

FERTILITÉ DES SOLS ET FERTILISATION

DES CULTURES TROPICALES

L'EXPÉRIENCE DU CIRAD ET DE L'ORSTOM

CHRISTIAN PIERI
CIRAD

ROLAND MOREAU
ORSTOM

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

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

N° : F. 26 240 2x.3

Cpte : A

SOIL FERTILITY AND FERTILIZATION

OF TROPICAL CROPS

THE EXPERIENCE OF CIRAD AND ORSTOM

CHRISTIAN PIERI
CIRAD

ROLAND MOREAU
ORSTOM

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

Fertilité des sols et fertilisation des cultures tropicales

L'EXPÉRIENCE DU CIRAD ET DE L'ORSTOM

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

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

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

Élargir la notion de fertilité

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

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

Soil fertility and fertilization of tropical crops

THE EXPERIENCE OF CIRAD AND ORSTOM

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

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

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

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

The concept of fertility

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les résultats de la recherche et leurs applications

Des résultats publiés

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

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

Une méthodologie adaptée du milieu d'étude

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

Cette démarche comporte trois phases de recherche assez classiques :

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

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

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

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

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

Research results and their application

Published results

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

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

An adapted methodology

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

This procedure comprises three fairly classical research phases:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ALIMENTATION HYDRIQUE DES CULTURES : LE BILAN HYDRIQUE

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

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

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

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

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

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

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

WATER NUTRITION OF CROPS

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

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

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

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

DIAGNOSTIC DE TERRAIN : TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES ET ÉTUDES DE MILIEU

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TERRAIN DIAGNOSIS

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

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

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

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

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

- Large scale

- these are studies performed for specific land development purposes:

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

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

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

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

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

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

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

ANALYTICAL CHARACTERIZATION OF SOILS AND IDENTIFICATION OF "THRESHOLD VALUES"

A great many studies have been done by ORSTOM and

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

CARACTÉRISATION ANALYTIQUE DES SOLS ET IDENTIFICATION DE « VALEURS SEUILS »

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

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

• Caractéristiques et contraintes physiques

Les travaux ORSTOM et CIRAD ont porté sur :

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

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

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

• Caractéristiques et contraintes chimiques

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

– Carence en azote :

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

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

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

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

• Physical properties and constraints

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

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

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

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

• Chemical properties and constraints

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

– *Nitrogen*

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

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

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

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

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

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

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

— Méthodes de dosage du phosphore :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

cropping system and organic dressings.

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

— Phosphorous

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

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

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

— Potassium, exchangeable bases, pH

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

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

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

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

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

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

ENVIRONMENTAL ZONING USING TEST CROP BEHAVIOR SURVEYS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ces équilibres sont les suivants :

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

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

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

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

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

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

SHORTCOMINGS OF PHYSICAL ENVIRONMENT DIAGNOSES

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

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

These balances are the following:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FUMURES DE REDRESSEMENT ET FUMURES D'ENTRETIEN

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

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

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

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

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

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

Fertilizer needs, nutrition control of crops and fertilization programming

CORRECTIVE FERTILIZERS

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

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

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

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

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

FOLIAR DIAGNOSIS: EXAMPLE OF OIL PALM

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

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

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

PALMIER A HUILE : PILOTAGE DES FUMURES PAR DIAGNOSTIC FOLIAIRE

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

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

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

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

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

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

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

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

CIRAD researchers over more than 25 years.

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

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

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

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

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

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

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

PROGRAMMING OF FERTILIZATION OF OTHER CROPS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Il est important de faire une dernière remarque concer-

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

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

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

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

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

FERTILIZATION AND WATER NUTRITION OF CROPS

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

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

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

Evolution of soils under cropping

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

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

Quels que soient les résultats obtenus par le diagnostic sol et le diagnostic plante il ne faut pas oublier que la distribution aléatoire des pluies est une condition déterminante de l'efficacité et de la rentabilité d'une fumure. On peut donc être amené à préconiser des fumures réduites. Celles-ci ne permettent pas d'exprimer tout le potentiel de la culture dans le cadre du système technique où elle est pratiquée. Elles s'avèrent cependant économiquement acceptables à court terme, et plus sécurisantes pour l'agriculteur, qui obtiendra une production stable sur le moyen terme (résultats obtenus au Burkina Faso).

A l'inverse on peut être amené à préconiser un apport complémentaire en un élément même si celui-ci n'apporte qu'une faible plus-value de rendement, dans la mesure où, comme dans le cas de la fumure potassique du mil au Sénégal, on observe une réduction de fluctuations interannuelles des niveaux de production (Pieri, 1983).

Évolution des sols sous culture

De très nombreux travaux ont été menés par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD sur ce thème dont l'importance est primordiale en zone tropicale.

Cela mériterait de longs développements qui mettraient notamment en évidence la grande diversité des situations agricoles et des risques de dégradation des terres agricoles : la démographie et la pression foncière (surface cultivée/surface cultivable), les flux migratoires très importants en Afrique de l'Ouest, la concentration périurbaine, la demande en bois de chauffe et la déforestation, le surpâturage et toutes les autres conditions de l'environnement socio-économique sont, en effet, susceptibles de rendre non reproductibles les systèmes traditionnels de gestion de l'espace.

Ces travaux ont porté sur les systèmes suivants :

- systèmes traditionnels ou semi-mécanisés en cultures vivrières : au Sénégal, en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso, au Niger, au Cameroun, au Togo, en RCA, en Guyane, en Haïti, en Amazonie équatorienne, etc. ;
- cultures industrielles : bananier en Côte d'Ivoire, canne à sucre au Burkina Faso, à l'île Maurice, dans les Caraïbes (en cours), cotonnier en Côte d'Ivoire ;
- systèmes sylvicoles : au Congo, en Côte d'Ivoire, au Sénégal ;
- systèmes agro-pastoraux, en région sahélienne.

Toutes ces études ont montré que les systèmes traditionnels manuels, basés sur la culture itinérante et les longues jachères, sont évidemment moins perturbateurs des états du sol que les systèmes en cours de modernisation.

Cependant, en agriculture de plantation les travaux effectués par l'IRHO et l'ORSTOM permettent de conclure à une évolution vers un nouvel équilibre biologique favorable à la culture, sans dégradation irréversible de l'environnement (Olivin, 1980), bien qu'il faille pallier les effets de tassement mécanique des sols (IRHO). Sous hévéa, la situation serait encore plus favorable, cette culture pouvant même être considérée comme régénératrice de la fertilité des sols (IRCA).

Par contre la situation est beaucoup plus préoccupante dans les conditions d'une agriculture paysanne stabilisée (Charreau, 1972). Sans parler de catastrophe ou de « banqueroute » de l'environnement, des manifestations évidentes de dégradation des terres existent, dès que la densité de population rurale dépasse 40 à 60 hab/km².

This is a subject that deserves protracted treatment. It would highlight, for example, the great diversity of farming situations and of the land degradation risks in the farming world, having regard to: population and land pressure (cultivated/cultivable area); the very large migration flows in West Africa; peri-urban concentration, firewood demand and deforestation; overgrazing, and all the other aspects of the socioeconomic environment that can render traditional space management systems non-reproducible.

The work referred to has covered the following systems:

- traditional or semimechanized systems in food-crop cultivation: in Senegal, Ivory Coast, Burkina Faso, Niger, Cameroon, Togo, Central African Republic, Guyana, Haiti, Equatorial Amazonia, etc.;
- industrial crops: bananas in Ivory Coast sugar cane in Burkina Faso, Mauritius, Caribbean (in process), cotton in Ivory Coast;
- forestry systems: Congo, Ivory Coast, Senegal;
- crops/pasture combination, in the Sahel region.

All these studies have shown that the traditional manual systems, based on itinerant cultivation and long fallowing, apparently disturb soil conditions less than do the systems in process of modernization.

However, in plantation agriculture the studies done by IRHO and ORSTOM point to an evolution toward a new biologic equilibrium favorable to cropping, without irreversible degradation of the environment (Olivin, 1980), although it is necessary to alleviate the effects of mechanical compacting of the soil (IRHO). The situation would be even more favorable under hevea, a crop that can even be regarded as a soil fertility regenerator (IRCA).

On the other hand, the situation is much more worrying under the conditions of stabilized small-farmer agriculture (Charreau, 1972). Without speaking of catastrophe, or of "bankruptcy" of the environment, clear manifestations of land degradation appear as soon as the rural population density exceeds 40-60 persons/km².

Four processes underlie this degradation:

- breakdown of soil structure (soil destruction);
- erosion;
- organic impoverishment;
- acidification and mineral imbalances.

STRUCTURAL BREAKDOWN OF CROPPING PROFILES

Structure and structural stability are among the properties most sharply altered by cropping, generally being accompanied by degradation of physical properties in relation to the natural state — porosity, density, permeability, etc. — with very sharp variations in the value of these parameters in the cropping profile.

While the ferruginous soils appear to be most fragile ones (Fauck, Moureaux and Thomann, 1960), the ferralitic soils are also affected (Boyer and Combeau, 1960; De Blic and Moreau, 1979; Cointepas and Makilo, 1982). Irrigation accentuates the process (Combeau and Monnier, 1961). Structural stability is related to the rate of organic material contained in the soil (Martin, 1963; Combeau and Quantin, 1964), which decreases under the effect of cropping. But simple *breaking up or loosening* of the soil also increases the sensitivity of the aggregates to the action of infiltration water, leading to very rapid structural degradation, in savannah and forest soils of Ivory Coast (Moreau, 1978). The iron-clay linkages favor aggregation (Martin, 1963; Chauvel and Monnier, 1967; Combeau, 1964). It has been shown that the sudden alternation of

Quatre processus sont surtout à l'origine de cette dégradation :

- la destructuration des sols ;
- l'érosion ;
- l'appauvrissement organique ;
- l'acidification et les déséquilibres minéraux.

DESTRUCTURATION DES PROFILS CULTURAUX

La structure et sa stabilité comptent parmi les caractéristiques les plus fortement modifiées par la mise en culture, s'accompagnant généralement d'une dégradation des propriétés physiques par rapport à l'état naturel : porosité, densité, perméabilité..., avec des variations brutales de la valeur de ces paramètres dans le profil cultural.

Les sols *ferrugineux* apparaissent les plus fragiles (Fauck, Moureaux et Thomann, 1960) mais les sols ferrallitiques sont également affectés (Boyer et Combeau, 1960 ; De Blic et Moreau, 1979 ; Cointepas et Makilo, 1982). L'irrigation accentue le phénomène (Combeau et Monnier, 1961). La stabilité structurale se trouve en relation avec le taux de *matière organique* du sol (Martin, 1963 ; Combeau et Quantin, 1964) qui diminue sous l'effet de la mise en culture. Mais le simple *ameublissement* du sol accroît aussi la sensibilité des agrégats à l'action de l'eau d'infiltration, conduisant à une dégradation très rapide de la structure, dans des sols de savane et forestiers de Côte d'Ivoire (Moreau, 1978). Les liaisons fer-argile favorisent l'agrégation (Martin, 1963 ; Chauvel et Monnier, 1967 ; Combeau, 1964). Il a été montré que l'alternance brutale d'humectation et dessiccation consécutive au défrichage, particulièrement dans les zones forestières à climat contrasté, entraînent la rupture des *liaisons fer-argile* (ultradessiccation), la destruction des agrégats et l'effondrement des structures (Chauvel, 1977).

Toutes ces données expliquent la grande difficulté d'améliorer de façon durable la stabilité structurale dans les sols cultivés. On ne peut qu'essayer de la maintenir à un niveau acceptable en renforçant le rôle favorable de certains facteurs (matière organique, activité racinaire) et en limitant au mieux les processus de dégradation (bonne couverture du sol, limitation du travail du sol...)

Le *labour* agit favorablement sur le rendement, en particulier pour les sols de la zone soudano-sahélienne les plus mal structurés (Charreau et Nicou, 1971 ; Dabin, 1969) ; il favorise également l'enracinement des plantes dans les sols dégradés des zones plus humides (ananas en basse Côte d'Ivoire, par exemple). Du fait de l'augmentation de perméabilité, l'érosion se trouve temporairement réduite par le labour (quelques semaines), mais le phénomène se trouve plutôt accru par la suite ; toutefois, la première période peut être mise à profit pour l'installation d'une culture qui protégera ensuite le sol (Roose, 1981). A condition de respecter certaines règles, le danger relatif à l'érosion résultant d'un labour à la charrue n'apparaît pas plus grand que dans le cas du travail manuel (Verney et Willaime, 1965 ; Dabin, 1954). Cependant la mécanisation accentue les risques de dégradation structurale et de compaction dans le profil cultural pouvant entraîner localement des phénomènes d'asphyxie (Ange, 1984).

ÉROSION

L'importance du phénomène d'érosion a très tôt retenu l'attention des chercheurs de l'ORSTOM et du CIRAD. Dès les *années 50*, a commencé l'installation d'un *réseau de dispositifs de mesure* (cases d'érosion puis lysimètres,

humectation and desiccation following upon land clearance, particularly in contrasted-climate forest zones, entails rupture of *iron-clay linkages* (ultra-desiccation), destruction of aggregates and collapse of structures (Chauvel, 1977).

These data together explain the great difficulty of durably improving structural stability in cultivated soils. One can only try to maintain it at an acceptable level by strengthening the favorable role of certain factors (organic material, root activity) and limiting the degradation processes so far as possible (ensuring good coverage and limited working of the soil, and so on).

Tilling has a favorable effect on yields, particularly for the most poorly structured soils of the Sudan-Sahel zone (Charreau and Nicou, 1971 ; Dabin, 1969). It also promotes root development of the plants in the degraded soils of the more moist zone (pineapples in Lower Ivory Coast, for example). By increasing permeability, tilling reduces erosion temporarily (for a few weeks) but the process tends to accentuate subsequently. However, advantage can be taken of the first period to plant a crop that will later protect the soil (Roose, 1981). Provided that certain rules are respected, the erosion risk appears to be no greater with plowing than with manual work (Verney and Willaime, 1965 ; Dabin, 1954). However, mechanization accentuates the risks of structural degradation and compacting in the cropping profile and can locally generate asphyxiation processes (Ange, 1983).

EROSION

The attention of ORSTOM and CIRAD researchers was attracted to the erosion phenomenon at a very early stage. From the 1950s, the installation began of a *network of measuring devices* (erosion frames, then lysimeters, measurement of oblique drainage, etc.), which has been extended to the various bioclimatic zones of West Africa (Dabin and Leneuf, 1958 ; Cointepas, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967 a and b). Following observations extending over many years, these studies have been published in long compilations, of which we can only briefly summarize some of the results (Roose, 1973, 1977, 1981, 1983 ; Fauck and Charreau, 1976).

The potential erosivity of the environment (rainfall aggressivity) is 3-60 times as high in West Africa as in temperate regions. Erosion remains low under natural vegetation but can be multiplied up to 1,000-fold when the land is put under crops. Under similar climatic conditions it is higher in West Africa than in Brazil, a fact connected with the more mediocre physical properties of the African soils (Leprun, 1985).

Erosion impoverishes the soil principally in its fine-particles phase, which is the true support of soil fertility (organic matter, mineral elements); phosphorous losses (apart from P withdrawal by crops) are due essentially to erosion. Biological anti-erosion techniques (associated with the state of coverage of the soil) appear to be more efficacious and less costly than mechanical methods in limiting erosion, particularly in moist zones (Roose, 1981). Various possibilities have been studied. The role of tilling in erosion control has already been mentioned.

With the aid of *rainfall simulators*, ORSTOM is currently extending its work on the behavior of watered soils and their erosion resistance in relation to cultivation practices in the Mediterranean area and in Latin America (Brazil, Mexico, Ecuador).

mesure du drainage oblique...) qui s'est étendu aux différentes zones bioclimatiques de l'Afrique de l'Ouest (Dabin et Leneuf, 1958 ; Cointepas, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967 a et b).. Après de longues années d'observations, ces travaux ont fait l'objet de larges synthèses dont on ne peut qu'évoquer succinctement quelques résultats (Roose, 1973, 1977, 1981, 1983 ; Fauck et Charreau, 1970).

L'érosivité potentielle du milieu (agressivité des pluies) est de 3 à 60 fois supérieure en Afrique de l'Ouest qu'elle n'est en région tempérée. L'érosion reste faible sous végétation naturelle mais peut être multipliée par un coefficient de l'ordre de 1 000 à la suite de la mise en culture. Sous conditions climatiques semblables, elle s'avère plus élevée en Afrique de l'Ouest qu'au Brésil, en liaison avec les caractéristiques physiques plus médiocres des sols africains (Leprun, 1985).

L'érosion appauvrit le sol préférentiellement en particules fines, réel support de la fertilité (matière organique, éléments minéraux) ; ainsi les pertes en phosphore, autres que les exportations par les cultures, sont essentiellement dues à l'érosion. Les techniques anti-érosives biologiques (liées à l'état de la couverture du sol) apparaissent plus efficaces et moins onéreuses que les méthodes mécaniques pour limiter l'érosion, particulièrement en zone humide (Roose, 1981). Différentes possibilités ont été étudiées dans ce domaine. Le rôle du labour pour contrôler l'érosion a déjà été évoqué plus haut.

A l'aide de *simulateurs de pluie* l'ORSTOM étend actuellement ses travaux sur le comportement des sols à l'eau et leur résistance à l'érosion en relation avec les pratiques culturales, en zone méditerranéenne et en Amérique latine (Brésil, Mexique, Equateur).

APPAUVRISSMENT ORGANIQUE ET BILAN AZOTÉ

D'importantes données ont été obtenues sur la connaissance quantitative et qualitative de la matière organique du sol et celle des conditions et facteurs de son évolution en milieu tropical. Plusieurs ouvrages et travaux de synthèse ont été publiés : Dommergues, 1970 ; Perraud, 1971 ; Bachelier, 1972, 1973, 1978 ; Mouraret, 1965 ; Rinaudo, 1973.

Sous l'effet de la mise en culture le stock organique diminue rapidement au cours des premières années pour atteindre un palier plus ou moins élevé selon les conditions de milieu et le mode d'exploitation (Fauck, Moureaux et Thomann, 1969 ; Feller et Milleville, 1977 ; Cointepas et Makilo, 1982). Sous culture intensive, les pertes peuvent facilement dépasser 50 % du stock initial, tandis qu'elles sont beaucoup plus modérées ou même inexistantes sous culture traditionnelle itinérante en zone forestière (Moreau, 1983 ; Turenne, 1977). Ces pertes en matière organique découlent du déséquilibre biologique auquel s'ajoutent les exportations par érosion, lessivage et minéralisation accrues (augmentation de température, alternances dessiccation/humectation, variation de pH, travail du sol : Bachelier, 1968 ; Dommergues, 1960 a et b ; Moureaux, 1967). Elles expliquent, au moins pour une bonne part, la dégradation de plusieurs caractéristiques importantes du sol liées à la matière organique : stabilité structurale, capacité d'échange.

Les études expérimentales réalisées par l'IRAT (Ganry, Pichot, Chabalière, Gigou) et l'IRCT sur le maintien de la fertilité azotée et organique des sols cultivés en zone de savane ouest-africaine soulignent l'intérêt des fumures organiques et minérales associées, ce qui soulève le délicat

ORGANIC IMPOVERISHMENT AND NITROGEN BALANCE

Important quantitative and qualitative data have been gathered on organic matter in soil and the conditions and factors that govern its evolution in a tropical environment. A number of studies and compilations have been published: De Boissezon et al., 1973; Dommergues, 1970; Perraud, 1971; Bachelier, 1972, 1973, 1978; Mouraret, 1965; Rinaudo, 1983.

Under the effect of cropping, the stock of organic material decreases rapidly during the first few years then stabilizes at a more or less high level depending on environmental conditions and type of farming (Fauck, Moureaux and Thomann, 1969; Feller and Milleville, 1977; Cointepas and Makilo, 1982). Under intensive cropping the losses can easily exceed 50 % of initial stock, whereas they are much more moderate or even zero in forest areas in the absence of traditional shifting cultivation (Moreau, 1983; Turenne, 1977). The losses of organic material stem from biologic imbalance, aggravated by withdrawals due to incremental erosion, leaching and mineralization (temperature increase, desiccation/humectation alternations, pH changes, tilling: Bachelier, 1968; Dommergues, 1960 a and b; Moureaux, 1967). These losses explain, at least in large part, the degradation of certain important soil characteristics linked to organic matter: structural stability, exchange capacity.

Experimental studies have been conducted by IRAT (Ganry, Pichot, Chabalière, Gigou) and IRCT concerning maintenance of the nitrogen and organic fertility of cultivated soils in the savannah zone of West Africa. They highlight the value of combined organic and mineral fertilization; this raises the delicate problem of the combination farming/stockraising (Burkina Faso, Mali, Senegal).

On the other hand, simple burial of green fertilizer, harvest residues and fallow grasses does not suffice to maintain a soil's humic stock, at least under annual-crop conditions: in the absence of a long fallowing period, the mineralization-humification balance shifts systematically toward mineralization.

An ORSTOM and CIRAD/IRAT team has been doing research for a number of years on *biologic nitrogen fixation*.

These studies concern ways of optimizing nitrogen fixation in order to reduce nitrogen fertilizer consumption. Research is already well advanced on two types of symbiotic associations on which pre-extension trials are being conducted in the field:

- use of cauline nodulation legumes (Sesabania and Aeschynomene-Rhizobium) in rice cultivation in Casamance and in the Senegal River region;
- inoculation and selection of nitrogen-fixing trees (casuarinaceae frankia) in tropical forestry in the Dakar region.

For food legumes that need specific rhizobium inoculation, IRAT-CIRAD has developed a fermenter with which inocula for legumes can be obtained under good conditions (soya, beans, cowpeas, etc.), which is currently being distributed with FAO assistance in more than 12 tropical countries (Bangladesh, Butan, Brazil, Burundi, Colombia..., Viet Nam, Zaire).

In conclusion, *an essential component of maintenance of the fertility of tropical soils is maintenance of their humic status.*

Satisfactory results have been obtained in the moist tropical zone, particularly in plantation agriculture (see IRHO and IRCA studies), through the use of cover plants

problème de l'association agriculture élevage (Burkina Faso, Mali, Sénégal, Tchad).

Par contre les simples enfouissements d'engrais vert, résidus de récolte et herbes de jachère ne permettent pas le maintien du stock humique des sols, du moins dans les conditions de cultures annuelles : en l'absence de longues périodes de jachère l'équilibre minéralisation-humification est systématiquement déplacé vers le pôle minéralisation.

Depuis quelques années des recherches sont réalisées dans le domaine de la *fixation biologique de l'azote* par une équipe de l'ORSTOM et du CIRAD/IRAT.

Ces travaux portent sur les moyens d'optimiser la fixation d'azote pour réduire la consommation d'engrais azoté. D'ores et déjà les recherches sont suffisamment avancées pour 2 types d'associations symbiotiques qui font l'objet d'expérimentations de pré vulgarisation au champ :

- utilisation des légumineuses à nodulation caulinaire (Sesbania et Aeschynomene - Rhizobium) en riziculture, en Casamance et dans la région du fleuve Sénégal ;
- inoculation et sélection d'arbres fixateurs d'azote (caesariinacées - frankia) en foresterie tropicale, dans la région de Dakar.

Pour les légumineuses alimentaires nécessitant une inoculation de rhizobium spécifique, l'IRAT-CIRAD a mis au point un fermenteur permettant d'obtenir dans de bonnes conditions des inoculum pour légumineuses (soja, haricot, niébé, etc.) qui est diffusé actuellement dans plus de 12 pays tropicaux avec le concours de la FAO (Bangladesh, Buthan, Brésil, Burundi, Colombie, Viet Nam, Zaire...).

En conclusion, le *maintien du statut humique des sols tropicaux est une composante essentielle* du maintien de la fertilité édaphique.

Or, si en zone tropicale humide, et particulièrement en agriculture de plantation, des résultats satisfaisants ont été obtenus (voir travaux IRHO et IRCA) grâce à des plantes de couverture et aux restitutions organiques, il n'en est pas de même en zone semi-aride. Les travaux du CIRAD montrent qu'un tel équilibre ne peut être obtenu qu'à la condition d'associer *fertilisation minérale, restitutions organiques* (fumiers, compost) et *amélioration de la fixation biologique N₂* par des légumineuses.

ACIDIFICATION ET DÉSÉQUILIBRES MINÉRAUX

Par rapport au milieu naturel, la mise en culture induit un déséquilibre des bilans hydrique et minéraux. En absence de fertilisation les bilans minéraux sont évidemment toujours négatifs (Fauck, Moureaux et Thomann, 1969 ; Charreau et Fauck, 1970 ; Roose, 1981 ; Cointepas et Makilo, 1982). L'eau de drainage, dont la quantité peut s'accroître sous culture (diminution de l'ETR, efficacité de la lutte anti-érosive limitant le ruissellement), entraîne les éléments les plus mobiles : N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄, avec une tendance à l'*acidification* d'autant plus rapide que les engrais utilisés ont eux-mêmes une action acidifiante (azote, sulfates, chlorures). Ceci s'observe même en conditions de climat semi-aride où l'intensité de la minéralisation de la matière organique libérant des quantités élevées de nitrates en début de saison des pluies, peut fortement accroître les pertes par lixiviation (Pieri 1983).

Les sols tropicaux (ferralitique, ferrugineux) retiennent mal les engrais à l'exception des phosphates (en raison de leur nature minéralogique : kaolinite, oxy-hydroxydes de fer et d'alumine), particulièrement dans les zones humides. Ainsi en bananeraies fortement fertilisées les pertes

and organic restitution. The same cannot be said, however, of the semiarid zone. CIRAD's studies have shown that such an equilibrium can be obtained only with a combination of *mineral fertilization, organic restitution* (manure, compost) and *improvement of biologic N₂ fixation* by legumes.

ACIDIFICATION AND MINERAL IMBALANCES

In relation to the natural environment, putting land under crops disrupts the water and mineral balances. In the absence of fertilization, mineral balances are evidently always negative (Fauck, Moureaux and Thomann, 1969; Charreau and Fauck, 1969; Roose, 1981; Cointepas and Makilo, 1982). The drainage water, whose quantity can increase under crops (reduction in real evapotranspiration, effectiveness of anti-erosion measures for limiting runoff) washes away the most mobile elements (N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄) with a tendency to acidification, a tendency that is all the more rapid since the fertilizers used themselves have an acidifying action (nitrogen, sulphates, chlorates). This is observed even under semiarid climatic conditions, in which the intensive mineralization of organic matter, releasing large quantities of nitrates at the beginning of the rainy season, can sharply increase leaching (Pieri, 1984).

The tropical soils (ferralitic, ferruginous) do not retain fertilizers well, except for phosphates (by reason of their mineralogical nature — kaolinite, iron and aluminum hydroxides), particularly in moist zones. Thus, in highly fertilized banana plantations the leaching losses can widely exceed 50 % of the applications for nitrogen, potassium and the amendments Ca and Mg (lime, dolomite) but do not exceed 10 % for phosphorous (Roose and Godefroy, 1968; Roose, 1981). Fertilization must therefore be based on the application of low, frequently repeated, doses of fertilizer adapted to the conditions of the various crops, without neglecting the element Ca and Mg in order to counter the disadvantages of acidification over the more or less long term.

General conclusion

The French tropical agronomic research agencies have built up a stock of knowledge and know-how which has been applied directly at the development level and has resulted in substantial improvements in production and yields for all the crops concerned: oil palm/coconut, tropical citrus and other fruits, coffee, cocoa, cotton, food plants, sugar cane, and so on.

Fertilization has been one of the "levers" of that production growth. IRHO's recommendations are being applied on a million hectares of land all over the world, and those of IRFA and IRCC on several hundred thousand hectares; IRCT's fertilization calculations are being followed on 78 % of Africa's cottonlands; and so on. In the case of food crops the most significant results have been obtained by IRAT on rainfed rice in Brazil and on maize in a number of African countries and Madagascar, though with difficulties associated with lack of market and very unfavorable price relationships for these on-farm consumption products.

Thanks to their long-duration trial and observation networks and to their insertion into the very fabric of agricultural production (and) development research, these agen-

par lixiviation peuvent largement dépasser 50 % des apports pour l'azote, le potassium et les amendements Ca et Mg (chaux, dolomie) mais n'excèdent pas 10 % pour le phosphore (Roose et Godefroy, 1968 ; Roose, 1981). La fertilisation doit donc être basée sur l'apport de faibles doses d'engrais souvent répétées, adaptées aux conditions des différentes cultures, sans négliger les éléments Ca et Mg afin de s'opposer aux inconvénients de l'acidification à plus ou moins long terme.

Conclusion générale

Les organismes français de recherche agronomique tropicale ont accumulé un capital de connaissances et de savoir faire qui a été directement appliqué au niveau du développement et a entraîné des améliorations de production et de rendements substantiels pour l'ensemble des cultures concernées : palmier à huile-cocotier, fruits et agrumes tropicaux, café, cacao, cotonnier, plantes vivrières, canne à sucre...

La fertilisation a été un des leviers de cet accroissement de production. Les recommandations de l'IRHO sont appliquées sur un million d'hectares dans le monde, celles de l'IRFA et de l'IRCC sur plusieurs centaines de milliers d'hectares, 78 % des superficies cotonnières en Afrique reçoivent une fumure calculée d'après les recommandations de l'IRCT, etc. Dans le domaine des cultures vivrières les résultats les plus significatifs ont été obtenus par l'IRAT sur le riz pluvial au Brésil et sur maïs en plusieurs pays d'Afrique et de Madagascar, avec cependant des difficultés liées à l'absence de marché et aux rapports de prix très défavorables pour ces spéculations autoconsommées.

Grâce à leurs réseaux d'expérimentation et d'observations de longue durée, grâce à leur insertion dans le tissu même de la production agricole, de la recherche au développement, ces organismes ont privilégié la diffusion de techniques adaptées aux conditions réelles de la production et aux possibilités d'évolution de ces dernières.

Mais ces réseaux ont très tôt attiré l'attention des agronomes et spécialistes de science du sol, *moins sur la pauvreté des sols*, somme toute très relative et en tout cas facilement améliorable par amendements et engrais minéraux, que sur *leur fragilité*, dès que l'on entre dans une agriculture stabilisée sans possibilité de jachère de longue durée.

L'érosion est la manifestation la plus catastrophique de cette fragilité, l'appauvrissement organique le plus insidieux car il facilite l'érosion par dégradation des propriétés physiques des sols, il entraîne une baisse d'efficacité des engrais minéraux et de l'activité microbiologique des sols. Or les voies de la stabilisation du statut humique à un niveau favorable ne sont pas évidentes à suivre, tout particulièrement dans les agricultures paysannes où dominent les cultures annuelles sans élevage intégré aux exploitations.

Potentiel de recherche

Le potentiel de recherche du CIRAD

L'effectif actuel du CIRAD en Agronomie et Connaissance et Amélioration du milieu est de 206 chercheurs

et ont favorisé la dissémination de techniques adaptées à la production réelle et à leur possible évolution au cours du temps.

Cependant, ces réseaux ont très vite attiré l'attention des agronomes et spécialistes de science du sol, *moins sur la pauvreté des sols*, qui après tout est très relative et dans tous les cas peut être améliorée par amendements et engrais minéraux, que sur *leur fragilité* dès qu'ils sont soumis à une agriculture stabilisée sans possibilité de long terme.

L'érosion est la manifestation la plus désastreuse de cette fragilité, et l'appauvrissement organique le plus insidieux, car elle facilite l'érosion en dégradant les propriétés physiques du sol et diminue l'efficacité des engrais minéraux et de l'activité microbiologique des sols. Il n'est pas encore clair par quoi est déterminé le statut humique du sol, mais il est évident qu'il peut être stabilisé à un niveau favorable, particulièrement dans les petites agricultures dans lesquelles les cultures annuelles sans élevage intégré prédominent.

Recherche capacité

Recherche capacité de CIRAD

As of October 1985 CIRAD's Environmental Agronomics, Knowledge and Improvement staff numbered 206 researchers. To these must be added about 100 national researchers, most of them African, who participate on the same footing as expatriates in the formulation and execution of research programs.

Of the CIRAD researchers, 75 % are in post overseas, the large majority in West Africa. Their distribution by research specialty is as follows: Bioclimatology / 10. Soil science / 27. Agronomics / 169. (Total 206).

It is considered that the soil science research staff spend 75 % of their time on soil studies relating to crop suitability and fertility evolution. The rest of their time (the equivalent of 20 researcher units) is devoted to methodology and soil inventory studies.

Similarly, while all the agronomists concern themselves with fertility maintenance and the development of crop-specific fertilization, CIRAD possesses:

- 22 chemical and organic soil fertility specialists;
- 9 physical fertility specialists;
- 2 teams of 4 researchers in microbiology applied to annual crops and forest species;
- a large group of researchers (20) who work part-time on the development of cropping systems that are economical in inputs, including two specialists in the manufacture of new fertilization products who work in collaboration with people in industry;
- the equivalent of 4 researcher units specializing in the combating of erosion.

There is a large team engaged in research on "water economics and utilization." The other agronomists all devote the bulk of their work to crop management.

Thus, in the area of fertility and fertilization under cropping conditions CIRAD deploys about 75 researcher units, to which must be added more than 30 researcher units from the African and Malagasy national institutes working in these fields.

However, this relatively large total has to be interpreted in relation to the 20 or so major crops on which the (Oct. 1985) auquel il convient d'ajouter environ

100 chercheurs nationaux, à majorité africains, qui participent au même titre que les expatriés à l'élaboration et à la réalisation de programmes de recherches.

75 % des chercheurs CIRAD sont en poste Outre-Mer, avec une forte majorité localisée en zone ouest-africaine. Leur répartition par spécialité de recherche est la suivante : Bioclimatologie /10. Science du sol /27. Agronomie /169. (total 206).

On considère que les chercheurs en Science du Sol interviennent à 75 % de leur temps dans des études relevant de la caractérisation des aptitudes culturales des sols et de l'évolution de leur fertilité, le reste du temps étant consacré à des études méthodologiques et à des inventaires pédologiques : soit l'équivalent de 20 unités chercheurs.

De même si l'ensemble des agronomes se préoccupe dans leurs actions de maintien de fertilité et de mise au point de fumure adaptée aux cultures, le CIRAD dispose de :

- 22 spécialistes de la fertilité chimique et organique des sols ;
- 9 spécialistes de la fertilité physique ;
- 2 équipes de 4 chercheurs en microbiologie appliquée aux cultures annuelles et aux espèces forestières ;
- un groupe important de chercheurs (20) travaillant à temps partiel sur la mise au point de systèmes de cultures économes en intrants, dont deux spécialistes de la fabrication de nouveaux produits fertilisants, travaillant en relation avec des industriels ;
- ainsi que de l'équivalent de 4 unités chercheurs spécialisés dans la lutte anti-érosive.

Outre l'équipe importante existant dans le domaine de recherche relatif à « l'économie et à la valorisation de l'eau », les autres agronomes consacrent l'essentiel de leur activité à la phytotechnie par culture (crop management).

Ainsi en matière de recherche sur la fertilité et la fertilisation en conditions de culture le CIRAD mobilise environ 75 unités chercheurs auxquelles doivent être ajoutées plus de 30 unités chercheurs issues des instituts de recherches nationaux africains et malgache travaillant dans ces domaines.

Ce total relativement important doit être cependant interprété en relation avec la vingtaine de cultures principales sur lesquelles les instituts du CIRAD travaillent (Mil, Sorgho, Maïs, Canne à sucre, Riz, Cultures maraîchères, Hévéa, Café, Cacao, Cotonnier, Bananier, Ananas, fruitiers divers, Palmier à huile, Cocotier, Arachide, Soja) et la multiplicité de ses implantations géographiques permanentes (18 pays africains, 3 pays d'Asie du Sud Est, 6 pays d'Amérique Latine, 6 DOM-TOM français).

Cette répartition géographique présente l'avantage de permettre des comparaisons fondées sur des milieux physiques similaires où se réalisent des expérimentations identiques. Le pilotage de ces dernières suppose une concentration de moyens analytiques puissants. C'est le rôle du *Centre de Montpellier* où sont également réunis des *moyens de formation à la recherche* et où s'achève la construction du plus grand centre documentaire européen sur l'agriculture des régions chaudes du globe.

Outre les implantations anciennes de l'INRA, et du CNRS, l'installation en cours de deux départements de l'ORSTOM - bioclimatologie et Science du sol - vient encore renforcer le potentiel scientifique de ce campus montpelliérain.

CIRAD institutes work (millet, sorghum, maize, sugar cane, rice, vegetables, hevea, coffee, cocoa, cotton, bananas, pineapples, miscellaneous fruits, oil palm, coconut, groundnuts, soya) and its large network of permanent field installations (18 countries in Africa, 3 in Southeast Asia and 6 in Latin America, plus 6 French Overseas Departments and Territories).

This geographical distribution offers the advantage that it permits comparisons based on similar physical environments where identical trials are being conducted. Powerful analytical resources have to be brought to bear on the guidance and monitoring of these experiments. This is the role of the Montpellier Center, which also houses research training facilities and where construction is nearing completion of Europe's biggest documentation center on agriculture in the warm regions of the world.

In addition to the old facilities of INRA and CNRS, the installation, now in progress, of two ORSTOM departments, Bioclimatology and Soil Science, will further reinforce the scientific capacity of the Montpellier campus.

Research capacity of ORSTOM

ORSTOM's current soil fertility and soil evolution research staff is as follows:

- 44 researchers, including 5 researchers on loan (Congo, Ivory Coast) and 9 foreign associate researchers (Venezuela, Ecuador);
- 11 engineers, technicians and research fellows.

At the present time, 19 researchers are working in Africa, 14 in Latin America (Venezuela, Ecuador, Mexico), 13 in the Overseas Departments and Territories (Martinique, New Caledonia) and 9 in metropolitan France. Schematically, these researchers may be considered to devote 70 % of their time to the field of activities under discussion here.

Research prospects and priorities

CIRAD and ORSTOM are convinced of the importance of soil fertility and crop fertilization research, which is more than ever decisive to raising intertropical zone farm production. Devising more intensive farming systems that are both reproducible (without degradation of the environment) and economical in the use of inputs (to comply with socioeconomic conditions in that zone) is a task that continues to strongly challenge French scientists.

General research objectives

In the area of *knowledge of soil fertility and its trends*, ORSTOM intends to strengthen research into the current functioning of soils in relation to farming constraints, so as to gain a better knowledge of the processes and mechanisms of transformation of soil status and its repercussions on the short- and long-term evolution of productive capacity. In view of the importance and rapidity of the transformations that affect the status of cultivated soils, preferential attention is given to two principal components: structural organization and organic matter.

For CIRAD, the main focus is on the *development of productive and reproducible farming systems* adapted to

Le potentiel de recherche de l'ORSTOM

Dans le domaine de recherche sur la fertilité et l'évolution des sols l'ORSTOM dispose actuellement du potentiel humain suivant :

- 44 chercheurs dont 5 chercheurs étrangers sur crédit (Congo, Côte d'Ivoire), 9 chercheurs étrangers associés (Vénézuéla, Equateur) ;
- 11 ingénieurs, techniciens et allocataires de recherche.

Actuellement 19 chercheurs travaillent en Afrique, 14 en Amérique Latine (Vénézuéla, Equateur, Mexique), 13 dans les DOM-TOM (Martinique, Nouvelle Calédonie) et 9 en France métropolitaine. On peut schématiquement considérer que les recherches conduites par ces chercheurs relèvent à 70 % du domaine d'activités ici évoqué.

Perspectives et priorités de recherche

Le CIRAD et l'ORSTOM sont persuadés de l'importance qu'il faut accorder aux recherches sur la fertilité des sols et la fertilisation des cultures, qui plus que jamais conditionnent l'accroissement de productivité agricole de la zone intertropicale. Or l'obtention de systèmes d'exploitation plus intensifs, qui soient à la fois reproductibles – sans dégradation du milieu – et économes en intrants – pour être adaptés aux conditions socio-économiques de cette zone – est un défi qui continue à interpeller fortement le monde scientifique français.

Objectifs généraux des recherches

Dans le domaine de la connaissance de la fertilité des sols et de son devenir, l'ORSTOM entend renforcer les recherches sur le fonctionnement actuel des sols en relation avec les contraintes d'exploitation, visant à mieux connaître les processus et mécanismes de transformation de l'état du sol et ses conséquences sur l'évolution de la capacité de production à court et long termes : l'importance et la rapidité des transformations qui affectent l'état des sols cultivés conduisent à privilégier deux composantes principales, l'organisation structurale et la matière organique.

Pour le CIRAD, l'orientation centrale est la mise au point de systèmes d'exploitation productifs et reproductibles, adaptés aux objectifs d'un développement rural intégré.

Cet objectif général se traduit dans la majorité des Départements par la poursuite des cinq objectifs corollaires suivants :

- accroître l'efficacité des facteurs de la production : économie et valorisation de l'eau et des éléments nutritifs ;
- améliorer les conditions de la production pour adapter, au moindre coût d'extériorisation, les systèmes cultureaux aux contraintes du milieu : techniques culturales améliorant l'enracinement, l'efficacité de la fixation biologique de l'azote, la fertilité d'ensemble des terres ;
- accroître et stabiliser la production agricole face aux risques encourus par les agriculteurs : risques climatiques (sécheresse), édaphiques (érosion, dégradation de la fertilité physique et chimique des terres), parasitaires, économiques ;

the goals of integrated rural development.

This general objective is reflected in most Departments in the pursuit of five corollary objectives:

- to enhance *productive-factor efficiency*: economics and efficient utilization of water and nutrients;
- to improve *production conditions* in order to adapt the cropping systems, at lowest exteriorization cost, to the *constraints of the environment*: cropping techniques that improve root development, efficiency of biologic nitrogen fixation, and overall fertility of the land;
- to increase and *stabilize agricultural production in the face of the risks* run by farmers: climatic (drought), edaphic (erosion, degradation of physical and chemical fertility of the land), parasitic, economic;
- to *exploit local resources and inputs*: local phosphates and ores, water reserves (surface and underground), organic residues, industrial waste;
- to *protect the environment*: watershed management; equilibrium between cropfarming, stockraising and forest exploitation.

Research priorities

The following seven research priorities have been adopted:

- *restoration and maintenance of the physical properties* of soils, within the framework of a stabilized agriculture:
 - structural organization and porosity trends;
 - anti-compaction techniques, particularly in semi-mechanized systems and on plantations, primarily in Burkina Faso, Ivory Coast, Congo, Mauritius and Réunion;
 - erosion mechanisms and correctives measures: West Africa, Algeria, Ecuador;
- *restoration and maintenance of the humic status* of cultivated soils:
 - research, by major ecologic zones, of the threshold values and forms of organic matter that permit sustained agriculture over time: Senegal, Ivory Coast, Caribbean area, Brazil, Venezuela;
 - techniques of stabilizing the humic status of soils, primarily in semiarid zones: Senegal, Northern Ivory Coast, Cameroon, Mali, Chad;
- improvement of *methods of nutritional control of crops*: reliability of sampling and analyses, operational organization of control procedures in rural areas, particularly for annual crops: African savannah zone, Benin, Amazonia;
- improvement of the *efficiency of mineral fertilization through an integrated approach to water and mineral balance* analysis: reduction of leaching, runoff and volatilization losses: Senegal, Ivory Coast, Brazil, New Caledonia;
- improvement of the efficiency of *biologic fixation of nitrogen* by annual and perennial species.

In parallel, research will be developed into *biologic fertility* from the standpoint of "soil fatigue" (Congo), particularly under sugar cane (Burkina Faso, Ivory Coast);

- research into the *rhizospheric activity* of cereals (rainfed rice) and perennials (oil palm) under *humic stress conditions* (African savannah zone, Benin, Brazil, etc.) and/or in an *acid environment* (Brazil, Cameroon, Madagascar, France);
- development of *low-cost mineral fertilizers* (partial acidification, compacting) that utilize *natural phosphates*: France, Togo, Burkina Faso, Senegal, Indonesia.

- valoriser les *ressources et intrants locaux* : phosphates et minerais locaux, réserves hydriques (de surface et souterraines), résidus organiques, déchets industriels ;
- *protéger l'environnement* : aménagements de bassins versants, équilibre entre les systèmes d'exploitation culturelle, animale et forestière.

Priorités de recherche

Les sept priorités de recherches suivantes sont retenues :

- *restauration et maintien des propriétés physiques* des sols dans le cadre d'une agriculture stabilisée :
 - évolution de l'organisation structurale et de la porosité ;
 - techniques de lutte contre la compaction notamment en systèmes de culture semi-mécanisée et en plantation en priorité au Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Congo, Ile Maurice, La Réunion ;
 - mécanismes de l'érosion et mesures correctives : Afrique de l'Ouest, Algérie, Equateur ;
- *restauration et maintien du statut humique* des sols cultivés :
 - recherche par grandes zones écologiques des seuils et formes de matière organique autorisant une agriculture soutenue dans le temps : Sénégal, Côte d'Ivoire, Caraïbes, Brésil, Venezuela ;
 - techniques de stabilisation du statut humique des sols, en priorité dans la zone semi-aride : Sénégal, Nord Côte d'Ivoire, Cameroun, Mali, Tchad ;
- *amélioration des méthodes de contrôle nutritionnel* des cultures : fiabilité des échantillonnages et des analyses, organisation opérationnelle des méthodes de contrôle en milieu rural, notamment pour les cultures annuelles : zone de savane africaine, Bénin, Amazonie ;
- *amélioration de l'efficacité de la fumure minérale* par une approche intégrée de l'analyse des *bilans hydrique et minéraux* : réduction des pertes par lixiviation, ruissellement et volatilisation : Sénégal, Côte d'Ivoire, Brésil, Nouvelle Calédonie ;
- *amélioration de l'efficacité de la fixation biologique* de N_2 pour les espèces annuelles et pérennes. Parallèlement des recherches seront développées sur le thème de la *fertilité biologique*, sous l'angle de la « fatigue des sols » (Congo) notamment sous canne à sucre (Burkina Faso, Côte d'Ivoire) ;
- recherche sur l'*activité rhizosphérique* des céréales (riz pluvial) et des plantes pérennes (palmier à huile) en condition de *stress hydrique* (zone de savane d'Afrique, Bénin, Brésil...) et/ou en *milieu acide* (Brésil, Cameroun, Madagascar, France) ;
- mise au point d'*engrais minéraux à faible coût* de fabrication (acidification partielle, compactage) permettant de valoriser les *phosphates naturels* : France, Togo, Burkina Faso, Sénégal, Indonésie.

Organisation

L'approche des problèmes de fertilisation *par filière* de production sera maintenue à son niveau actuel

Dans le domaine de l'évolution de la fertilité dans le temps, les recherches privilégient naturellement l'approche *par système d'exploitation* considérant les effets combinatoires et cumulatifs des différentes contraintes et pratiques culturelles, plutôt que l'approche par filière de pro-

Organization

The "product-specific" approach to problems will be maintained on its present scale.

In the area of fertility trends over time, research naturally gives preference to the *farming-system* approach, considering the combinatory and cumulative effects of the various constraints and cropping practices, rather than the more sectoral and restrictive "product-specific" approach.

With this in mind, it will be sought to profit from the geographical diversity of ORSTOM's and CIRAD's facilities, especially CIRAD's *long-duration experimentation network*, to facilitate comparative studies and enrich the scientific analysis of soil evolution as a function of farming environments and modes. To that end the participation of *international programs and networks* (EEC, IAEA, CIMMYT, ICRISAT, IRRI, IITA, IBSRAM, FAO, UNESCO, etc.) will be strengthened; CIRAD has in fact, with the assistance of ORSTOM and of French Cooperation, just initiated a research network on drought resistance (R³S) following a recent conference in Dakar.

Francophone Africa, Brazil and the Guayana-Antilles group, and to a less degree Indonesia and New Caledonia, are the main geographical foci of the current and future activity of the CIRAD-ORSTOM complex.

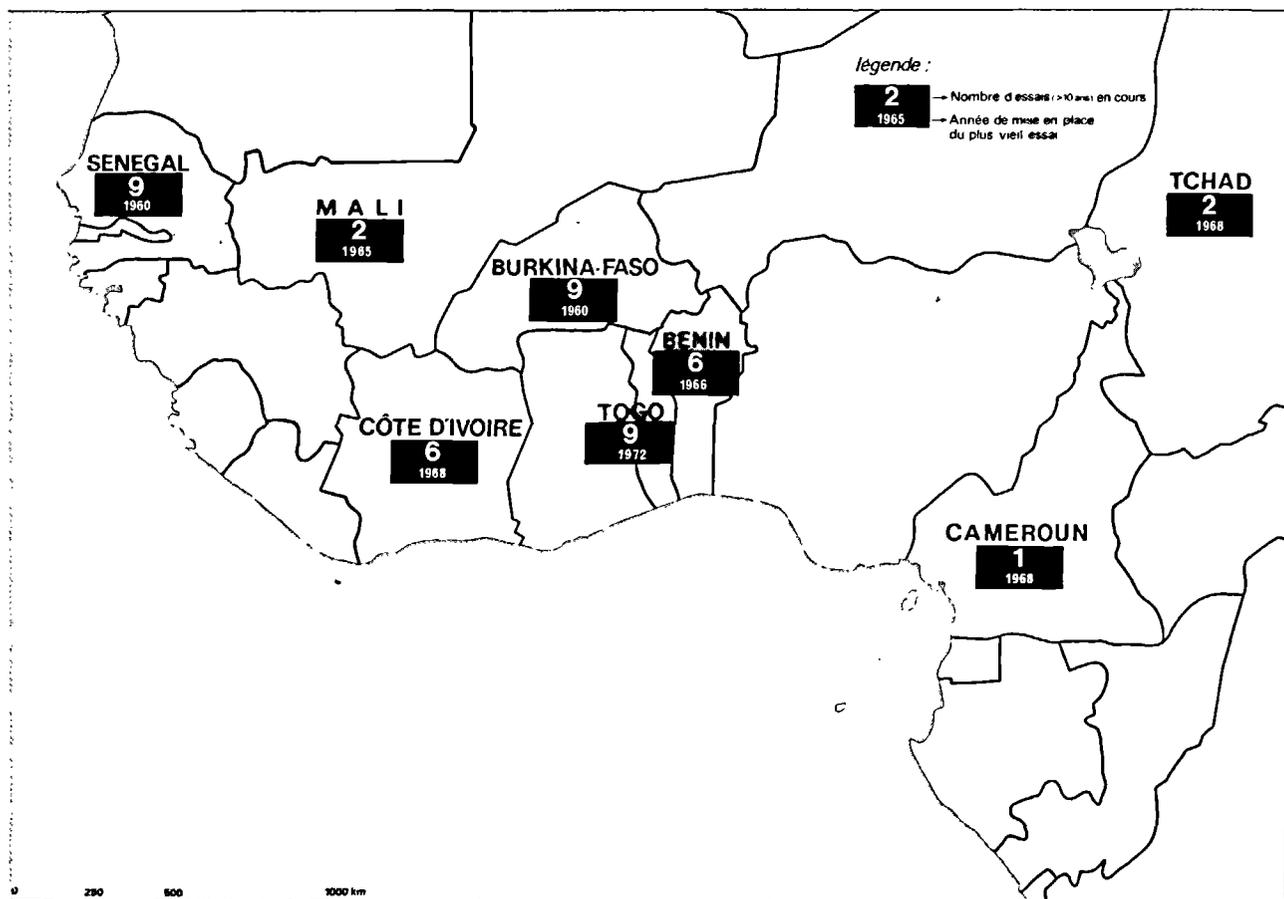
duction plus sectorielle et restrictive.

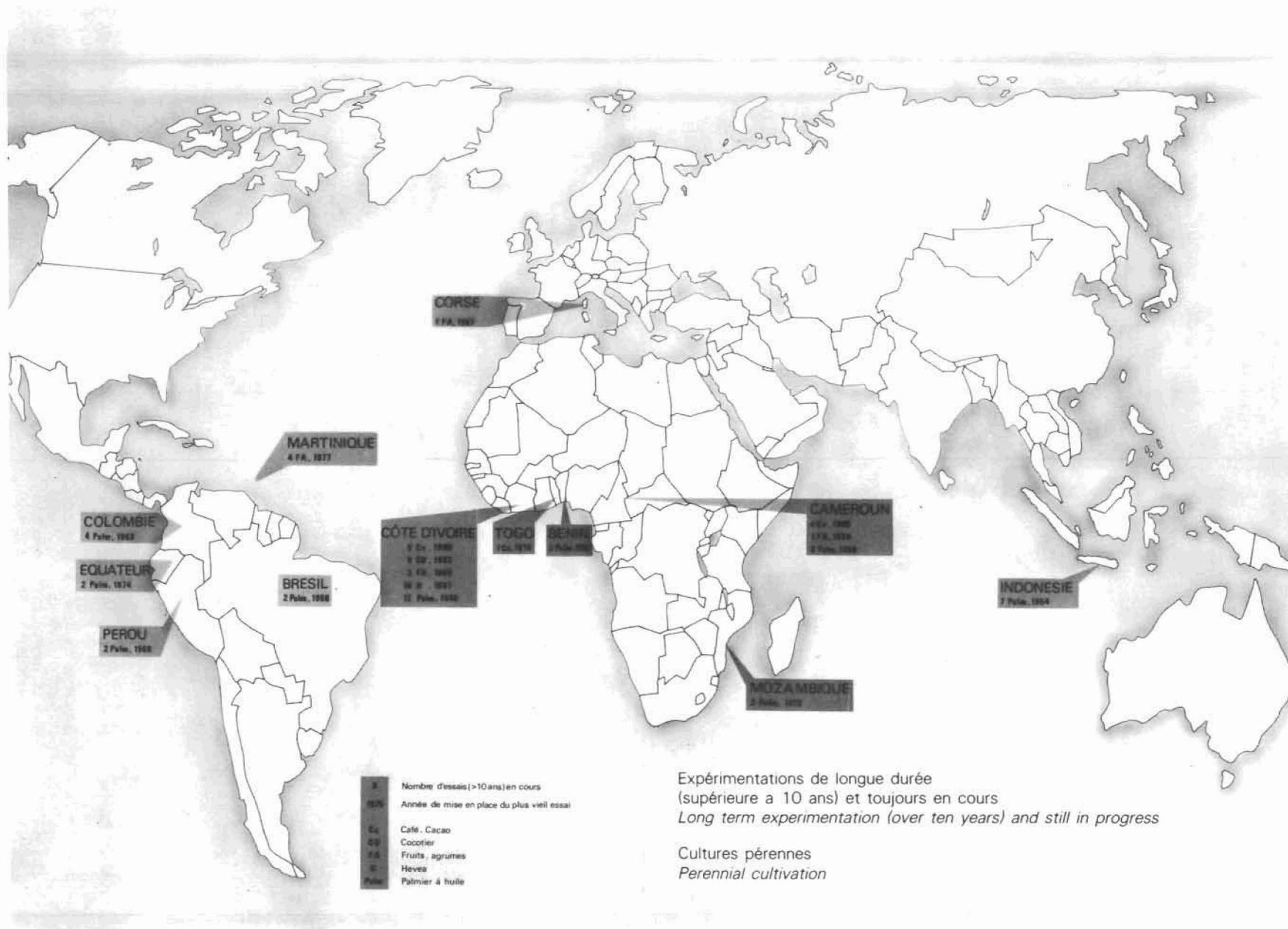
Dans cette optique, on s'efforcera de tirer parti de la diversité des implantations géographiques de l'ORSTOM et du CIRAD, et notamment des *dispositifs expérimentaux de longue durée* du CIRAD, pour faciliter les études comparatives et enrichir l'analyse scientifique sur l'évolution des sols en fonction des milieux et modalités d'exploitation. A ce titre la participation à des *programmes et réseaux internationaux* (CEE, IAEA, CIMMYT, ICRISAT, IRRI, IITA, IBSRAM, FAO, UNESCO...) sera renforcée, le CIRAD avec le concours de l'ORSTOM et de la Coopération française venant d'initier un réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse (R³S) à la suite d'un récent colloque réuni à Dakar.

L'Afrique francophone, le Brésil et l'ensemble Guyane-Antilles, enfin dans une moindre mesure l'Indonésie et les archipels du Pacifique sud, sont les points d'appui géographiques essentiels de l'activité actuelle et future de l'ensemble CIRAD-ORSTOM, qui a significativement accru sa présence en Océanie et dans l'ensemble de l'Amérique Latine au cours des dernières années.

Expérimentations de longue durée
(supérieure a 10 ans) et toujours en cours
Long term experimentation (over ten years) and still in progress

Cultures annuelles céréales, cotonnier, arachide
Yearly cultivation of cereals, cotton and peanuts





Liste des références bibliographiques citées dans le texte

ÉTABLIE PAR LES SERVICES DE DOCUMENTATION DU CENTRE DE RECHERCHES CIRAD-MONTPELLIER (GERDAT, IRAT, IRFA, IRHO)

- ANGE A • 1984 • LES CONTRAINTES DE LA CULTURE COTONNIÈRE DANS LE SYSTÈME AGRAIRE DE HAUTE CASAMANCE AU SÉNÉGAL. THÈSE DE DOCTORAT, GÉOLOGIE APPLIQUÉE, INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE, PARIS, 458 P., 301 P. ET ANNEXES.
- AUBERT G / MOULINIER H • 1954 • OBSERVATIONS SUR QUELQUES CARACTÈRES DES SOLS DE CACAÏÈRES EN CÔTE D'IVOIRE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 9, (4) : 428-438.
- BACHELIER G • 1968 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE. PARIS, ORSTOM, 76 P. (MÉMOIRES ORSTOM, 30).
- BACHELIER G • 1972 • ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ACTION DES ANIMAUX SUR L'HUMIFICATION DES MATÉRIEAUX VÉGÉTAUX. T. I. : EXPÉRIENCES ET CONCLUSIONS PRÉLIMINAIRES. PARIS, ORSTOM, 76 P. (TRAVAUX ET DOCUMENT, 14).
- BACHELIER G • 1973 • ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ACTION DES ANIMAUX SUR L'HUMIDIFICATION DES MATÉRIEAUX VÉGÉTAUX. T. II : ACTION DES ANIMAUX MORTS ET DES ACIDES AMINÉS. CONCLUSIONS GÉNÉRALES. PARIS, ORSTOM, 80 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 30).
- BACHELIER G • 1978 • LA FAUNE DES SOLS. SON ÉCOLOGIE ET SON ACTION. PARIS, ORSTOM, 392 P., 52 FIG., 4 PL. (INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES, 38).
- BENOIT-CATTIN M • 1977 • TYPOLOGIES D'EXPLOITATIONS AGRICOLES. IN : BILAN ET PERSPECTIVES DES RECHERCHES SUR LE DÉVELOPPEMENT RURAL MENÉES DANS LES UNITÉS EXPÉRIMENTALES. SÉMINAIRE ORGANISÉ AU CNRA DE BAMBEY (SÉNÉGAL), 16-21 MAI 1977 : 8 P. MULTIGR.
- BERTRAND R ET AL • 1985 • LA CONNAISSANCE DES SYSTÈMES DE PAYSAGES NATURELS UN PRÉALABLE A LA PROTECTION DU MILIEU ; L'APPROCHE MORPHOPÉDOLOGIQUE. IN : COLLOQUE INTERNATIONAL DÉVELOPPEMENT AGRICOLE ET LA CONSERVATION DU PATRIMOINE NATUREL DANS LES PAYS DU TIERS-MONDE, GEMBLOUX, BELGIQUE, 9-11 OCTOBRE 1985, 13 P.
- BILLAZ R • 1981 • DOSSIER D'ÉTUDES YATENGA (CAMEROUN) CHAP. IV : SABOUNA, LES EXPLOITATIONS AGRICOLES, CHAP. V : LES SYSTÈMES DE CULTURE. MONTPELLIER, IFARC ; OUAGADOUGOU : IPDAOS/INSTITUT PANAFRICAIN POUR LE DÉVELOPPEMENT AFRIQUE DE L'OUEST ET SAHEL. 31 P. NON PAG.
- BLIC P DE / MOREAU R • 1979 • STRUCTURAL CHARACTERISTICS CHANGES IN FERRALLITIC SOILS UNDER MECHANICAL CULTIVATION IN THE MARGINAL FOREST AREAS OF THE IVORY COAST. IN: SOIL PHYSICAL AND CROP PRODUCTION IN THE TROPICS; CHICHESTER, WILEY: 111-122.
- BOYER J • 1970 • ESSAI DE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACQUISES SUR LES FACTEURS DE FERTILITÉ DES SOLS EN AFRIQUE INTERTROPICALE FRANCOPHONE. PARIS, ORSTOM, 175 P.
- BOYER J • 1978 • LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM DANS LES SOLS DES RÉGIONS TROPICALES HUMIDES ET SUBHUMIDES. PARIS, ORSTOM, 174 P. (INITIATIONS - DOCUMENTS TECHNIQUES, 35).
- BOYER J • 1982 • LES SOLS FERRALLITIQUES. T. X : FACTEURS DE FERTILITÉ ET UTILISATION DES SOLS. PARIS, ORSTOM, 300 P., 23 FIG., 100 TABL., 1 000 RÉF. (INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES, 52).
- BOYER J / COMBEAU A • 1960 • ÉTUDE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE DE QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES DE LA RÉPUBLIQUE CENTRE AFRICAINE. SOLS AFRICAINS, 5, (1) : 6-42.
- BRAUD M • 1964 • LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE, GUIDE DE LA FERTILISATION MINÉRALE DU COTONNIER. IN : 1^{er} COLLOQUE EUROPÉEN SUR LE CONTRÔLE DE LA NUTRITION MINÉRALE ET FERTILISATION, MONTPELLIER : 299-308.
- BRAUD M • 1981 • L'INTÉRÊT DU COTONNIER, SUPPORT DE TESTS BIOLOGIQUES POUR CONTRÔLER L'ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ D'UN SOL. COTON ET FIBRES TROPICALES, 36, (4) : 305-312, 11 RÉF.
- BRAUD M • 1984 • LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE SUR LE COTONNIER. IN : L'ANALYSE VÉGÉTALE DANS LE CONTRÔLE DE L'ALIMENTATION DES PLANTES TEMPÉRÉES ET TROPICALES - COORDONNATEURS : P. MARTIN-PREVEL, J. GAGNARD, P. GAUTIER ; PARIS, LAVOISIER, 1984 : 559-576, 41 RÉF.
- CHAMINADE R • 1965 • BILAN DE TROIS ANNÉES D'EXPÉRIMENTATION EN PETITS VASES DE VÉGÉTATION. MISE AU POINT TECHNIQUE - RÉSULTATS - L'AGRONOMIE TROPICALE 20 (11) : 1101-1162.
- CHAMINADE R • 1971 • ASPECTS AGRONOMIQUES DE LA RENTABILITÉ DE LA FERTILISATION. L'AGRONOMIE TROPICALE, 26 (2) : 265-269.
- CHARREAU C • 1972 • NÉCESSITÉ AGRONOMIQUE D'UNE INTENSIFICATION DES SYSTÈMES AGRICOLES DANS LES PAYS DE ZONE TROPICALE SÈCHE : L'EXEMPLE DU SÉNÉGAL. IN : SÉMINAIRE D'ÉTUDE DE PROBLÈMES INTERTROPICAUX, GEMBLOUX, BELGIQUE, 11-15 SEPTEMBRE. NOGENT SUR MARNE, IRAT : 204-212.
- CHARREAU C / FAUCK R • 1970 • MISE AU POINT SUR L'UTILISATION AGRICOLE DES SOLS DE LA RÉGION DE SEFA (CASAMANCE). L'AGRONOMIE TROPICALE, 25 (2) : 151-191, 39 REF.
- CHARREAU C / NICOU R • 1971 • L'AMÉLIORATION DU PROFIL CULTURAL DANS LES SOLS SABLEUX ET SABLO-ARGILEUX DE LA ZONE TROPICALE SÈCHE OUEST-AFRICAINE ET SES INCIDENCES AGRONOMIQUES (D'APRÈS LES TRAVAUX DES CHERCHEURS DE L'IRAT EN AFRIQUE DE L'OUEST). NOGENT-SUR-MARNE, IRAT, 254 P. (BULLETIN AGRONOMIQUE, N° 23)
- CHAUVEL A • 1977 • RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES. PARIS, ORSTOM, 532 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 62).
- CHAUVEL A / MONNIER A • 1967 • SUR LA SIGNIFICATION GÉNÉRALE DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE EN PÉDOLOGIE. EXAMEN DES PROBLÈMES POSÉS PAR LA CARACTÉRISATION DE LA TEXTURE DE CERTAINS SOLS TROPICAUX. COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES, 264 : 1969-1972.
- CHOPART J L • 1980 • ÉTUDE AU CHAMP DES SYSTÈMES RACINAIRES DES PRINCIPALES CULTURES PLUVIALES AU SÉNÉGAL (ARACHIDE, MIL, SORGHO, RIZ PLUVIAL). THÈSE DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE, PRODUCTIONS VÉGÉTALES ET QUALITÉ DES PRODUITS, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 160 P. ET ANNEXES.
- COINTEPAS J P • 1956 • PREMIERS RÉSULTATS DES MESURES D'ÉROSION EN MOYENNE CASAMANCE (CASAMANCE). IN : 6^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA SCIENCE DU SOL, PARIS, VI, (15) : 569-576.
- COINTEPAS J P • 1960 • BILAN DES ÉTUDES CHIMIQUES ET PÉDOLOGIQUES ENTREPRISES A LA STATION EXPÉRIMENTALE DE SEFA. ORSTOM, 110 P.
- COINTEPAS J P / MAKILO R • 1982 • BILAN DE L'ÉVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURES INTENSIVES DANS UNE STATION EXPÉRIMENTALE EN MILIEU TROPICAL HUMIDE (CENTRE AFRIQUE). CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 19, (3) : 271-282.
- COMBEAU A • 1964 • REMARQUES SUR LES FACTEURS DE VARIATION DES LIMITES D'ATTERBERG. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 2 (4) : 29-39.
- COMBEAU A / MONNIER G • 1961 • MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE. APPLICATION AUX SOLS TROPICAUX. SOLS AFRICAINS, 6, (1) : 5-62.
- COMBEAU A / QUANTIN P • 1964 • OBSERVATION SUR L'ÉVOLUTION A LONG TERME DE LA STABILITÉ STRUCTURALE DE CERTAINS SOLS TROPICAUX SOUS CULTURE ET SOUS JACHÈRE. IN : 8^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA SCIENCE DU SOL, BUCAREST.
- DABIN B • 1954 • LES PROBLÈMES DE L'UTILISATION DES SOLS A L'OFFICE DU NIGER. IN : 1^{er} CONFÉRENCE INTERAFRICAINNE DES SOLS, LÉOPOLDVILLE, II, (92) : 1162-1176.
- DABIN B • 1961 • LES FACTEURS DE LA FERTILITÉ DES SOLS DE RÉGIONS TROPICALES EN CULTURE IRRIGUÉE. BULLETIN SPÉCIAL AFES : 108-130.
- DABIN B • 1969 • ÉTUDE GÉNÉRALE DES CONDITIONS D'UTILISATION DES SOLS DE LA CUVETTE TCHADIENNE. PARIS, ORSTOM, 199 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 2).
- DABIN B • 1970 • LES FACTEURS CHIMIQUES DE LA FERTILITÉ DES SOLS. IN : TECHNIQUES RURALES EN AFRIQUE, PÉDOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT. PARIS, ORSTOM, B.D.P.A., 278 P.
- DABIN B / LENEUF N • 1958 • ÉTUDE DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT EN BASSE CÔTE D'IVOIRE. PARIS, ORSTOM, 20 P. MULTIGR.
- DANCETTE C / FOREST F • 1982 • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE DE L'ARACHIDE EN VUE D'UNE MEILLEURE ADAPTATION DE CETTE CULTURE AUX CONDITIONS TROPICALES. BAMBEY, IRAT, 34 P.

- DANCETTE C / HAMMOUTENE M • BILAN HYDRIQUE SIMULÉ (MÉTHODE F. FOREST) ET TENTATIVE D'EXPLICATION DU RENDEMENT POUR LE MIL ET LE SORGHO : PREMIERS RÉSULTATS. IN : COLLOQUE, RÉUNION DE PLANIFICATION ICRIAT-OMM SUR L'AGROMÉTÉOROLOGIE du SORGHO ET DU MILLET DANS LES ZONES TROPICALES SEMI-ARIDES, HYDERABAD, INDE, 15-19 NOVEMBRE, 8 P.
- DOMMERGUES Y • 1960 • A. INFLUENCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LA TENEUR EN AZOTE MINÉRAL ET SUR QUELQUES CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES DES SOLS. L'AGRONOMIE TROPICALE, 15, (4) : 377-389.
- DOMMERGUES Y • 1960 • B. MINÉRALISATION DE L'AZOTE AUX FAIBLES HUMIDITÉS. IN : 7TH INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, MADISON, WISC, USA, III : 672-678.
- DOMMERGUES Y / MANGENOT F • 1970 • ÉCOLOGIE MICROBIENNE DU SOL. PARIS, MASSON, 769 P.
- DUGAIN F • 1959 • LE SULFATE D'AMMONIAC DANS LE SOL EN CULTURE BANANIÈRE DE BAS-FONDS. FRUITS, 14, (4) : 163-169.
- FAUCK R / MOUREAUX C / THOMANN C • 1969 • BILANS DE L'ÉVOLUTION DES SOLS DE SEFA (CASAMANCE, SÉNÉGAL) APRÈS 15 ANNÉES DE CULTURE CONTINUE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 24, (3) : 263-301.
- FELLER C / MILLEVILLE P • 1977 • ÉVOLUTION DES SOLS DE DÉFRICHE RÉCENTE DANS LA RÉGION DES TERRES NEUVES (SÉNÉGAL ORIENTAL). 1^{re} PARTIE : PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE ET ÉVOLUTION DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 15, (3) : 291-302.
- FOREST F / LIDON B • SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE POUR L'EXPLICATION DU RENDEMENT ET L'APPUI AUX PRODUCTEURS. IN : LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE., ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR-NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA PARIS, CILF, 1985 : 55-65, 4 RÉF.
- FOREST F / REYNIERS F N • 1985 • PROPOSITIONS DE CLASSIFICATION EN TERMES DE BILAN HYDRIQUE DES SITUATIONS AGROCLIMATIQUES DE RIZICULTURE PLUVIALE. IN : 2^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LE RIZ PLUVIAL, JAKARTA, INDONÉSIA, 4 MARS, 17 P.
- FORESTIER J • 1960 • FERTILITÉ DES SOLS DE CAFÉIÈRES EN RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE. L'AGRONOMIE TROPICALE, 15, (1) : 9-37.
- FOURNIER F • 1967 • LA RECHERCHE EN ÉROSION ET CONSERVATION DU SOL DANS LE CONTINENT AFRICAIN. SOLS AFRICAINS, 12, (1) : 5-52.
- FRANQUIN P / FOREST F • 1978 • UN PROGRAMME DE SIMULATION DE L'IRRIGATION COMPLÉMENTAIRE AUX PLUIES. L'AGRONOMIE TROPICALE, 33, (4) : 377-380.
- FRANQUIN P / MARTIN G • 1962 • BILAN D'EAU ET CONSERVATION DU SOL AU NIARI. RÉPUBLIQUE DU CONGO. COTON ET FIBRES TROPICALES. 1962, 17, (3) : 345-356.
- FRITZ A / VALLERIE M • 1971 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES DÉFICIENCES MINÉRALES SOUS CULTURE COTONNIÈRE DU NORD-CAMEROUN. COTON ET FIBRES TROPICALES, 26, (10) 609-616.
- GODEFROY J / PENEL J P • 1985 • BILAN DE L'ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ D'UN SOL FERRALLITIQUE SOUS VERGER D'AGRUMES EN MILIEU TROPICAL. FRUITS, 40, (7-8), 475-484
- JADIN P • 1975 • L'UTILISATION DU « DIAGNOSTIC SOL » POUR L'ESTIMATION DES BESOINS EN ENGRAIS DES CACAÏÈRES IVOIRIENNES. CAFÉ CACAO THÉ, 19, (3) : 203-220, 5 RÉF.
- JADIN P / SNOECK J • 1985 • LA MÉTHODE DU DIAGNOSTIC SOL POUR CALCULER LES BESOINS EN ENGRAIS DES CACAÏERS. CAFÉ CACAO THÉ, 19, (4) : 255-266.
- LEPLAIDEUR A • 1985 • LES SYSTÈMES AGRICOLES EN ZONE FORESTIÈRE LES PAYSANS DU CENTRE ET DU SUD CAMEROUN. MONTPELLIER : UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC : 614 P. ET ANNEXES (THÈSE 3^e CYCLE : MONTPELLIER I ; ÉCONOMIE RURALE).
- LEPRUN J C • 1985 • ÉTUDE COMPARÉE DES FACTEURS ET DES EFFETS DE L'ÉROSION DANS LE NORD-EST DU BRÉSIL ET EN AFRIQUE DE L'OUEST. RIO DE JANEIRO, EMBRAPA-ORSTOM : 8 P. MULTIGR. (SOUS PRESSE).
- MARTIN G • 1963 • DÉGRADATION DE LA STRUCTURE DES SOLS SOUS CULTURE MÉCANISÉE DANS LA VALLÉE DU NIARI. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 1, (2) : 8-14.
- MARTIN G • 1970 • SYNTHÈSE AGROPÉDOLOGIQUE DES ÉTUDES ORSTOM DANS LA VALLÉE DU NIARI EN RÉPUBLIQUE DU CONGO. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 8, (1) : 63-79.
- MOREAU R • 1978 • INFLUENCE DE L'AMEUBLEMENT MÉCANIQUE ET DE L'INFILTRATION D'EAU SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE D'UN SOL FERRALLITIQUE DANS LE CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE. CAHIERS ORSTOMS, SÉRIE PÉDOLOGIE, 16, (4) : 413-424.
- MOREAU R • 1983 • ÉVOLUTION DES SOLS SOUS DIFFÉRENTS MODES DE MISE EN CULTURE EN CÔTE D'IVOIRE FORESTIÈRE. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 20, (4) : 311-326.
- MOURARET M • 1965 • CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACTIVITÉ DES ENZYMES DU SOL : L'ASPARAGINASE. PARIS, ORSTOM, 112 P. (MÉMOIRES ORSTOM, 9).
- MOUREAUX C • 1967 • INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ SUR LES ACTIVITÉS BIOLOGIQUES DE QUELQUES SOLS OUEST AFRICAINS. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 5, (4) : 393-420.
- NGUYEN HUGO VAN OLIVIN J / OCHS R • 1984 • SOLS A PALMIERS A HUILE ET A COCOTIERS EN AFRIQUE DE L'OUEST. IN : OLÉAGINEUX, 39, (3), 117-126 ; 39, (4), 189-198, 33 RÉF.
- OCHS R • 1984 • STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DU CONTRÔLE NUTRITIONNEL DES PLANTES PÉRENNES. CRÉATION DE LA NUTRITION MINÉRALE. PROGRAMMATION DES FUMURES. OLÉAGINEUX, 40, (12), 583-590, 10 RÉF.
- OCHS R / OLLAGNIER M • 1977 • EFFET DES ENGRAIS SUR LA COMPOSITION DES LIPIDES PRODUITS PAR DES OLÉAGINEUX TROPICAUX PÉRENNES ET SUR LEUR RENDEMENT OLÉAGINEUX, 32, (10) : 409-422, 38 RÉF.
- OLIVIN J • 1980 • RELATION ENTRE ÉCOLOGIE ET AGRICULTURE DE PLANTATION. OLÉAGINEUX, 35, (2) : 65-78.
- OLLAGNIER M / OCHS R • 1981 • GESTION DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTATIONS INDUSTRIELLES DE PALMIERS A HUILE. ÉCONOMIES D'ENGRAIS. OLÉAGINEUX, 36, (8-9) : 409-417.
- PERRAUD A • 1971 • LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS FORESTIERS DE LA CÔTE D'IVOIRE. THÈSE, UNIVERSITÉ DE NANCY, 134 P.
- PIERI C • 1982 • LA FERTILISATION POTASSIQUE DU MIL PENNISSETUM ET SES EFFETS SUR LA FERTILITÉ D'UN SOL SABLEUX DU SÉNÉGAL. REVUE DE LA POTASSE, 27, (4) : 1-12, 9 RÉF.
- PIERI C • 1983 • BILANS MINÉRAUX DES SOLS CULTIVÉS EN ZONE DE SAVANE HUMIDE DE MADAGASCAR ET D'AFRIQUE DE L'OUEST. IRAT, DIVISION D'AGRONOMIE, 34 P.
- REYNIERS F N • CRITÈRES DE TOLÉRANCE A LA SÉCHERESSE DU RIZ PLUVIAL EN FONCTION DU MILIEU EDAPHO-CLIMATIQUE. IN : LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE. ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA, PARIS, CILF, 1985 : 199-212, 11 RÉF.
- RICHARD L • 1976 • DIAGNOSTIC PÉTIOLAIRE DE LA NUTRITION AZOTÉE DU COTONNIER. COTON ET FIBRES TROPICALES, 31, (4) : 429-437, 7 RÉF.
- RINAUDO G • 1973 • FIXATION HÉTÉROTROPHE DE L'AZOTE DANS LA RHIZOSPHÈRE DU RIZ. PARIS, ORSTOM, 214 P. 29 FIG.
- ROCHE P / GRIERE L / BABRE D / CALBA H / FALLAVIER P (IMPHOSGERDAT) • 1980 • LE PHOSPHORE DANS LES SOLS INTERTROPICAUX : APPRÉCIATION DES NIVEAUX DE CARENCE ET DES BESOINS EN PHOSPHORE. PARIS, INSTITUT MONDIAL DU PHOSPHATE, 48 P., 57 RÉF.
- ROOSE E • 1967 • A. QUELQUES EXEMPLES DES EFFETS DE L'ÉROSION HYDRIQUE SUR LES CULTURES. IN : COLLOQUE SUR LA FERTILITÉ DES SOLS TROPICAUX, 19-25 NOV., II : 1385-1404.
- ROOSE E • 1967 • B. DIX ANNÉES DE MESURE DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT AU SÉNÉGAL. L'AGRONOMIE TROPICALE, 22, (2) : 123-152.
- ROOSE E • 1973 • DIX-SEPT ANNÉES DE MESURES EXPÉRIMENTALES DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT SUR UN SOL FERRALLITIQUE SABLEUX DE BASSE CÔTE D'IVOIRE. CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN MILIEU INTERTROPICAL. ABIDJAN, ORSTOM., 125 P. (THÈSE DOCT. ING. FAC. SCI. ABIDJAN, N° 20).
- ROOSE E • 1977 • ÉROSION ET RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST : VINGT ANNÉES DE MESURE EN PETITES PARCELLES EXPÉRIMENTALES. PARIS, ORSTOM, 108 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 78).

- ROOSE E • 1981 • DYNAMIQUE ACTUELLE DE SOLS FERRALLI-TIQUE ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TRANSFERTS HYDROLOGIQUES ET BIOLOGIQUES DE MATIÈRES SOUS VÉGÉTATIONS NATURELLES OU CULTURÉES. PARIS, ORSTOM, 569 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 130).
- ROOSE E • 1983 • RUISSELLEMENT ET ÉROSION AVANT ET APRÈS DÉFRICHEMENT EN FONCTION DES TYPES DE CULTURES EN AFRIQUE OCCIDENTALE. CAHIERS ORSTOM, SÉRIE PÉDOLOGIE, 20, (4) : 327-339.
- ROOSE E / GODEFROY J • 1968 • LESSIVAGE DES ÉLÉMENTS FERTILISANTS EN BANANERAIE. IN : FRUITS, 23, (11), PP. 580-584.
- SAMSON C • 1986 • EFFETS DE L'ACIDITÉ DU MILIEU DE CULTURE SUR LE SOJA ET SUR LA SYMBIOSE SOJA-RHIZOBIUM JAPONICUM. ÉBAUCHES DE SOLUTIONS AGRONOMIQUES. MONTPELLIER : ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE : 74 P. (THÈSE DE DOCTEUR INGÉNIEUR, PHYSIOLOGIE DE LA NUTRITION DES VÉGÉTAUX).
- SEGUY L / BOUZINAC S • 1981 • MISE AU POINT DE MODÈLES D'EXPLOITATION EN CULTURE MANUELLE, UTILISABLES PAR LES PETITS PRODUCTEURS DE LA RÉGION DU COCAIS (MARANHÃO, NORD-EST DU BRÉSIL). CONVENTION EMAP/IRAT. 105 P. MULTIGR. (MARANHÃO, EMPRESA MARANHENSE DE PESQUISA AGROPECUARIA - PARIS, INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES ET DES CULTURES VIVRIÈRES).
- STEINMETZ S / REYNIERS F N / FOREST F • EVALUATION OF THE CLIMATIC RISK ON UPLAND RICE IN BRAZIL. IN: LA SÉCHERESSE EN ZONE INTERTROPICALE. POUR UNE LUTTE INTÉGRÉE. ACTES DU COLLOQUE « RÉSISTANCE A LA SÉCHERESSE EN MILIEU INTERTROPICAL : QUELLES RECHERCHES POUR LE MOYEN TERME ? » DAKAR NGOR, 24 AU 27 SEPTEMBRE 1984, CIRAD-GERDAT, ISRA. PARIS, CILF, 1985 : PP. 43-45, 13 RÉF.
- SURRE C • 1968 • LES BESOINS EN EAU DU PALMIER A HUILE. CALCUL DU BILAN DE L'EAU ET SES APPLICATIONS PRATIQUES (C N° 71). OLÉAGINEUX, 23 (3) : 165-167.
- TURENNE J F • 1977 • SHIFTING, CULTIVATION AND FOREST FALLOW IN FRENCH GUYANA. DYNAMICS OF ORGANIC MATTER. IN: IV^e SYMPOSIUM DE ECOLOGIA TROPICAL, 7-11 MARZO. PANAMA, 17 P. MULTIGR.
- VELLY J / EGOUMENIDES C / PICHOT J • 1980 • L'AZOTE EXTRACTIBLE PAR UNE SOLUTION DE KCl ET LA FOURNITURE D'AZOTE A LA PLANTE DANS 40 SOLS TROPICAUX. L'AGRONOMIE TROPICALE 35, (4): 374-380.
- VERLIERE G • 1981 • ÉTUDE PAR LA MÉTHODE DU DIAGNOSTIC FOLIAIRE DE LA FERTILISATION ET DE LA NUTRITION MINÉRALE DU CACAoyer. PARIS, ORSTOM, 276 P. (TRAVAUX ET DOCUMENTS, 131).
- VERNEY P / WILLAIME P • 1965 • RÉSULTATS DES ÉTUDES DE L'ÉROSION SUR PARCELLES EXPÉRIMENTALES ENTREPRISES AU DAHOMEY. IN : SYMPOSIUM ON THE MAINTENANCE AND IMPROVEMENT OF SOIL FERTILITY, KHARTOUM: 43-53.