismes d'actions des facteurs climatiques, biologiques et édaphiques dans la relation Production-Alimentaire hydrique.

Ces réalisations de la recherche permettent 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 lumière des difficultés associées avec l'expérimentation avec cette technique avec cultures pérennes en plantation à l'échelle industrielle (besoin de grandes surfaces pour limiter les effets d'oasis, difficulté de gérer indépendamment des expériences au sein de blocs industriels irrigués) ;

— en ce qui concerne la physiologie de l'alimentation en eau du palmier, des études complètes et coordonnées doivent être menées sur la répartition de l'eau dans le sol en fonction des techniques, modes et fréquences de fourniture, le développement du système racinaire, la régulation stomatique, la température des feuilles, la photosynthèse, etc. Les études réalisées ont montré que, en ce qui concerne la réaction de l'arbre à l'irrigation, le concept d'ouverture stomatique était un bon indicateur de la qualité de l'alimentation en eau de l'arbre sous réserve d'être interprété en fonction de facteurs climatiques tels que l'hygrométrie ;

— 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 de la plantation, et si oui, dans quelles conditions ;

— en ce qui concerne l'agronomie, un effort doit être fait pour identifier toutes les solutions qui pourraient améliorer la relation entre revenus et coûts pour une plantation irriguée de palmier : type de matériel végétal, densité de plantation, fertilisation, mélange de cultures ;

— en ce qui concerne la technologie de l'irrigation, des études doivent être poursuivies et rationalisées sur les techniques de fourniture de l'eau, les méthodes de distribution (particulièrement en ce qui concerne les mérites ou inconvénients de l'arrosage journalier), les matériels concernés, et les sources possibles d'énergie (utilisation des déchets par gazéification).

Des recherches coordonnées pour déterminer les meilleures voies pour l'application du palmier irrigué en milieu paysan : aspects sociologiques, techniques, économiques et financiers.

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 R<sub>3</sub>S (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 R<sub>33</sub> 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. REVIWING 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 AGROCLIMATICO PARA LA PRODUCCIÓN DE CANA DE AZUCAR (SACCHARUM OFFICINARUM, L.) EN COSTA RICA. *TURRIALBA* 33 (1) 1-10.
- ROJAS O / ELDIN M • 1983 • ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA PARA EL CULTIVO DE CANA DE AZUCAR 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 ILES 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 / GUILLOT 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 PHOTOSYNTHESE. *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 / FRETEAU 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<sup>e</sup> 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. WILEY 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. ICRISAT 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 R<sub>3</sub>S DAKAR.