Institut de Recherches Agronomiques Tropicales
et des cultures vivrières
Département du Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)

Réunion "agronomie-systèmes de culture"
4 septembre 1991

Février 1992

2477, avenue du Val de Montferrand, BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1 – Tél. : 67 61 58 00 – Fax : 67 61 59 88 – Télex : 480573F

Réunion "agronomie-systèmes de culture"
4 septembre 1991

Février 1992

SOMMAIRE

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

I ..... COMPTE RENDU GÉNÉRAL

II ..... RAUNET

III ..... GANRY

IV ..... SIBAND

V ..... FOREST

VI ..... PICHOT

VII ..... SALEZ

VIII ..... MICHELLON

ANNEXE

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

I

COMPTE RENDU GÉNÉRAL

Cette réunion a été ouverte par Jean-François Poulain, directeur de l'IRAT par intérim, qui a dirigé les débats, assisté d'Alain Derevier, sous-directeur chargé des cultures vivrières. Très suivie par la majorité des agronomes de l'IRAT, mais également de chercheurs d'autres disciplines, cette journée a vu la participation active de chercheurs d'autres départements du CIRAD (IRHO, IRCT, DSA) et de la mission AGER.

Gilles Thévenet, directeur scientifique de l'ITCF et membre de la revue externe du Département, avait bien voulu accepter de présenter l'approche système de culture, concept fréquemment évoqué dans le rapport de la revue externe.

Hubert Manichon, directeur scientifique du CIRAD, a participé, en fin de journée, aux débats sur la prise en compte des systèmes de culture dans les programmes de recherche.

Plusieurs exposés ont été présentés. Cependant, tous n'ont pas fait l'objet d'un document écrit et n'apparaissent pas dans les communications rassemblées dans ce volume. En particulier, Jacques Imbernon a mis en valeur les systèmes d'information géographique, Alain Leplaideur et Paule Moustier ont montré la place et l'intérêt de l'économie dans l'étude des systèmes de culture.

L'après-midi a été consacré à la présentation de cas précis d'étude des systèmes de culture. Ces cas, présentés par Patrick Salez, Lucien Seguy, Roger Michellon et Jacques Marquette, ont mis en relief les aspects méthodologiques et l'articulation entre milieu contrôlé et milieu réel.

Des débats très fructueux ont été engagés à l'issue des présentations. Nous avons décidé de reproduire les documents disponibles, à la fois pour rendre compte de l'effort des auteurs et pour permettre à la réflexion de ceux qui n'ont pu assister à la réunion de s'exercer.

Gilles Thévenet a mis en évidence l'intérêt d'une échelle d'analyse telle que le système de culture en tant que moyen de gestion du milieu par les agriculteurs, et d'autre part comme concept scientifique autorisant l'étude des effets à court ou long terme sur le milieu et sur l'environnement (effet des conditions physiques, chimiques et biologiques générées par la succession des cultures dans un milieu donné).

La connaissance des cultures pratiquées, et de leur diversité, et l'élaboration de diagnostics mettant en évidence les principales contraintes constituent des objectifs scientifiques prioritaires permettant de mieux cibler les recherches thématiques, avec le souci de mieux s'inscrire dans les logiques paysannes.

L'agronomie est une discipline scientifique, mais finalisée sur l'action, dont le domaine va des interventions culturales à la prise en compte des critères technico-économiques. Il n'y a donc pas d'agronomie spécifiquement tropicale et, quelle que soit la situation géographique, il est essentiel d'utiliser des variables explicatives pertinentes, intégrables dans des procédures d'aide à la décision des paysans.

Les deux objets d'étude de l'agronomie sont les systèmes de culture et le peuplement végétal.

Gilles Thévenet a présenté le concept de système de culture : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique et caractérisées par la nature des cultures, leur ordre de succession et les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures.

Un résumé d'une communication de M. Sebillotte au Ier congrès européen d'agronomie a été réalisé par E. Jallas. Ce document, présenté en annexe, précise plusieurs des concepts de système de culture qui ont été énoncés.

L'utilisation du concept permet d'analyser à posteriori des situations culturales, d'émettre des diagnostics, voire d'établir de nouveaux systèmes de culture à priori.

Raisonner en termes de système de culture aboutit aussi à comparer des histoires culturales. La méthode consiste à rechercher comment le déroulement simultané des événements climatiques et culturaux, année après année, peut engendrer des états plus ou moins favorables. On introduit ainsi des concepts d'effet « précédent », de sensibilité du « suivant »...

L'agronome, dans sa démarche, doit prendre en compte la variabilité des résultats obtenus, et ne pas raisonner sur des moyennes.

Le principe est d'élaborer des lois de fonctionnement des peuplements. Ces lois servent de références afin d'expliquer les valeurs des rendements, qui servent de références afin d'expliquer les valeurs des rendements obtenus, et de déterminer les facteurs limitants. La connaissance de la variabilité de terrain, qui peut être acquise grâce à des enquêtes, est essentielle.

Il est certain que, dans les pays tropicaux, l'agronome se trouve confronté à des situations sur lesquelles il ne possède que peu d'éléments, aussi bien en ce qui concerne le milieu lui-même qu'en ce qui concerne les agriculteurs. Mais c'est alors, précisément, que la démarche scientifique agronomique doit montrer son utilité, car elle permet d'effectuer des extrapolations.

Il convient de retenir le caractère essentiel du diagnostic, qui permet de vérifier l'adaptation de la problématique avec les besoins réels.

Il est aussi essentiel d'observer de façon objective les pratiques des agriculteurs, sans porter de jugement à priori, mais en recherchant au contraire leurs justifications.

Il importe enfin de bien connaître le marché et d'analyser les demandes prioritaires dans un contexte de concurrence croissante et avec des moyens financiers de plus en plus comptés.

Dans son intervention clôturant les débats, Hubert Manichon a tout d'abord évoqué l'évolution de la science agronomique : au tout début, l'agronome a tout fait pour gommer la variabilité, que l'on se sentait incapable d'interpréter.

On s'est rendu compte maintenant de la limite du pouvoir explicatif dans cette façon de procéder : il s'avère au contraire nécessaire pour l'agronome de prendre en compte le terrain (le milieu et les acteurs qui gèrent ce milieu), et toute la variabilité qu'il introduit.

Dans les milieux tropicaux, les problèmes structurels rencontrés ont rendu difficile la mise en pratique de ce passage.

Hubert Manichon a insisté sur la nécessité de constituer des pôles de recherche forts.

• **L'agrophysiologie** (fonctionnement des peuplements végétaux, élaboration du rendement, modélisation) mérite un développement important à l'IRAT et, *a fortiori*, dans un département regroupant les plantes annuelles.

Il convient en effet d'établir des schémas de fonctionnement des peuplements végétaux explicitant les rôles du milieu et des techniques culturales. Cette connaissance est fondamentale pour l'élaboration de diagnostics et la conception d'itinéraires techniques dans le cadre de référentiels compatibles avec les moyens et les objectifs des ruraux.

• **La fertilité physique, chimique et biologique** nécessite également une place prépondérante dans le cadre de l'étude des systèmes de culture.

Il a encore été souligné que le concept de système de culture constitue un axe central pour la réalisation de la mission du CIRAD, qui est de « contribuer au développement économique des régions tropicales et subtropicales par des recherches, des réalisations expérimentales, la formation, l'information scientifique et technique ». Ainsi, la recherche d'explication est un moyen, certes nécessaire, mais n'est pas la finalité de la mission du CIRAD. Et la

notion de système de culture (étude, mise en pratique, transfert dans la pratique de systèmes de culture...) occupe une place centrale, bien que non exclusive.

Le terrain doit être pour nous, en même temps, l'origine des questions et la cible de nos recherches.

Tous les participants ont considéré à la fin de cette journée que les travaux et méthodes présentés, et l'ensemble des débats, constructifs, sont de bonne augure pour conduire notre mission.

Liste des participants

M. THEVENET	ITCF	M. HOARAU	IRAT
M. CRETENET	IRCT	M. HUSSON	IRAT
M. LACŒUILHE	CIRAD (AGER)	M. LARCHER	IRAT
M. MANICHON	CIRAD	M. LE DORE	IRAT
Mme MICHEL	CIRAD	M. LEPLAIDEUR	IRAT
M. PERRET	CEEMAT-Réunion	M. MARQUETTE	IRAT
M. PICHOT	DSA/CEEMAT	M. MARTINE	IRAT
M. PIERI	CIRAD (AGER)	M. MENDEZ	IRAT
M. POCTHIER	DSA/CEEMAT	M. MICHELLON	IRAT
M. SCHILLING	IRHO	Mme MOUSTIER	IRAT
M. ARRIVETS	IRAT	M. OLIVER	IRAT
M. AUBIN	IRAT	M. PAGES	IRAT
Mme BENZ	IRAT	M. POULAIN	IRAT
M. BOUZINAC	IRAT	M. RAUNET	IRAT
M. CHARPENTIER	IRAT	M. RENEAUD	IRAT
M. COMBRES	IRAT	M. SAINT MACARY	IRAT
M. D'ARONDEL DE HAYES	IRAT	M. SAMSON	IRAT
M. DE BON	IRAT	M. SEGUY	IRAT
M. DEREVIER	IRAT	M. SIBAND	IRAT
M. FEAU	IRAT	M. VALLEE	IRAT
M. FEUILLETTE	IRAT	M. VERNIER	IRAT
M. GODON	IRAT	M. VOLPER	IRAT

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

II

SYSTÈME DE CULTURE ET MILIEU INTERACTIONS

M. RAUNET

Pour rester dans le sujet, il semble nécessaire de bien cadrer les concepts exposés dans le titre de cette communication.

On ne revient pas sur la définition du "système de culture". Elle implique que l'on raisonne, du point de vue spatial, à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation (de la dizaine d'ares à la centaine d'hectares). L'unité de lieu privilégiée (où se passent des choses) est le profil cultural. L'échelle temporelle unitaire est la campagne culturale.

En revanche, il faut préciser la notion de milieu dans le contexte des systèmes de culture. Provisoirement, on peut opter pour un sens très large : le milieu est ce qui conditionne les modalités d'un système de culture. Il est composé de tout ce qui influe sur la nature et les rendements des plantes cultivées successives, sur les itinéraires techniques.

LES FACTEURS DU MILIEU QUI CONDITIONNENT LES SYSTÈMES DE CULTURE

Du point de vue thématique et analytique, on peut distinguer six grandes "composantes" (sans ordre hiérarchique).

Les composantes d'ordre pédologique

• Facteurs physiques

Structure, état de surface (rugosité), texture, profondeur, pierrosité, compaction, aération, discontinuités mécaniques ou texturales...

• Facteurs chimiques

pH, potentiel redox, bases échangeables, aluminium échangeable, phosphore, azote...

• Facteurs biologiques

Mésofaune, microflore, matière organique...

• Facteurs hydriques

Réserve en eau, engorgements, nappe phréatique...

Facteurs minéralogiques

Nature des argiles et des sables...

Les composantes d'ordre climatique

Pluviosité, températures, rayonnement, humidité, vents...

Il faut distinguer : les valeurs moyennes, les fluctuations (variabilité), les accidents (grêle, gel, période sèche...).

Les composantes d'ordre topographique

Pentes, forme et longueur des versants, micromodelé, etc.

Les composantes topologiques

Structure des parcelles dans l'espace : forme, éloignement, proximité, taille...

Les composantes phytosanitaires

Maladies, parasites, adventices.

Les composantes humaines et socio-économiques

A l'arrière plan socio-économique, politique, ethnique et démographique s'ajoutent les contraintes de fonctionnement de l'exploitation, les objectifs, les choix et la philosophie propres à l'agriculteur, le statut de la terre.

L'interdépendance des facteurs du milieu

Il faut insister sur l'interdépendance des différents facteurs du milieu.

Au niveau du diagnostic, de l'explication, de la programmation et de l'action sur les systèmes de culture, il faut donc être très prudent concernant les causalités linéaires trop simplistes.

> *Ce milieu extérieur "pertinent" entre en interaction avec le système de culture pour constituer l'écologie des parcelles cultivées, dont l'agronome doit essayer de comprendre le fonctionnement pour le faire évoluer dans un sens favorable, qui est l'augmentation de la production et sa "durabilité".*

Typologie spatio-temporelle

On peut effectuer une seconde typologie des composantes en fonction de leurs variations dans l'espace et le temps.

Les composantes incompressibles, structurelles

Elles constituent le cadre rigide du milieu car elles ne "bougent" pas dans l'espace et le temps, du moins à moyen terme, par exemple les moyennes des grandes variables climatiques, la présence d'une cuirasse à 30 cm, la minéralogie du sol, une nappe phréatique non rabattable, un éparpillement des parcelles dû à un terrain accidenté, des habitudes culturelles, une situation politique, etc.

Les composantes qui peuvent être modifiées par des aménagements fonciers réalisables dans le contexte local

Déroctage, épierrage, drainage, irrigation, rectification de pente, brise-vent, chaulage, sous-solage...

Les composantes qui changent d'état suivant des processus connus et prévisibles

Etat structural du sol, rugosité de surface, activité biologique, azote minéral, pH, potentiel redox, position d'une nappe phréatique, réserve en eau, etc.

Ces variables d'état peuvent changer pendant le cycle climatique et changeront pendant le cycle cultural.

Les composantes qui fluctuent temporellement de façon plutôt aléatoire

Fortes averses, gel, grêle, période sèche, attaque de sauterelles, explosion d'adventices, marchés des produits, etc.

Ce sont les contraintes évidemment les plus gênantes car difficiles à entrer dans un modèle prévisionnel.

Les composantes strictement spatiales réparties logiquement (selon des "lois") dans l'espace du système de culture

On peut les représenter par une cartographie fine et en tenir compte pour la gestion des parcelles (toposéquences de sols, hydroséquences, microclimatoséquences).

Les composantes strictement spatiales qui présentent une forte variabilité, non explicables par des lois simples

Ressuyage différentiel des sols, sites à toxicité ou carence, lentilles de sable aléatoires, macroporosité (galeries de termites, fentes...), pierrosité, profondeur de sol, etc.

COMMENT LES SYSTÈMES DE CULTURE MODIFIENT-ILS LE MILIEU ?

Un système de culture est défini par la nature des plantes cultivées et leurs variétés, la façon dont elles se succèdent ou sont associées, l'itinéraire technique dont les parcelles font l'objet.

Si on limite maintenant le milieu à l'espace de la parcelle et à son profil cultural, ce milieu subit alors de nouveaux flux d'entrée et de sortie et des changements d'états internes.

Les nouvelles entrées

Dans certaines situations, elles peuvent être quasi nulles (cultures itinérantes sur brûlis...).

- Surplus (ou diminution) des pluies efficaces.
- Fumure organique (fumier, compost...).
- Herbicides et pesticides.
- Eaux d'irrigation (et solutés tel le sodium).
- Résidus de récolte.
- Inoculation biologique (bactéries, vers de terre...).

Les nouvelles sorties

- Exportations de récoltes et pâturages
- Pertes minérales : lessivage, volatilisation, ruissellement.
- Départs de terre.
- Eau de drainage et de ruissellement.
- ETR.
- Matière organique (minéralisation).

Les changements d'état

Les opérations culturales, les intrants, les aménagements et les plantes elles-mêmes contribuent, en interactions, à modifier certaines composantes du milieu dans le sens d'une amélioration ou d'une dégradation, et suivant un "effet précédent" (pendant une campagne) ou suivant un "effet cumulé" à plus long terme.

Ces changements peuvent avoir lieu :

– au-dessus du sol ;
– à la surface du sol ;
– dans le profil cultural ;
– dans la parcelle (ou une partie de l'exploitation).

Au-dessus du sol

C'est la couverture végétale plus ou moins couvrante, suivant la plante et la période de l'année. Elle coupe ou amortit l'énergie cinétique des pluies. Elle crée un microclimat et peut inhiber la germination d'autres graines. Cette couverture peut être vivante ou morte.

En milieu tropical à sols fragiles et forte agressivité des pluies, cette protection du sol est très importante. Cela peut être la solution la moins coûteuse et la plus efficace contre l'érosion.

A la surface du sol

Ce sont les paramètres de rugosité, de mouillabilité et de macroporosité ; ils conditionnent l'entrée de l'eau dans le sol. Ils dépendent des travaux du sol (types d'outils, périodes et fréquences de passage), de la stabilité structurale, du taux et de la nature de la matière organique, de l'activité de la mésofaune et de la couverture au-dessus du sol.

Cet aspect est également très important à considérer en régions tropicales.

Dans le profil cultural

C'est ici toute l'ambiance hydro-physico-chimique et biologique qui peut être modifiée :

– l'aspect physique, par le travail des outils et des racines à différentes profondeurs, des enfouissements organiques, la fixation de sodium sur les argiles, etc. ;

– l'aspect chimique (pH, capacité d'échange, redox), par les intrants et exportations, l'activité microbienne ;

– l'aspect hydrique, par une amélioration ou une dégradation des conditions de rentrée d'eau.

Dans la parcelle

En liaison avec l'ensemble de l'exploitation et parfois le paysage agraire environnant. On change alors les paramètres topographiques et topologiques : disposition, taille des parcelles, parfois rectification de pente. Embocagement, agroforesterie, bandes alternées, cordons végétalisés, lignes de pierres, etc., dans le but de couper le ruissellement.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

II

LES OUTILS DE DIAGNOSTIC DANS L'ÉTUDE DES SYSTÈMES DE CULTURE

F. GANRY, R. OLIVER, P. SIBAND

UN DIAGNOSTIC, POURQUOI ?

Le diagnostic, en particulier la recherche des causes, doit se placer à l'échelle à laquelle ces causes se manifestent. Classiquement, il prend en considération des informations sur le passé et le contexte de la situation examinée. En principe, le laboratoire établit un constat, qui intervient à l'échelle de la parcelle et du présent. Cela implique qu'il ne fonctionne pas isolément, et qu'il peut avoir à dépasser occasionnellement cette échelle.

La préoccupation même du laboratoire de maîtriser les moyens du diagnostic et du pronostic, et sa position auprès d'interlocuteur de chercheurs, doit l'amener à être un espace de réflexion, d'information, éventuellement de synthèse, sur les démarches, les méthodes et les référentiels.

FONCTIONS ET STRATÉGIE NÉCESSAIRES POUR UN LABORATOIRE D'ÉTUDES AGRONOMIQUES AU CIRAD

Fonctions

Connaissance, méthodes et outils

Un acquis de connaissance débouche sur un schéma de fonctionnement, qui permet de définir des indicateurs.

Mise en œuvre d'activités de formation dans un laboratoire habilité

Activités d'appui

Stratégie

Des dispositifs et des chercheurs outre-mer

Une capacité d'accueil en laboratoire à Montpellier

- Equipement approprié
- Espace laboratoire
- Espace pédothèque

Un pool de matériels et d'instruments permettant des interventions sur le terrain

- Equipement volant de terrain

Le nombre nécessaire de chercheurs, animateurs dans leur spécialité

- Biologie des sols (endomycorhyzes, rhizobium et macrofaune)
- Physique des sols (porosité et enracinement)
- Biochimie et chimie des sols (azote, matière organique et biomasse)
- Diagnostic cultural et modélisation d'analyse de situations.

DÉMARCHE, MÉTHODES ET OUTILS EN COURS D'ÉLABORATION AU LEA DE L'IRAT

Diagnostic de situations culturales

- Enquête sur la variabilité des composantes du rendement du maïs et mise au point d'un schéma d'élaboration du rendement du maïs dans la zone ouest du Burkina Faso.
- Méthode d'étude simple de l'enracinement (Siband, Chopart)

A partir d'observations sur un plan, elle permet d'aboutir à une caractérisation du système racinaire dans un volume fondé sur un modèle d'anisotropie, et de déboucher sur un modèle d'accès à l'eau et aux éléments minéraux.

Prédiction d'évolution de fertilité de champs cultivés

Test de fertilité azotée (Ganry, Waneukem, collaborateurs outre-mer)

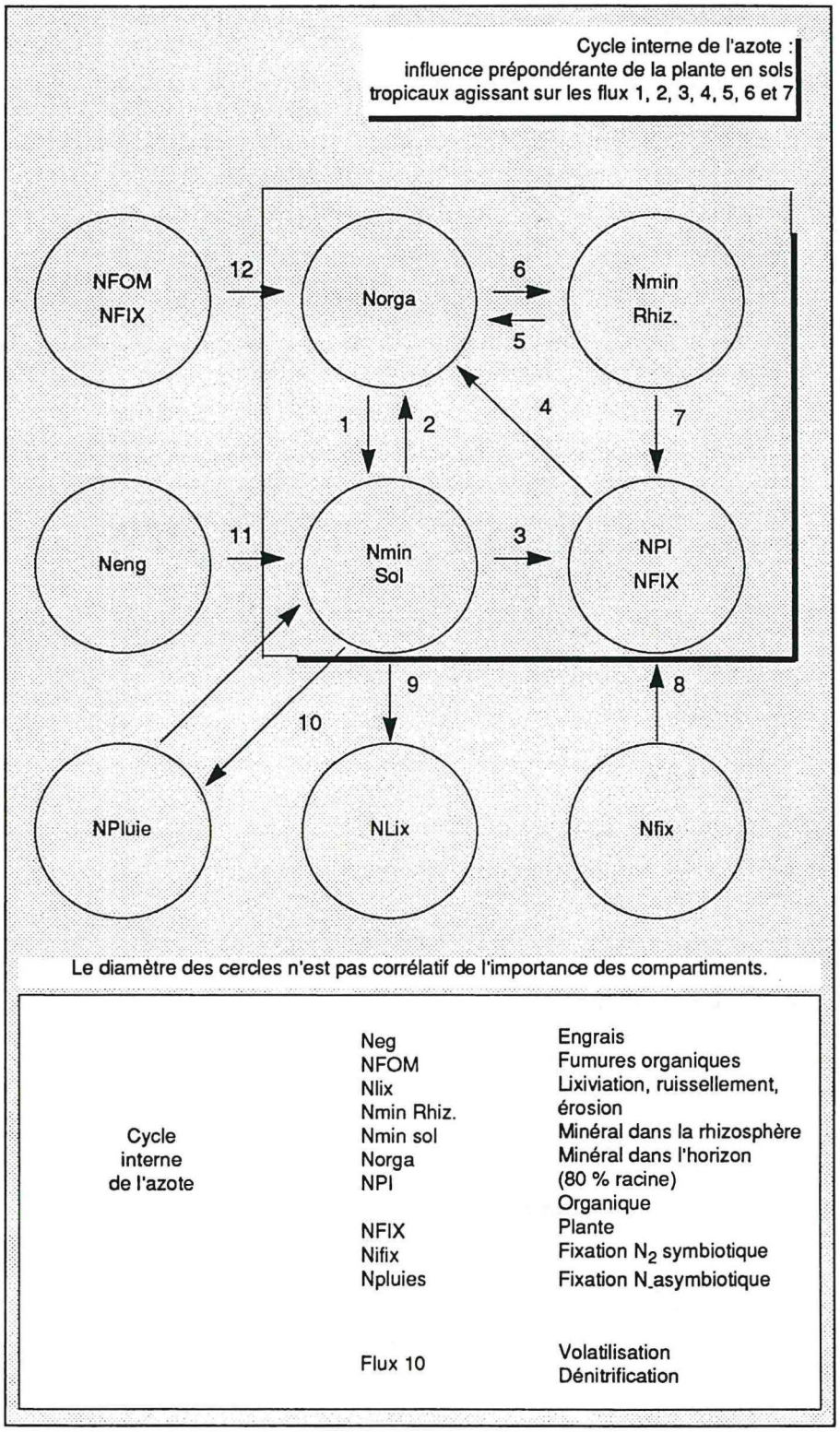
A partir d'analyses chimiques, donc de la caractérisation d'une ou plusieurs fractions organiques du sol.

Permet d'aboutir à une estimation du pool d'azote mobilisable des sols à partir d'indicateurs simples et fiables.

Test de fertilité potassique (Oliver, collaborateurs outre-mer)

Modélisation de la consommation en eau, azote et potassium

Pour l'azote, on s'appuie sur un schéma du cycle interne de l'azote intégrant le processus de minéralisation rhizosphérique, spécifique en milieu tropical, comme l'illustre l'exemple de schéma de fonctionnement.



Exemple d'un schéma de fonctionnement :
le cycle interne de l'azote en milieu tropical.

ACQUIS RÉCENTS DES UNITÉS DU LEA DE L'IRAT

Acquis de connaissance : deux exemples

Bilan azote-diagnostic (Ganry)

Σ_o^t Inputs = Σ_o^t Outputs + Variation Nt sol
a : engrais N e : exportation dN/dt
b : fixation N_2 d : lixiviation

Si dN/dt = 0 (état d'équilibre), on peut estimer d ou e, ou d + e

Si dN/dt = 0, et si les variables a, b, d et e sont mesurées ou modélisées, on peut connaître la tendance de Nt sol.

"Il faut pouvoir prédire les valeurs prises par les variables a, b, d et e dans une situation donnée à partir des états du milieu tels que peuvent les appréhender, au champ, l'agronome et l'agriculteur" (Sebillotte, 1990).

Ce bilan est appliqué par le LEA(IRAT) au cas :
– des systèmes de culture céréales-légumineuses au Sénégal ;
– des cultures associées caféiers-légumineuses au Burundi.

Cycle interne de l'azote

(Se reporter au schéma de fonctionnement.)

Acquis dans la maîtrise d'un certain nombre de méthodes, d'outils et d'approches

Inoculation des légumineuses et fixation symbiotique de N_2

- UPIL (unité de production d'inoculum)
- Techniques culturales

Pouvoir alimentaire des sols

- Dynamique des cations
- Fractions organiques et pouvoir alimentaire N

Modélisation

- Logiciel de bilan hydrique PROBE
- Logiciel de données expérimentales informatisées (DEI)
- Modélisation de l'accès des racines aux éléments minéraux

Outils pouvant être appliqués

Logiciel d'exploitation du suivi hydrique des cultures

- Logiciel PROBE (Siband, Chopart)

Diagnostic de nutrition minérale

- DRISS et courbe de dilution de Lemaire et Greenwood
- Application à la canne à sucre associée à un modèle de croissance et de développement (Chabalier, Siband).

ACTIVITÉS DE FORMATION

Rôle du laboratoire d'études agronomiques de l'IRAT dans la formation doctorale

Formations en cours (Année 1990-1991)

- Thèse : Mme BADIANE (Sénégal), dirigée par F. GANRY
- DAA : M. BENSIMON (France), dirigé par P. SIBAND
- DEA : Mlle WANEUKEM (France), dirigé par F. GANRY
- Mémoire : Mlle NCHO (Côte-d'Ivoire), dirigée par P. SIBAND (CNEARC)

Le laboratoire d'études agronomiques de l'IRAT peut recevoir ou encadrer des étudiants ou en formation doctorale dans les domaines de la biologie (rhizobiologie), la chimie, la biochimie et la physique des sols et l'agro-physiologie (élaboration du rendement et modélisation).

Contribution à des formations

- Thèse : N. DJEGUY (Bénin), ORSTOM, dirigée par M. DEBOISAISON, réalisée en partie à l'IRAT
- Thèse : B. TRIOMPHE (France) dirigée par Pr DUXBURT, université Cornell (Etats-Unis), suivie à l'IRAT par F. GANRY et P. SIBAND
- Thèse : M. SENE (Sénégal), direction demandée à J.GUERIF (INRA)

• Thèse : D. SNOECK (Belgique), IRCC-CIRAD (Burundi), dirigée par A.-M. DOMENACH
• Thèse : C. GILOT (France), ENS, dirigée par P. LAVELLE encadrée par F. GANRY et J.-L. CHOPART pour la partie agronomie

L'unité de physique des sols apporte sa contribution à un certain nombre de DAA et de thèses dans le cadre du LAGEPHY.

PARTENAIRES (HORS SNRA) ET ALLIANCES NÉCESSAIRES

Partenaires

- ENSAM et ENSAIA
- CEN de Cadarache
- Université de Lyon
- ORSTOM
- CPB-Nancy
- IFDC-Afrique

Alliances nécessaires

- Unité d'analyse de l'université de Lyon
- Laboratoire de physique des sols d'Avignon
- AIEA

Laboratoire d'études agronomiques IRAT-CIRAD

Publications en 1989, 1990 et 1991
(revues scientifiques ou actes de congrès à comité de lecture)

BEUNARD P., SAINT MACARY H., 1990. Caractérisation et choix de supports pour inoculums. *In :* Actes de la IIIe conférence AABNF, septembre 1988, M. Guyeke et K. Mulongoy (édit.), ISRA, Dakar, Sénégal.

BROUWERS M., 1990. Laboratoire de gestion physique des sols, LAGEPHY, Montpellier, France, Soil and Tillage Res., 16, p. 410-411.

CASTA P., CHOPART J.-L., JANEAU J.-L., VALENTIN C., 1989. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. L'Agron. Trop., 44-4, p. 255-262.

CHOPART J.-L., SIBAND P., 1988. PROBE : Programme de bilan de l'eau. Mémoires et Travaux de l'IRAT, 17, CIRAD-IRAT, Montpellier, 76 p.

CHOPART J.-L., NICOU R., 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. L'Agron. Trop., 44-4, p. 269-281.

CHOPART J.-L., 1989. Effect of tillage on a corn-cotton sequence in Ivory Coast (Côte-d'Ivoire). *In :* Soil crop and water management in the sudano-sahelian zone. ICRISAT, p. 325-331.

CHOPART J.-L., 1990. Variable effects of soil cultivation on maize production in the Ivory Coast as a function of conditions affecting water supply. *In :* Climatic risk in crop production: Models and management in the semi-arid tropics and sub-tropics. Muchow and Bellamy. CSIRO, Australia, p. 104-105.

CHOPART J.-L., VAUCLIN M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. Soil Sci. Soc. Am. J., 54.

DUCREUX A., MANIERE G., BROUWERS M., 1990. Relations sol-machine. Méthodes de terrain disponibles au LAGEPHY en vue de l'optimisation du travail du sol par les outils. *In :* Journées DRN, CIRAD-IRAT, Montpellier, France, p. 239-246.

EGOUMENIDES C., PIOMBO G., SERVAT D., MARGER J.-L., 1990. Etude des fractions granulométriques, des fractions organiques de l'azote et du rapport C/N dans un sol ferrallitique cultivé du Brésil. L'Agron. Trop., 45-2, p. 145-147.

GANRY F., 1990. Amélioration de la fixation de N_2 par les pratiques culturales. *In :* Actes de la IIIe conférence AABNF, septembre 1988, M. Gueye et K. Mulongoy (édit.), ISRA, Dakar, Sénégal.

GANRY F. Rôle de la fixation de N_2 dans l'amélioration durable de la fertilité azotée d'un sol sableux tropical par l'amendement calcique et organique. *In :* Fixation biologique de l'azote et stabilité de l'agriculture tropicale. K. Mulongoy (édit.), IVe conférence AABNF, IITA, Ibadan, Nigeria. (A paraître.)

GANRY F., 1990. Valorisation des résidus de récolte à la ferme et maintien de la fertilité. Cas du Sud-Sénégal. *In :* Savanes d'Afrique, terres fertiles ? CIRAD, Montpellier, France.

GANRY F., 1990. Rôle des légumineuses dans le maintien et la régénération de la fertilité azotée des sols sableux tropicaux, cas du système de culture mil-arachide au Sénégal. *In :* Journées DRN, CIRAD-IRAT, Montpellier, France, p. 281-288.

GANRY F., 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse d'Etat de doctorat ès sciences naturelles, université de Nancy-I, 355 p.

OLIVER R., 1989. Appréciation de la dynamique des éléments minéraux dans les sols : intérêt et limites des bougies poreuses, quelques résultats obtenus par le CIRAD. *In :* Journées DRN, CIRAD-IRAT, Montpellier, France, p. 255-271.

OLIVER R., BOAKE K., 1991. Utilisation du rubidium comme traceur du potassium dans les études sur la fertilité potassique de sols tropicaux. L'Agron. Trop., 45-4, p. 283-291.

OLIVER R., LETOURMY. Méthode d'appréciation de la participation des fractions granulométriques d'un sol à ses caractéristiques physico-chimiques. L'Agron. Trop. (A paraître.)

PANDZOU J., BEUNARD P., SAINT MACARY H., 1990. Inoculation du soja (*Glycine max* [L.] Merrill) au Congo. L'Agron. Trop., 45-3, p. 199-204.

PANDZOU J., BEUNARD P., 1990. Utilisation de *Sesbania rostrata* et *Crotalaria juncea* comme engrais verts sur le maïs. *In :* Fixation biologique de l'azote et stabilité de l'agriculture tropicale, K. Mulongoy (édit.), IVe conférence AABNF, Ibadan, Nigeria.

SAINT MACARY H., 1989. Fixation symbiotique de l'azote en milieu tropical. Quelles applications ? Quelles limitations ?. *In :* Journées DRN, CIRAD-IRAT, Montpellier, France, p. 305-318.

SAINT MACARY H., BEUNARD P., SCAGLIA J., HAKIZIMANA A., PANDZOU J. Inoculation des légumineuses en milieu tropical : recherche, développement et aspects économiques. *In* : Fixation biologique de l'azote et stabilité de l'agriculture tropicale, K. Mulongoy (édit.) IVe conférence AABNF, IITA, Ibadan, Nigeria. (A paraître.)

SALEZ P., SCAGLIA J.A., SAINT MACARY H. Effets de l'inoculation et du phosphore sur la nodulation et les rendements du haricot en zone tropicale d'altitude (Cameroun, Rwanda). L'Agron. Trop. (A paraître.)

SARAGONI H., POSS R., OLIVER R., 1991. Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du sud du Togo. L'Agron. Trop., 45-4, p. 259-273.

SIBAND P., 1989, 1991. De la connaissance des terres et des climats à la recommandation agronomique. *In* : Actes du 8e colloque Soltrop, Lomé, Togo, février 1989.

SIBAND P., VAUCLIN M. Accès des racines aux éléments minéraux du sol. Proposition d'un modèle. L'Agron. Trop. (A paraître.)

SIBAND P., 1989. Les méthodes de diagnostic nutritionnel. *In* : Journées DRN, CIRAD-IRAT, Montpellier, France.

STUMPE J.M., VLEK P.L.G., MUGHOGHO S.K., GANRY F.. Microplot size requirements for measuring balances of fertilizer nitrogen-15 applied to maize. SSSA, Journal n° S88-255. (A paraître.)

VAUCLIN M., CHOPART J.-L., 1990. Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques. *In* : Journées scientifiques de l'UREF — Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, EIER, Ouagadougou, Burkina Faso, mars 1990.

WANEUKEM V., 1991. Test de diagnostic de la fertilité azotée d'un sol tropical. Essai de validation *in situ* d'un indicateur chimique du sol. Mémoire DEA, INPT, Toulouse, 39 p. + annexes.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

IV

INTÉRÊT ET PLACE DE LA MODÉLISATION POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES DE CULTURE ET AUTRES USAGES

P. SIBAND

Avertissement

Ces quelques pages répondent à une demande de présenter l'"intérêt et la place de la modélisation pour l'étude des systèmes de culture", mais aussi de saisir cette occasion pour décrire la démarche de modélisation, sous l'aspect qui m'est le plus familier : le modèle mécaniste de croissance et développement des cultures annuelles. Elles visent à introduire la démarche auprès de collègues qui n'ont pas eu à s'y intéresser, mais aussi à émettre quelques idées qui pourraient demain être versées au débat des choix à faire en la matière.

Mon souhait est d'avoir été clair.

Divertissement

Il m'a semblé qu'il n'était pas utile d'exposer le lecteur à la concepticémie, et je me suis amusé à faire une présentation peu conformiste, qui peut-être n'aura amusé que moi. Dans ce cas, il lui sera toujours loisible de sauter les passages qu'il jugera ennuyeux.

LES MODÈLES, C'EST VIEUX COMME ARCHIMÈDE

Un modèle pieds dans l'eau

Qui se souvient de la légende d'Archimède sautant de sa baignoire, et se précipitant dans la rue en tenue de Pan pour crier sa joie d'avoir enfin compris, celui-là admettra aisément qu'affirmer que les modèles sont vieux comme Hérode est peu dire : ils ont au moins un quart de millénaire de plus.

Assurément, Archimède n'a rien fait d'autre ce jour-là qu'une toilette approfondie, peut-être, et en tout cas la formulation claire d'une relation qu'il connaissait confusément, et tournait depuis longtemps dans sa tête : le principe d'Archimède. Cette mise en forme d'une relation est l'exercice même de modélisation.

C'est bien naturel...

L'Homme, en donnant au Principe énoncé le nom de son heureux papa, et en retenant à ce titre ce nom par-delà les millénaires, montre assez combien il honore ceux de ses congénères qui réussissent un tel exercice. C'est qu'observer des relations dans la nature, les formaliser, les replacer elles-mêmes dans un ensemble qui n'est rien moins qu'une façon de regarder le monde, voilà une démarche de tous temps, essentielle à chacun : besoin de connaître, besoin de comprendre, besoin de cohérence. Mais aussi, toujours, appétit de maîtriser, de domestiquer, d'utiliser la nature. Deux aspirations donc, connaître et agir, constamment opposées dans des discours stériles par les tenants de l'un comme de l'autre, naturellement réunies dans la réalité des choses, pour un mariage fécond.

Mais si nos livres gardent la mémoire des noms d'auteurs de modèles réussis, c'est aussi que de tels modèles sont rares. Et celui qui prétend s'y adonner est bien vite jugé présomptueux, et voué à l'échec. Autant dire qu'il appartient à une espèce non protégée. Faut-il porter le débat sur un tel terrain ? Qui prétend refaire le monde, hors Galilée, Newton, Karl Marx, et les Copains de Jules Romains ? Un modèle n'est ni un simple jeu d'esprit, ni un pur objet métaphysique. C'est un plaisir, certes, à titre privé, puisqu'il répond, nous l'avons vu, à une aspiration fondamentale. Pour nous, ici, c'est d'abord un outil. Et il doit être jugé comme tel : à quoi sert-il ? quelle fonction lui assignons-nous ? dans quelle mesure y satisfait-il ? que coûte-t- il ? peut-on en faire l'économie ?

... mais est-ce bien utile ?

En fait, Archimède n'a rien inventé le jour de son bain. D'ailleurs, contrairement à ce qu'on se plaît à retenir, "eurêka" ne signifie pas "j'ai trouvé", mais "j'ai fini de chercher" (pour cette fois-ci!). Long aboutissement d'une démarche douloureuse, élargissement de perspectives, sans doute, mais non pas ouverture d'un champ nouveau. Heureusement pour l'humanité, d'innombrables navigateurs appliquaient avec succès son principe depuis des temps dont nous avons perdu la mémoire. Qui même a inventé l'embarcation ? Quel saut qualitatif y a-t-il entre la branche ou la feuille morte qui flottent, et la rustique pirogue ? Le premier marin savait-il même s'il était plus ou moins dense que l'eau ? Non. Notre savant Cosinus n'a rien inventé. En formulant son fameux principe, il n'a fait que confesser Dame Nature d'un secret de polichinelle, que pour la première fois elle consentait à dire clairement.

Ce n'était pas rien, toutefois, que de vaincre la pudeur de la Noble Dame. Car sans lui, et quelques autres qui ont mis en forme, avant

et après lui, les lois élémentaires de l'hydrostatique et autres disciplines, avec quels navires aurions-nous découvert l'Amérique ? Sans cet effort constant de formaliser peu à peu la réalité en traduisant les lois qu'elle nous dicte (au risque de les trahir un peu), nous serions condamnés à rester au stade de l'intuition des choses, qui fait lever mille inventions remarquables, mais ne sait dépasser le terme de la première moisson.

Aujourd'hui, n'importe quel gamin de ville, à son premier pique-nique sur une île, n'est pas tenu de faire couler sa barque, avec son casse-croûte et sa bonne amie, pour savoir quelle limite de charge il ne doit dépasser. Il lui suffit d'avoir quelques Principes en tête. Cela ne veut pas dire qu'il n'est pas exposé au risque d'une erreur de calcul. Mais, moyennant un minimum de vérifications, un modèle se transmet tellement plus facilement qu'une longue expérience que cela laisse plus de loisir pour en faire de nouvelles !

Tout autant que ce gamin inexpérimenté, le vieil homme, pour Archimède qu'il fût, aurait bien pu se tromper, après tout, et nous donner la formule de travers. Loin d'être utile, le modèle aurait pu amener bien des déboires, dira-t-on. Faux. Deux fois. Car, en tant que principe inutilisable, il aurait été ignoré du grand public, et fait peu de dégâts. Mais, connu des gens de l'art, il les aurait irrités, bien plus vivement dans sa formulation claire et impudente, que le fait non encore exprimé. Ce, jusqu'à ce qu'un esprit plus heureux rectifiât la formule : un modèle erroné demeure un remarquable aiguillon pour la recherche.

Mais lorsqu'enfin il est opérationnel, il devient un puissant outil d'action. En restant dans le domaine de l'eau, comparons deux appareils de terrain : pour évaluer la perméabilité d'un sol, on utilise parfois la méthode déjà ancienne du "double anneau". Elle consiste à installer deux anneaux métalliques concentriques en surface du sol, et à établir un régime d'écoulement permanent de l'eau dans l'anneau intérieur. L'anneau extérieur sert à assurer le flux vertical. On mesure le débit après avoir établi une lame d'eau. Longue opération, qui nécessite pour être multipliée que l'on traîne avec soi une tonne à eau, qui commence par noyer les agrégats de surface et provoquer leur effondrement, et donc par gâcher le caractère même qu'on cherche à mesurer, qui ne renseigne que sur les propriétés, toutes conventionnelles, d'un sol à saturation.

Le perméamètre est un appareil récent, encore objet d'études méthodologiques. Dépourvu lui aussi d'instruments délicats, et fait en matériaux légers et robustes, il se contente pour son alimentation d'un jerricane, ce qui enlève pratiquement toute limite à son rayon d'utilisation. Cependant, reposant sur un modèle de fonctionnement, il est conçu pour mesurer la perméabilité, de façon reproductible et tout à fait normalisée, à différents états hydriques du

sol, en respectant les états de surface. Mieux, il peut analyser les forces intervenant, en distinguant la gravité et la capillarité. La charge de connaissance de cet appareil simplifie le travail du manipulateur, accroît sa capacité d'intervention, et permet l'accès à une information plus riche, non biaisée, et capitalisable.

Loin d'être un cas d'espèce, ceci est un fait général : la formalisation correcte d'un processus permet l'identification des variables pertinentes pour le décrire, et des indicateurs les plus efficaces et les plus simples pour les appréhender. La sophistication des appareillages, sur des principes analogues, peut déplacer la difficulté ou la pénibilité d'une mesure vers le traitement des données, qui bénéficie de l'assistance de moyens de plus en plus puissants. L'"injection", dans l'outil et la procédure, des connaissances accumulées, accroît l'aisance de mise en oeuvre et la portée des données recueillies.

En bref

• Modéliser est un exercice permanent dans l'activité humaine ; il répond à un besoin de connaissance et de maîtrise de la nature.

• Ce n'est pas une activité directement créative : elle autorise les développements sur les champs ouverts par l'invention ; elle facilite la transmission de l'expérience acquise ; elle stimule la recherche ; elle offre des schémas et des instruments aidant à la description et à l'analyse des situations concrètes.

• Un modèle est un outil, qui doit être jugé sur son aptitude à remplir les fonctions qui lui sont assignées.

SYSTÈMES ET MODÈLES : MÊME COMBAT

Un système, ce n'est pas du billard

Pour reprendre en la circonstance un exemple classique, considérons une boule sur une table de billard. Il n'est pas difficile de prévoir sa trajectoire en ligne droite vers un trou. Et il faudrait être bien malchanceux pour ne pas réussir à l'y envoyer. S'il faut faire une ou deux bandes avant d'atteindre le but, avec un peu d'entraînement, nous arriverons bien à prévoir le parcours, et à ajuster le coup.

Le plus souvent, ce n'est pas si simple. Que le tapis soit encombré de cinq ou six boules, qui ont toutes chances de s'entrechoquer à chaque coup, et cela devient franchement plus complexe : il faut être fin joueur pour imaginer ce qui peut se passer, et pour marquer

le point. Pourtant, hors un fabuleux coup de chance, je ne marquerai pas ce point si mon geste n'a été guidé par une vision claire de la situation. Encore me faudrait-il ensuite une grande habileté. Mais si en plus la fenêtre est entrouverte et que nous avons des courants d'air : alors, bon vent !

C'est vrai, tout est facile lorsqu'il s'agit de jouer d'un objet simple, placé dans un contexte où tout est défini dès le départ : à toute intervention correspond un résultat qui s'en déduit directement. On peut analyser, prévoir, agir à coup sûr. Il y a bien sûr les frottements du tapis, l'imprécision de l'impact. Mais cela se surmonte aisément. Quand plusieurs objets interagissent entre eux, la complexité s'accroît très vite ; imaginer la suite possible devient laborieux, les frottements et l'imprécision prennent une ampleur inquiétante. Mais alors, si des événements aléatoires interfèrent avec le jeu, cela devient tout bonnement imprévisible. La seule possibilité du joueur est de mettre le maximum de chances de son côté.

Il n'y a pas de labour heureux... à coup sûr

Prévoir l'effet d'une modification quelconque dans la conduite d'une culture est infiniment plus hasardeu que de parier sur le résultat du jeu le plus complexe imaginé dans la partie de billard précédente. Toute intervention induit une déformation du système sol-couvert végétal qui se répercute au gré de multiples interactions, et interfère avec des événements climatiques incertains tout au long de la période de végétation. Seule une longue expérience permet, dans les cas simples, d'entrevoir les risques ou les espérances de résultat. Encore les prévisions ne trouveront-elles une vérification grossière qu'en moyenne et sur un nombre élevé de cas, c'est-à-dire sur une assiette d'espace ou de temps confondant cette collection de cas.

Il devient alors difficile de raisonner ces situations, de les optimiser, de les transposer, si on ne dispose pas de méthodes et d'outils qui aident à formaliser le fonctionnement du système sol-plante, et les différentes interactions dont il est le siège : des modèles pour aider à raisonner les systèmes.

Des modèles pas toujours exemplaires

Une approche utile peut consister à identifier des relations d'ensemble plus ou moins fondées sur des hypothèses de fonctionnement.

Le cas le plus fruste est la simple relation statistique. Par exemple, la relation entre la satisfaction de la demande d'un couvert végétal et la production (figure 1) : dis-moi combien tu mets d'engrais, je te

dirai combien tu récolteras. Et cela peut marcher, à une échelle assez globale, pourvu qu'on ne l'applique que là où on l'a mis au point, et que le contexte n'évolue pas (ne changer ni de variété, ni de pesticide, ne pas améliorer les sols, ni les dégrader, ni, ni...). Bref, pour veiller le malade, ça va. Mais s'il se mettait à guérir !

Ce peut être aussi une relation de Mitscherlich, qui décrit la réponse d'un végétal à un apport minéral (figure 2). La construction est déjà fondée sur un certain mode d'effet d'un apport supplémentaire, supposé fonction de la variation relative de l'apport total. On a pu décrire une telle relation, non seulement sur des champignons en boîte de Petri, mais aussi dans la nature. Par contre, on a toutes les chances de trouver autant d'équations que d'années et de situations.

Ce peut être encore une relation logistique, représentant la croissance. Elle est encore beaucoup plus chargée de mécanismes : la croissance est fonction d'une dynamique propre, et des ressources du milieu (figure 3). Et cela marche encore, pour des bactéries dans un fermenteur, par exemple. Mais quand on a affaire à une plante supérieure développant son cycle selon une succession de phases au cours desquelles elle oriente différemment sa croissance, et répond différemment au milieu, que celui-ci change brusquement, sans prévenir, de température, de stock d'eau, comment s'en sortir avec cet outil ?

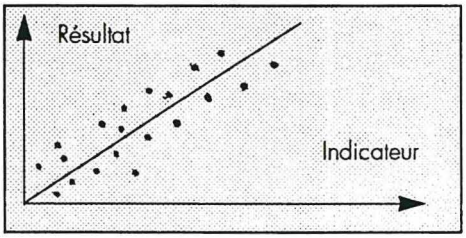


Figure 1. Corrélation.

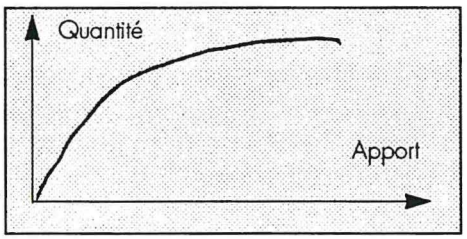


Figure 2. Mitscherlich.

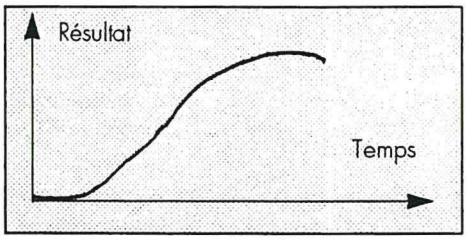


Figure 3. Sygmoïde.

LES MODÈLES MÉCANISTES

Une autre approche consiste à décomposer les processus aboutissant à la production, et à décrire les mécanismes en jeu, puis à simuler leur fonctionnement, interférant avec les événements techniques ou climatiques à mesure qu'ils surviennent.

Les modèles mécanistes de croissance et de développement des couverts végétaux sont un des moyens importants permettant de satisfaire ce besoin de formalisation du système sol-plante, et cette fonction est une utilisation importante de ces modèles.

Depuis quelques décennies, les modèles de ce type proposés par la littérature se comptent par dizaines. Leur prolifération témoigne de l'intérêt porté à la démarche. A regarder cette large palette, se dégagent quelques grandes lignes qui permettent de donner le portrait type d'un de ces modèles.

Tranches de vie

La première étape de l'analyse du processus de production d'un couvert végétal consiste à identifier une succession de phases dans le cycle de la culture. Au cours d'une phase, le couvert végétal présente un fonctionnement homogène : le potentiel photosynthétique des tissus, la destination des produits formés, la sensibilité de ces processus aux variations de l'environnement sont constants, ou évoluent selon une loi uniforme. On peut donc dire que ces phases se distinguent par les caractères de la croissance (qui seront analysés plus en détail). A titre d'exemple, disons qu'on pourra distinguer des phases durant lesquelles la croissance porte sur les racines et les feuilles ; puis les feuilles ; les racines et les tiges ; puis les tiges et les racines ; puis les grains seuls.

A priori, ces phases peuvent être les phases du développement, et elles leur correspondent largement. Toutefois, ce découpage du cycle a un objectif opérationnel dans un modèle, qui peut diverger de celui de la prise en compte des connaissances biologiques. C'est pourquoi il existe une grande variété dans le nombre et la nature des phases réellement identifiées par un modèle. Par exemple, EPIC ne distingue pas explicitement de phases, mais des changements de fonctionnement survenant à des fractions données de la durée d'accomplissement du cycle. A l'autre extrémité de l'échelle de complexité, CERES analyse le cycle des céréales en 9 phases, en comptant une phase de présemis et une phase semis-germination largement ou totalement tributaires de considérations non biologiques.

On se reportera à l'exemple retenu (figure 4), qui est le découpage du cycle du maïs par CERES.

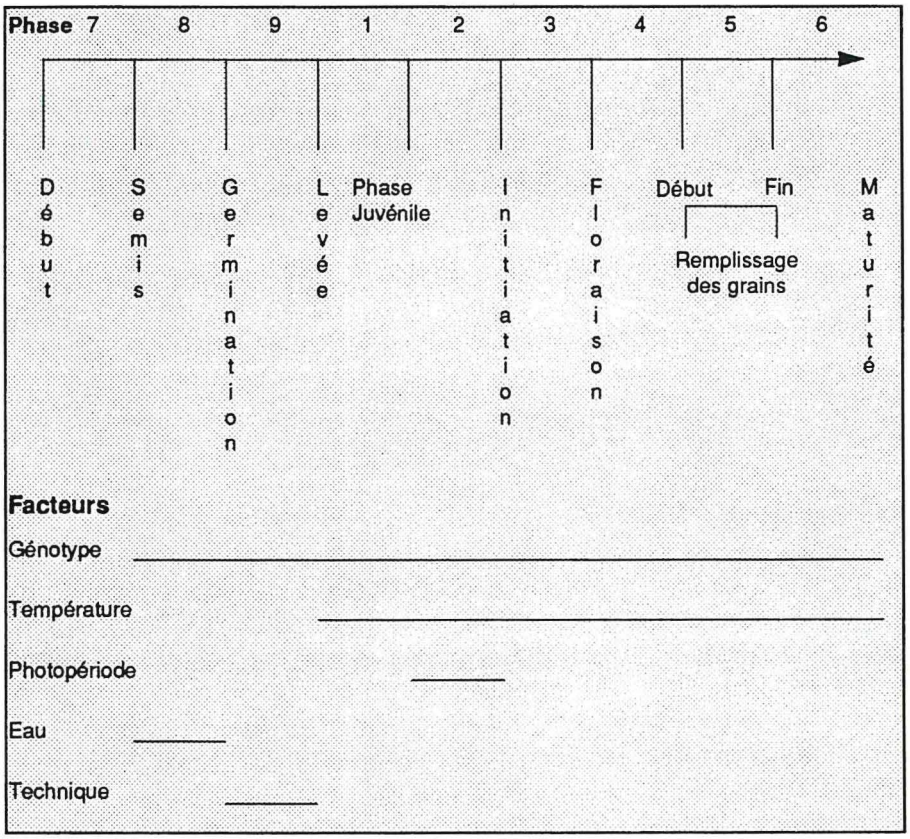


Figure 4. Phases de CERES maïs et prise en compte des facteurs de durée.

On notera que la phase 1 commence à la levée, et non en début de simulation. C'est peut-être là la trace d'un stade primitif du modèle, qui ignorait les phases préliminaires (numérotées 7-8-9).

Les bornes de certaines phases sont repérables par des indicateurs phénologiques. Ainsi, la floraison femelle ou la maturité. Mais elles peuvent aussi bien ne pas être repérables directement, comme le début de remplissage des grains après fécondation des fleurs. Ces bornes sont alors connues ou calculées à partir de ce que l'on sait du déterminisme de la durée d'une phase. C'est un point important lors de la mise au point et du calage d'un modèle.

Les facteurs qui contrôlent la durée calendaire de chaque phase ainsi définie sont multiples :

– le génotype est évidemment le facteur principal. Il définit les exigences de la plante vis-à-vis des autres facteurs ;

– la température joue un rôle sur la majeure partie du cycle (somme de températures, se référant à une température de base, une température optimale, et une loi de réponse à la température mesurée) ;

– la photopériode est prise en compte de façon diverse (seuil, effet cumulatif, sens d'évolution), et intervient sur l'initiation florale ;

– un facteur trophique peut avancer ou retarder la floraison. L'eau peut intervenir sur la durée de la phase semis-germination, par exemple ;

– une technique culturale, enfin, peut avoir un effet, comme la profondeur de semis sur la durée semis-levée.

Chaque phase identifiée correspondant à un certain mode de fonctionnement, à tout moment du cycle, nous appellerons "état de développement" la phase actuelle.

La vie quotidienne d'un couvert au temps présent

Etapes de la fabrication

Phase après phase, le couvert végétal élabore sa matière. Etrange artisan, qui façonne ses produits en plein air, et dont les circuits de distribution sont essentiellement intérieurs. En effet, c'est dans les limbes bien exposés que, du matin au soir, et de la levée à la fanaison, les ouvrières chlorophylliennes enfilent des atomes de carbone sur des rayons de soleil. Empilés sur place en grains d'amidon, les colliers de carbone sont repris dans le flux de sève élaborée et acheminés vers les sites de consommation, dans les profondeurs du couvert. Cette évacuation peut se poursuivre tard après la cessation de travail de fabrication, résorbant l'amidon des feuilles.

On analyse ces processus, ainsi que représentés sur la colonne de gauche de la figure 5, en quatre étapes successives :

– interception du rayonnement solaire ;

– conversion de l'énergie radiante ainsi captée en énergie chimique des liaisons du carbone ;

– distribution des sucres formés, selon des règles de partition des assimilats, vers les différents postes de consommation ;

– sorties, enfin, par respiration ou exsudation de matière, ou par sénescence de tissus.

Tant que la quantité d'énergie absorbée excède la quantité perdue, la croissance pondérale se poursuit.

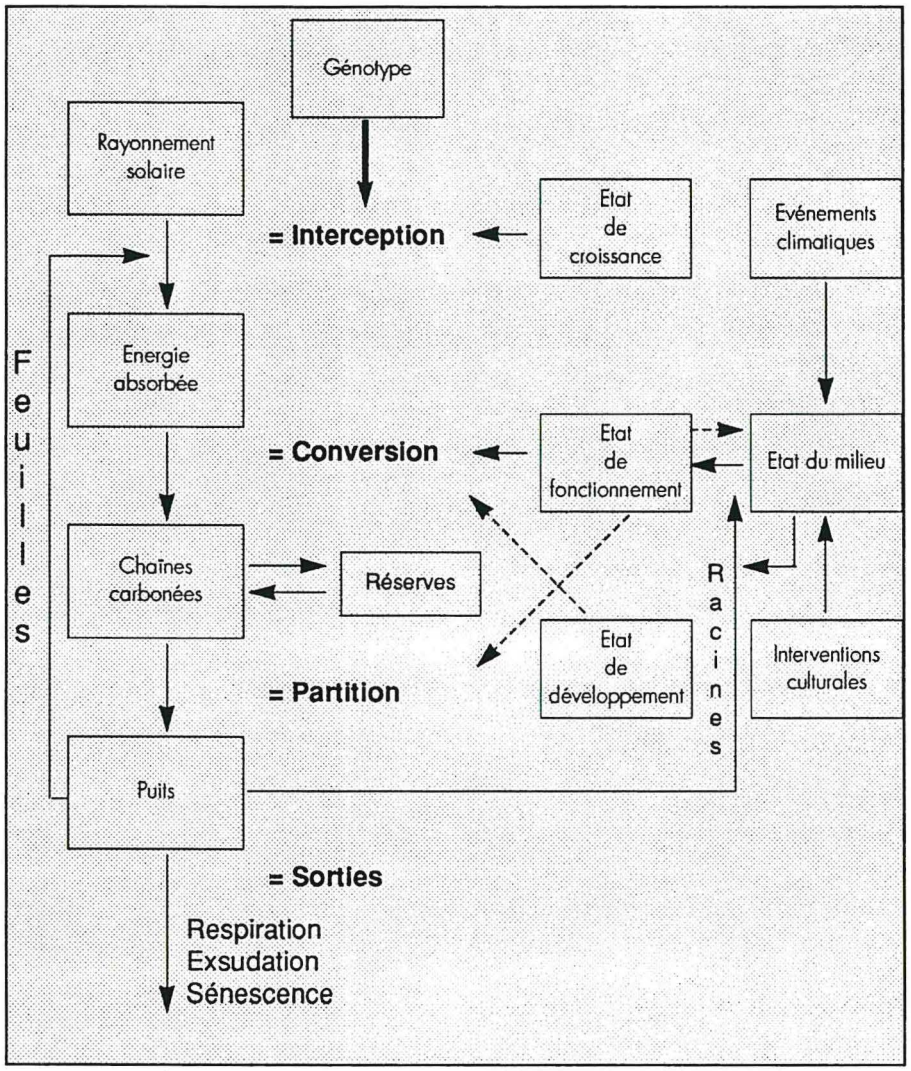


Figure 5. Analyse de la production de matière végétale.

Etat de la plante

L'efficience des mécanismes en jeu dans ces différentes étapes est contrôlée par des caractères liés au génotype (port et couleur des feuilles, type de cycles photosynthétiques, architecture de la plante...). Elle est cependant également tributaire de l'état de la plante, analysé par des variables d'état (états de croissance, de fonctionnement, de développement). Les principales dépendances sont figurées sur le schéma.

L'état de croissance, par exemple, représenté ici par l'importance de l'indice foliaire, conditionne la proportion de rayonnement intercepté.

Par état de fonctionnement on entendra un coefficient synthétique prenant en compte, notamment, le statut minéral et hydrique (éloignement de l'optimum), la température des tissus. Ce coefficient, compris entre 0 et 1, est appliqué au facteur de conversion optimal de l'énergie.

Cette présentation est tout à fait schématique. Dans une représentation idéale, toutes les variables d'état de la plante interviennent, à des degrés divers, à chaque étape. C'est particulièrement vrai de la dernière étape, et notamment du poste de sénescence des tissus. Ceci n'a pas été figuré pour des raisons de clarté. Dans les modèles existants, les effets pris en compte, comme la façon de les faire intervenir dans les processus décrits, sont extrêmement variés.

Etat du milieu

L'état de fonctionnement du couvert végétal est sous l'influence de l'état du milieu, décrit également par un certain nombre de variables d'état : minéral, hydrique, mais aussi physique et physico-chimique, dont dépend particulièrement l'implantation et le fonctionnement des racines.

En bout de chaîne, c'est avant tout l'état du milieu qui est modifiable par les interventions culturales. Mais il est altéré également bien sûr par l'action des racines — effets physiques, physico-chimiques, échanges quantitatifs —, et les événements climatiques (pluie, demande évaporative...). Il a enfin une dynamique propre (activité biologique...).

Bilan

Le fonctionnement du système sol-plante a abouti, en fin de journée, à une modification quantitative des tissus et réserves de la culture, et à de nouveaux états de la plante et du milieu, qui présideront à la croissance du lendemain.

Un des résultats de la croissance est le déploiement des capteurs, feuilles et racines, qui vont contribuer en retour à définir les futures variables d'états.

L'analyse, arrivée à ce stade, propose un schéma de croissance et développement de la plante étudiée, que l'on peut préciser, et qui constitue en soi un support de travail.

La mise en musique

On sait que Racine — à moins que ce ne fût Corneille —, interrogé sur l'avancement de sa tragédie alors sur le métier, expliqua qu'elle

était à peu près achevée, ne lui restant plus qu'à l'écrire. Ainsi de ce qui précède : une fois conduite l'analyse, il "ne reste plus qu'à" faire le modèle. L'alexandrin n'est pas exigé.

Des silences et des soupirs

Sans doute la première chose à faire est-elle de donner forme aux relations répertoriées, de quantifier les termes identifiés.

• Première règle d'or : l'approche est hiérarchique. Il faut d'abord définir les phases, avec ce que l'on en sait. On peut alors décrire le fonctionnement du couvert sans contrainte, hors la quantité de rayonnement. Toute contrainte viendra se surimposer en pénalisant le fonctionnement optimal. La contrainte thermique prime la contrainte hydrique, qui passe avant la contrainte minérale. C'est la hiérarchie adoptée la plus courante.

• Deuxième règle d'or : une des propriétés de tout système est la totalité, comme le rappelle Von Bertalanffy. Pour prétendre faire fonctionner le modèle, toute étape identifiée doit être renseignée. Cela pourrait se traduire, en termes plaisants, en admettant que "si l'on ne sait pas, on met à peu prés". En fait, il s'agit de formaliser une relation insuffisamment connue de la façon la plus satisfaisante possible. C'est le principe même de la prise de décision : faire des choix avant d'avoir tout maîtrisé.

Nous voilà placés d'emblée dans une démarche finalisée, qui évalue au mieux, et accepte un risque. On ne peut échapper à la question préalable : à partir de quelle quantité de connaissance est-ce un risque raisonnable d'aller plus loin ? et à la réponse : mis à part les cas où l'on ne connaît rien, c'est en y allant qu'on peut le savoir. C'est en effet à l'usage qu'on mesure l'utilité de l'outil. Surtout, c'est en le maniant qu'on peut prétendre l'améliorer. A ce jour, face au travail accompli par différentes équipes, la question ne se pose pas tout à fait en ces termes. Mais il y a des choix tactiques, à chaque étape, entre se contenter d'une solution provisoire sur un point ou approfondir la connaissance que l'on en a.

Pour donner une idée des questions qui torturent les modélisateurs cherchant à pallier nos lacunes, en voici quelques-unes : comment s'arbitrera la partition des assimilats (partage fixe ou avec des priorités, sensible ou non au milieu) ? Quelle est la forme de la relation entre un état de la plante et son fonctionnement (par exemple "teneur en azote x conversion d'énergie"). Comment se combinent plusieurs contraintes simultanées (loi du minimum, addition, multiplication...) ? De même, une série de questions se posent quant à la caractérisation et au fonctionnement du milieu (variables d'état, variables de flux).

• Troisième règle d'or, qui n'est pas forcément respectée : entre deux solutions équiprobables, ou "équiopérationnelles", la plus simple est à retenir.

Un air de rengaine

Il reste à monter l'ensemble, pour ordonner les étapes du fonctionnement du modèle s'appliquant à des situations concrètes. C'est sur ce schéma précis que sera construit le modèle informatique. A ce point, la construction générale est assez commune, et, pour éviter un long développement, on la schématisera ainsi :

● A la clé : les informations de départ
– situation géographique (latitude, longitude)
– situation initiale (date. état du milieu)
– caractéristiques du sol et de la variété

● Refrain : la séquence journalière
– données climatiques et interventions culturales
– état de développement du couvert végétal
– état du milieu
– bilans (eau-minéraux)
– état de fonctionnement du couvert végétal
– production de matière et perte
– répartition de la matière formée
– état de croissance du couvert végétal

● Finale : les informations d'arrivée
– cycle calendaire
– productions totale et utile
– consommation minérale et hydrique
– état final du milieu
– contraintes identifiées

Chaque étape est organisée elle même selon un ordre assez constant. Par exemple, pour le bilan hydrique journalier :
– entrées d'eau
– consommation potentielle
– offre du sol
– consommation réelle
– indicateur de satisfaction
– état final

Les répétitions avant le concert : la chasse aux dissonances

Il reste encore à faire la mise au point. Bien que ce soit une des étapes les plus importantes et souvent les plus laborieuses, elle ne sera pas développée ici. La démarche comprend en particulier des calages de paramètres, des études de sensibilité, des validations. Toutes ces opérations doivent répondre à un certain nombre d'exigences méthodologiques strictes, mais pourtant pas toujours clairement définies. En fait, cette démarche, qui tend à tester et à ajuster le modèle se poursuit indéfiniment, dans un aller-retour entre la modélisation et le terrain, parallèlement à la mise en œuvre du modèle, à partir du moment où il devient utilisable.

A PROPOS DES SYSTÈMES DE CULTURE

Ce qui a été dit sur la modélisation de la croissance et du développement des cultures est englobé par la modélisation des systèmes de culture. S'y ajoute cependant l'aspect pluriannuel, qui prend en compte l'évolution du sol sous l'effet du mode de gestion de la parcelle.

Nous n'avons pas investi suffisamment de temps sur cet aspect pour en dire plus que quelques mots, avec toutes les précautions qu'exigent et la faiblesse de cet investissement, et la complexité du problème.

Notre intérêt porte principalement sur la dynamique du profil cultural, considéré comme la mémoire du système de culture. Et nous voyons deux façons de l'aborder.

Suivre le devenir du profil au fil des ans

Dans l'exemple d'EPIC, qui est le seul modèle que nous connaissions dans ce domaine, il s'agit de suivre l'évolution des états d'une parcelle sur une longue période, sous l'effet d'un système de culture et de conditions climatiques simulées. Cette approche paraît poser deux problèmes :

– les successions culturales sont simplement la prise en compte de l'état final de l'année n en tant qu'état initial du sol de l'année $n+1$. D'une part, ceci ne fait aucune part à l'effet précédent, autrement que par les bilans. D'autre part, l'interculture n'est absolument pas prise en compte, sinon en faisant tourner le compteur climatique : comment intervient le passage d'un troupeau sur mon champ de maïs de la dernière saison, avec toutes les conséquences que cela présente pour la sensibilité à l'érosion au début de la prochaine saison ?

– le caractère prédictif sur *n* années est hautement discutable : supposons que par un travail d'une extrême qualité on puisse prévoir l'état final avec 95 % de chances de succès. Ceci est vraiment déjà extraordinaire, puisque les variables d'entrée ont rarement cette précision, et que le modèle-plante que comprend EPIC est grossier.

Sur vingt ans, la prévision se fera à $(0{,}95^{20})$, c'est-à-dire 36 %. Cet exercice ne paraît pas vraiment attrayant.

Formaliser le fonctionnement du profil sous culture

Le système de culture est certes intéressant parce qu'il peut induire des bilans très différents, mais ceci n'est qu'une conséquence de ce que la gestion de la parcelle peut imposer au profil des régimes très contrastés, qu'il est important d'approcher de manière systémique.

Ainsi, lorsqu'on maintient une couverture morte sur le sol au lieu de travailler la parcelle, on modifie le régime des apports organiques, le régime thermique du sol, le régime hydrique, et on ne brasse pas les horizons supérieurs. Ceci entraîne une différence probable dans les propriétés physiques du profil, la dynamique et la colonisation racinaire, l'activité biologique, donc dans la dynamique de l'azote, etc.

Cela s'imagine assez bien, mais comment prévoir l'effet résultant si on ne décrit pas l'ensemble, avec toutes ses interactions et ses régulations sur un schéma, à l'aide duquel on puisse imaginer les "déformations" du système sous l'effet d'une technique ; si on ne cherche pas à quantifier les flux et à établir leur déterminisme?

C'est donc ce schéma qu'il faudrait chercher à établir, et il semble que les systèmes de culture très contrastés mis au banc d'essai par les équipes de l'IRAT soient un bon support pour l'expliciter.

UTILISATIONS DES MODÈLES MÉCANISTES

Organiser et évaluer la connaissance

L'exercice qui consiste à construire le schéma d'ensemble de fonctionnement d'un système milieu-couvert végétal apporte en soi un certain nombre d'informations précieuses.

Ce schéma permet de rapprocher les connaissances dans une vision d'ensemble, qui éclaire le domaine d'étude, teste la cohérence des acquis, et identifie les points bien assurés et les lacunes.

Il permet d'autre part de situer les actions d'un groupe de chercheurs les unes par rapport aux autres. De ce fait même, chacun se repère dans le groupe, les complémentarités et les synergies s'ajustent et se renforcent en s'explicitant. Les pressions de recherche sont évaluées, et comparées aux lacunes.

Du point de vue de la programmation de recherche, la confrontation des demandes exprimées au groupe, des pressions de recherche actuelles, des besoins de connaissance, des objectifs du groupe et des possibilités d'action va faciliter les choix de priorités de travail.

Du point de vue méthodologique, un schéma de fonctionnement clair est un support précieux pour identifier les variables pertinentes, et en fin de compte les indicateurs les plus opérants pour saisir une situation concrète.

Structurer l'analyse des situations

Un deuxième type d'utilisation des modèles est de proposer un schéma de raisonnement des situations de travail, et d'abord une trame pour l'interprétation de résultats expérimentaux. Ceux-ci sont restitués dans leur contexte d'obtention, et donc relativisés et délocalisés.

Lorsqu'on dispose d'un réseau de résultats expérimentaux qui ont pu être interprétés en tenant compte des interférences dues aux conditions locales, et replacés dans le schéma de fonctionnement commun, la généralisation des résultats devient envisageable, et notamment les variations d'effet, et les risques encourus dans une gamme de situations pédoclimatiques possibles. Moins qu'une extrapolation, c'est une interpolation dans le champ de variabilité expérimentale étudié.

Les modèles peuvent enfin apporter leur contribution dans le diagnostic de situations. Si l'on veut bien comparer la démarche agronomique à la démarche policière, on pourrait dire qu'elle comprend trois étapes :

– la collecte des indices (enquête proprement dite, permettant de préciser les faits et d'identifier des facteurs suspects) ;

– l'interrogatoire des suspects (expérimentation, qui consiste à créer les situations qui vérifieront les hypothèses) ;

– la reconstitution des faits (simulations, replaçant les informations dans un ensemble qui permet de vérifier en particulier le bien-fondé des hiérarchies de facteurs limitants).

La simulation permettra en outre d'explorer des solutions possibles et de sélectionner un certain nombre de remèdes, qui resteront à tester.

Aider à la décision

Le troisième champ d'application des modèles est l'aide à la décision, aux différents niveaux où elle est prise (agriculteurs, groupements et structures d'encadrement, autorités locales ou nationales), et aux différents horizons qu'elle vise (intervention immédiate, prochaine récolte, tendance, perspectives). Ce sont évidemment des informations de types très différents, dans leur nature et leur qualité (précision, robustesse), qui sont nécessaires selon l'utilisateur.

En particulier, l'identification et l'évaluation des facteurs limitants en temps réel en cours de culture permettent le pilotage de l'irrigation, de la fertilisation, des traitements divers.

La connaissance des conditions déjà acquises au cours d'une campagne, et des espérances de prochaines situations avant les récoltes, sert de base aux prévisions de production, sur une échelle évidemment plus vaste. Ces prévisions s'affinent avec l'avancement de la campagne.

L'application de modèles de croissance sur des bases d'informations géographiques autorise l'établissement d'espérances d'effet d'une technique ou de potentialités régionales.

Enfin, il est possible d'envisager des simulations prospectives permettant de prévoir des effets possibles de tendances constatées : extensions de surfaces, évolution du sol, du climat, des techniques, évolution du contexte socio-économique, entraînant celle des choix techniques.

Sans doute les études prospectives, fondées sur l'extrapolation stricte à des types de situations nouveaux, constituent-elles un genre particulier d'aide à la décision qui mérite une réflexion spéciale. Nous y reviendrons plus loin.

Une palette d'objectifs, d'exigences et de solutions

Il n'est pas besoin de dire (mais peut être est-il bon de le souligner!) que la qualité du résultat de ces différents exercices est évidemment extrêmement dépendante de la valeur du modèle.

Il va aussi sans dire, de la même façon, que le plus beau modèle du monde ne peut donner que ce qu'il a, et que le résultat est tributaire de la qualité et de l'importance de l'information dont on le nourrit.

Enfin, et en tout état de cause, une simulation n'étant pas un fait, l'information qu'elle retourne reste du domaine de la simple probabilité, et la vérification demeure une étape indispensable.

Un autre aspect qui apparaît clairement, dans cette rapide revue, est la variété des degrés d'élaboration demandés aux modèles (du schéma à la prévision quantitative), et des questions posées, qui déterminent en particulier les caractéristiques de modèle recherché. Ceci entraîne que la démarche est opérationnelle d'emblée pour un certain nombre de ses applications, et qu'elle doit ménager une gamme d'outils de simulation en rapport avec la diversité des objectifs.

POUR PROVOQUER UNE DISCUSSION

Il faudrait plus de temps pour évoquer des sujets essentiels comme les conditions à réunir pour aborder les modèles, et leurs implications, les limites de la démarche, les éléments de choix et de priorité de ce que nous pouvons faire sur ce terrain. Et c'est tant mieux car, pour être essentiels, ils demandent à être débattus, et plus longuement mûris.

On préférera s'arrêter à quelques notes livrées à la réflexion du lecteur.

Prospectives et placebo

On peut émettre bien des réserves sur les extrapolations des modèles hors de leur zone de test. Par exemple, quelle fiabilité a une simulation de ce qui va se passer lorsque la température ou le taux de gaz carbonique terrestre auront augmenté de *n* points, — à supposer que cela se passe, et qu'on sache quel rééquilibrage d'ensemble, et quels choix cela va entraîner —, si cette variation n'a pas été prise en compte dans les calages et les validations du modèle utilisé ?

Un autre aspect est la prévision de résultats fins sur de grandes régions à partir de modèles sophistiqués (mais incomplets), avec des bases de données géographiques grossières, telles que des cartes pédologiques à petite échelle. Autant prolonger une chaîne d'arpenteur par une chaîne de montre.

Pourtant, beaucoup d'adeptes des modèles s'adonnent à ce genre d'extrapolations, acceptent ce genre d'approximations. Ils trouvent toujours un résultat. On en fait des cartes aux couleurs éclatantes. Et des décideurs achètent très cher ces cartes. Marchés de dupes? Pas tout à fait. Ils ont en main des éléments d'une décision dont ils n'ont plus à supporter la charge affective. Cela a son prix, autant que la cartomancienne qui rassure le politique ou le joueur de casino. De

toute manière, il n'y a pas de meilleure méthode, et le placebo n'aura d'effet qu'autant qu'on voudra bien le considérer comme un médicament. Devons-nous pour autant ignorer sa véritable nature, et nous lancer dans cette ("bonne") aventure ?

Cela ne signifie pas que ces exercices sont toujours faits à ces fins, ni qu'ils sont inutiles : il faut bien aussi faire de la prospective, et la faire avec les maigres outils dont on dispose. C'est par cette pratique qu'on pourra aussi les ajuster progressivement. Mais n'y a-t-il pas une réflexion à conduire, à propos de ces outils, sur la cohérence entre l'échelle à laquelle ils peuvent travailler, celle à laquelle on conduit la simulation, le "degré d'imprévisibilité" des situations embrassées, et la précision des résultats proposés ?

En quoi modèle rime-t-il avec fidèle ?

Bien que ce document aborde les modèles par des exemples pris dans le domaine de la physique, il apparaît bien au fil du texte qu'il existe une différence radicale entre les modèles physiques et les modèles biologiques, en raison de la variété infinie du fait biologique, de sa complexité redoutable, et, partant, de la moindre maîtrise qu'on peut en avoir. Les différences entre les deux approches mériteraient un débat en elles-mêmes.

La diversité des solutions retenues pour décrire un même processus dans les modèles de la littérature reflète, au-delà de la variété des objectifs, celle des hypothèses adoptées pour pallier les défauts de connaissance de nombreux mécanismes, même lorsque ces modèles ont une ambition universelle.

Les choix retenus reposent parfois sur des bases bibliographiques bien étroites, et peuvent être simplement adaptés aux cas rencontrés par les auteurs. Les processus ignorés impliquent aussi des choix par défaut, d'autant plus gênants qu'ils sont méconnus.

On pourrait reprendre le calcul fait pour la simulation de l'évolution du sol sous un système de culture, en remarquant que, même avec une probabilité de prévision d'un jour à l'autre très proche de l'unité, l'itération sur 100 jours de cycle aboutirait à une imprécision énorme. Pourtant, les résultats sont fréquemment bien meilleurs qu'on pourrait attendre. Comment expliquer cela ? Simplement, les modèles sont calés sur des dizaines de situations. De plus, beaucoup de paramètres, comme le coefficient de conversion de l'énergie reçue, sont en fait ajustés sur de longues périodes, et de façon empirique. Leur robustesse tient à ce qu'ils reposent sur de très nombreux cas concrets.

Dans ces conditions, il est illusoire de croire que l'on procède à la prédiction d'un résultat inconnu par pure application de

mécanismes. On ne fait que tâcher de prévoir les variations autour d'une tendance moyenne bien connue et prise en compte, et le formalisme mécaniste est bien utile à cet exercice.

Cela rappelle, encore une fois, que ces modèles sont chargés d'empirisme, et qu'à ce titre on ne peut que faire des interpolations dans la trame des situations qui ont servi à asseoir le modèle, mais pas d'extrapolations au-delà de ce territoire bien connu. On ne saurait s'en plaindre : c'est justement l'empirisme qui est, par définition, le garant de leur ancrage dans la réalité.

Au-delà de cette mise au point, on ne peut perdre de vue deux aspects qui opposent les exemples physiques évoqués dans le texte et les modèles de systèmes biologiques abordés ensuite.

• L'identification du principe d'Archimède est celle d'une relation simple. L'exigence de totalité d'un système implique au contraire que le modèle qui le représente propose un ensemble cohérent de relations, dont certaines peuvent ne pas être renseignées. Cela fait qu'un modèle peut être approximatif, mais c'est aussi en cela qu'il met en lumière les insuffisances d'une analyse, et qu'il permet une formulation correcte des questions qu'elle soulève.

• Le résultat du jeu de billard est simple : gagné ou perdu. Le résultat des simulations abordées est plus complexe : d'abord parce que l'on va plutôt se référer à un certain degré de précision (ou d'imprécision), et juger si celui-ci est ou non acceptable ; ensuite, parce que l'exercice n'apporte pas seulement (et quelquefois n'apporte pas du tout) des valeurs simulées à confronter à des valeurs réelles, mais une structuration de la réalité, de la situation proposée, qui sert de support à son raisonnement.

Aussi bien, la fidélité, et l'utilité, d'un modèle ne se confond pas avec sa précision. Mais on voit bien que l'on en arrive très vite à l'évocation des critères de jugement des outils, qui justifieraient un long développement.

Modèle pourrait rimer avec fonctionnel

On a vu que la construction d'un modèle, destiné à des fonctions particulières, est en permanence tributaire de contraintes diverses qui peuvent, à certains moments, primer sur les considérations de mise en forme de la connaissance acquise. Par exemple, le découpage en phases de développement peut être très variable. Il faut garder à l'esprit que l'objectif n'est pas de peindre la réalité, mais de répondre à une fonction.

En particulier, on ne peut pas avoir d'à priori quant au caractère trop simplificateur de certains schémas, s'ils s'avèrent fonctionnels.

Cela est d'autant plus vrai que plus un schéma identifie d'étapes, plus il propose de causes d'incertitude, et plus il se révèle difficile à vérifier dans la pratique, donc à valider : la complexité gratuite finit par se résoudre en complication (qui peut s'avérer coûteuse).

Enfin, on ne peut perdre de vue qu'un objet n'est modélisable que parce qu'il est regardé comme un système, et qu'à ce titre des groupes de processus décrits peuvent constituer eux-mêmes un système, avec ses propres régulations : il devient alors avantageux de s'en tenir à l'ordre supérieur d'organisation.

Ce qui paraît par contre important, c'est que :

– la simplification n'entraîne pas jusqu'à l'escamotage du schéma de base de fonctionnement, et n'aboutisse pas à une simple relation statistique, qui n'a plus rien à voir avec une simplification ;

– les conséquences des choix arrêtés ne soient pas ignorées.

Modèle ne rime pas avec universel

Dans "La Pensée sauvage", Claude Lévi-Strauss nous explique qu'un tableau représente sur un plan une scène qui se déroule dans l'espace et dans le temps, et qu'une œuvre d'art est ainsi toujours un modèle réduit. Mais l'artiste apporte en revanche son "mode de fabrication", sa solution parmi bien d'autres : "la vertu intrinsèque du modèle réduit, dit-il, est qu'il compense la renonciation à des dimensions sensibles par l'acquisition de dimensions intelligibles."

On peut soutenir de la même façon que, s'il n'est pas nécessairement une œuvre d'art, un modèle est toujours réduit, en ce qu'il est une représentation d'une réalité simplifiée, débarrassée de tous les aspects auxquels on ne donne pas de signification dans la perspective de ce modèle.

Cette simplification permet de gagner sur la compréhension (relations), sur le temps (prévisions), ou sur l'espace (maquettes, cartes) : même si notre connaissance de la réalité n'était pas un facteur limitant, un modèle n'aurait de raison d'être que par un choix de simplification, et ce choix est défini par sa destination (autant de représentations cartographiques que d'usages). Non seulement chaque objet appelle son modèle particulier, mais aussi, pour chaque usage d'un même objet, il nous faudrait un modèle adapté : pour une même culture, il n'y a pas de modèle universel, et LE meilleur modèle n'existe pas.

C'est encore une fois insister sur la diversité nécessaire des modèles : à chaque tâche son outil. A chaque objectif son modèle.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

V

LE FUTUR DE L'AGRICULTURE TROPICALE : AJUSTER LES SYSTÈMES DE CULTURE AU MILLIMÈTRE PRÈS

F. FOREST

Face au défi vivrier de l'an 2000, auquel est confrontée la communauté des pays tropicaux, la recherche agronomique se doit de redéfinir sa stratégie d'action, certes en tenant compte de ses acquis et expériences (près de trente années d'intervention...) ; mais elle doit aussi, et surtout, prendre en considération la nécessité de traduire ses principes, concepts et réalisations en technologies simples, utilisables par des agriculteurs le plus souvent démunis en moyens et confrontés à une évolution rapide (dans le sens de la dégradation) de leur environnement.

La recherche agroclimatologique, dans ce contexte, est en mesure d'apporter un ensemble de connaissances, méthodes et modes opératoires susceptibles de contribuer à la mise au point de systèmes de culture compatibles avec l'urgence à court terme pour accroître significativement la productivité et, souci désormais commun à la communauté scientifique mondiale, préserver les ressources naturelles de notre planète.

DEUX CONCEPTS IMPORTANTS : LE BILAN HYDRIQUE ET LE BILAN D'ÉNERGIE

Les relations entre le climat, le sol et la végétation sont réglées selon deux lois fondamentales qui régissent l'ensemble des flux au sein du système terre-océan-atmosphère.

• Le bilan hydrique est une expression de la loi de la conservation des masses, base du fonctionnement de l'hydrosystème.

L'alimentation hydrique des cultures (évapotranspiration réelle, ETR) est dépendante, d'une part, de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère (équivalant à 20-30 mm, soit une sécurité de 8 à 10 jours) et, d'autre part, de l'évaporation de l'eau à partir des océans, qui permet de réapprovisionner ce stock atmosphérique (Monteith).

• Le bilan d'énergie, désormais appréhendé à l'échelle régionale (grâce à l'outil satellitaire, Imbernon *et al.)*, est fondé sur le principe identique de la conservation, et régit les flux de chaleur entre la surface et l'atmosphère sous l'effet d'un facteur (albédo) déterminant la part d'énergie captée par le sol — nu ou plus au moins couvert — utilisable sous la forme de l'évapotranspiration potentielle, ETPc.

L'activité agricole, en tant que processus de gestion d'une partie de la surface de la terre, joue par suite un rôle actif dans la modulation et la répartition de ces flux de masse et d'énergie.

Les travaux d'Assad (thèse IRAT) et de Wallace (ICRISAT) ont ainsi montré l'influence du taux de couverture végétale du sol sur la valeur du rayonnement net et ont permis de mettre en évidence deux logiques complémentaires : d'une part, la logique radiative, qui se traduit par des échanges exclusivement thermiques (processus de désertification), d'autre part, la logique hydrique, par laquelle le mécanisme d'évaporation (évapotranspiration) de l'eau régule les amplitudes thermiques journalières et crée les conditions favorables au fonctionnement photosynthétique des plantes.

En clair, les agronomes ne pourront développer des technologies durables sans comprendre l'ampleur des mécanismes mis en jeu :

– d'une part, la pluviosité, les écoulements superficiels, l'infiltration, la percolation, l'évapotranspiration, l'accumulation de l'eau, qui commandent, en interaction avec les propriétés hydrauliques et physico-chimiques des sols, la croissance et le développement des espèces végétales ;

– d'autre part, l'effet en retour de l'activité agricole — culture, élevage, foresterie —, qui détermine, par son développement ou sa régression, les conditions favorables garantissant le maintien de la logique hydrique ou accentuant le processus d'aridification.

Les travaux de Monteny en Côte-d'Ivoire ont ainsi attiré l'attention de la communauté scientifique en mettant en évidence le rôle significatif de l'évapotranspiration de la surface forestière sur l'intensité du mécanisme de réalimentation en vapeur d'eau de la mousson, qui via la pluviosité, conditionne la durée et la qualité de l'hivernage dans les régions soudano-sahéliennes.

Notre mandat — à savoir la promotion des cultures vivrières dans des zones où le risque climatique est très lié soit à la lutte contre la sécheresse, soit à la lutte contre l'érosion et la dégradation biologique —, se trouve en partie soumis à une approche beaucoup plus globale de l'activité agricole. Cela passe par une révision de nos certitudes et hypothèses, à reconsidérer selon un repérage "espace-temps" approprié à l'ampleur des mécanismes mis en jeu. Cette réorientation est directement liée à notre prise de conscience du caractère contingent de la notion de réussite de l'activité agricole en l'absence d'une analyse et d'une accession progressive à la connaissance des processus qui régissent les relations entre l'homme, le continent, et sa biosphère.

Dans cet esprit, l'agronomie est en mesure de dépasser le recours par trop souvent systématique à l'expérimentation en petites parcelles, à l'utilisation routinière de l'outil statistique (qui soutient plus qu'il n'éclaire...), en s'attachant à identifier les mécanismes

régissant l'offre et la demande en ressources naturelles et la diversité de leur expression, déterminée par la variabilité temporelle et spatiale des conditions d'exploitation de ce milieu.

En passant rapidement en revue les réflexions menées par l'agroclimatologie à l'IRAT-CIRAD, notre souhait, outre d'informer nos collègues intervenant sur le système plante, est bien évidemment de contribuer à l'émergence de travaux, connaissances et réalisations ambitieux en rapport avec l'importance du défi auquel nous sommes confrontés.

LE BILAN HYDRIQUE, FACTEUR PRÉPONDERANT DU RISQUE AGRICOLE

L'actualité récente nous suggère que le bilan hydrique doit être analysé comme un facteur complexe de la production et de l'économie agricole non seulement dans les zones tropicales mais aussi dans les milieux dits "tempérés" où, semble-t-il, la modernisation et l'intensification agricole auraient contribué à l'émergence insidieuse de facteurs de sécheresse : déboisement, remembrement, plasticulture, mécanisation mal gérée...).

A titre de rappel, on considérera l'équation générale du bilan hydrique suivante, proposée par Lal :

$$\text{Pluie} - \text{Ruis} - \text{dr} - \text{Esn} - \text{TRh} - \text{TRc} - \text{dS} + \text{I} = 0$$

- Le flux évaporatif est scindé en trois composantes essentielles :

– Esn, l'évaporation de la surface du sol non couverte ;

– TRh, l'évapotranspiration du couvert herbacé ;

– TRc, l'évapotranspiration de la culture vivrière.

En monoculture classique, seul le flux TRc est considéré comme productif. Le flux Esn, notamment en zone aride, bien qu'il soit une perte en masse préjudiciable pour la recharge du sol, joue un rôle bonificateur en créant un microclimat humide au niveau de la strate foliaire pendant un laps de temps d'autant plus long que le sol superficiel est argileux (travaux de Cortier *et al.*, CNRA de Bambey, modèle de Ritchie...).

Pour compléter la formulation de Lal, il serait opportun que le CIRAD s'emploie à intégrer une quatrième composante, à savoir, quantifier l'évapotranspiration de la strate arborée, notamment pour le cas des aménagements intégrés (lutte contre l'érosion, l'advection, et minimisation de l'ETP).

• Le ruissellement (Ruis) et le drainage sous les racines (dr) sont susceptibles d'être affectés du signe négatif (cas des cultures associées et des remontées capillaires). Ils nécessitent pour être caractérisés des dispositifs méticuleux et parfois complexes, que ce soit à l'échelle de la parcelle ou à celle du versant et du bas-fond (Lidon, Sabatier, Perez).

• La variation de stock (dS) fait l'objet de mesures par techniques neutroniques et constitue encore l'une des techniques indirectes les plus accessibles pour l'estimation de l'ETR (Dancette, Chopart, Vaksmann, Affoldher) à l'échelle de la parcelle.

Le suivi du flux de sève (Reyniers, Valancogne, Rivière) et la détermination du rapport de Bowen (dispositif Agroclim System en cours de test au CEMAGREF, à Montpellier, Baron *et al.*) devraient à court terme permettre des suivis plus fins du bilan hydrique répondant aux exigences des physiologistes et agronomes.

• L'irrigation (I) apparaît bien comme un flux complémentaire dont la quantification (dose, fréquence) demeure bien dépendante de la maîtrise de l'ensemble de l'hydrosystème. Soit une complexité qui n'est pas sans rapport avec les déboires rencontrés dans les périmètres irrigués où la formation des utilisateurs se limite à la seule gestion des équipements. (Quideau, Langellier, Guillaume...).

L'objectif de l'agriculture est d'accroître la production agricole en réponse à la demande démographique. Il convient donc d'orienter la gestion de la ressource pluviométrique vers le flux productif qu'est l'ETR. La relation est de type linéaire pour le système vivrier à base de mil, sorgho et maïs en Afrique de l'Ouest, avec une efficience de l'eau de l'ordre de 4 kg de grain/mm-ETR (projet ESPACE, 1991). Au Brésil, dans les cerrados, avec l'application de modes de gestion intensifs (rotation, protection du sol, fertilisation), l'efficience peut atteindre 25 kg/mm-ETR en maïsiculture (Seguy *et al.*...). En Europe, elle atteint et dépasse 35 kg/mm-ETR dans le cas de la maïsiculture avec irrigation de complément (action IRAT/SOPRA).

Cette comparaison des efficiences de l'eau nous amène à la considération agroéconomique suivante, qui, nous l'espérons, devrait permettre de faire avancer le débat sur l'intensification.

L'efficience de 4 kg/mm/ha de grains, constatée en Afrique de l'Ouest, correspond à des pratiques extensives non coûteuses en intrants et traduit une relative stabilité du système et sa faible sensibilité aux aléas pluviométriques. Dans le contexte actuel d'une augmentation de la variabilité climatique, intensifier ces systèmes pour espérer atteindre l'efficience de 20 ou 30 kg/mm — sans créer les conditions d'un accroissement de la ressource hydrique et d'une minimisation du risque de sècheresse — nous semble irresponsable.

On notera, en outre, qu'à pluviosité et technicité égale, les efficiences en eau du maïs sont inférieures en milieu tropical, en raison des pertes énergétiques nocturnes plus importantes liées à la prédominance de températures plus élevées, favorables à une respiration accrue de la plante (combustion).

D'une manière générale, les agronomes auront, non seulement à favoriser le flux productif ETR, mais aussi à concevoir une gestion de l'espace garantissant une réduction de la demande évaporative non utile.

RÉDUIRE LE RUISSELLEMENT ET L'ÉVAPORATION EN SITUATION ARIDE

Le ruissellement

S'il est pratiquement impossible de manipuler la ressource pluviométrique (stimulation par ensemencement des nuages), il a été largement démontré qu'il est possible d'agir sur le ruissellement (15 à 40 % de perte à la parcelle) en mettant en œuvre des modes de gestion de l'espace agricole améliorant l'état de surface (Valentin, Vaksmann, Perez...) et, par suite, l'aptitude de celui-ci à capter l'eau de pluie.

Cet objectif est fondamental pour les agronomes du CIRAD, car il a l'avantage de proposer un terrain d'action à la dimension des enjeux écologiques et économiques qui conditionnent le futur des sociétés rurales. Mis à part le projet ESPACE, les travaux du R3S, l'action de recherche exemplaire mise en œuvre par l'IRAT, l'ORSTOM et l'ISRA au Sine Saloum (Perez et *al*...), les travaux engagés en Côte-d'Ivoire par Chopart *et al.*, les tentatives d'appui au programme riz au Brésil..., à partir desquels le CIRAD est en mesure de se constituer un référentiel crédible sur les relations entre l'alimentation hydrique des cultures et les pratiques culturales, les dispositifs d'expérimentation agronomique omettent de prendre en compte le suivi du bilan hydrique, sans lequel il est impossible :

– de caractériser l'efficience de l'eau (kg grain/mm-ETR/ha) ;

– de relativiser les résultats en resituant la campagne agricole dans son univers fréquentiel ;

– de comparer les performances de telle technique d'une zone à l'autre.

Et il est alors impossible de progresser dans la connaissance des mécanismes qui relient l'intensification au risque climatique...

Les flux évaporatifs non productifs

En agriculture non intensifiée, le taux de couverture du sol est faible (LAI de 1 à 2) en raison d'une stratégie raisonnée de l'agriculteur, qui préfère assurer la productivité de quelques plants convenablement alimentés en eau, en particulier au cours de la phase critique. Il a ainsi été démontré au Sénégal (Affoldher) que la consommation maximale du couvert (ETRM) croissait linéairement avec l'indice foliaire, et ce, au détriment du stockage de l'eau dans le sol, pourtant bien nécessaire pour garantir le déroulement de la phase reproductrice en cas (fréquent) d'arrêt des pluies.

Ce constat demeure valable pour le futur, tant que l'économie de ces régions n'autorisera pas l'accès aux facteurs d'intensification et que la solidarité internationale ne se mobilisera pas pour aménager l'espace agraire. Pour ces systèmes extensifs, il est donc impératif de s'atteler à la mise au point de techniques simples de lutte contre l'évaporation.

En ce qui concerne l'évaporation de la fraction nue du sol, les cinétiques varient avec la texture du sol (le sol sableux est automulchant). Les techniques demeurent classiques : le grattage, le dépôt de mulch (compost, paille). De nombreux travaux ont été effectués par l'IRAT dans la décennie 70, en conditions d'hivernage relativement favorables. Il serait utile de réactualiser les performances de ces techniques compte tenu de la dégradation des conditions climatiques (utilisation des coques d'arachide, imputrescibles, sur des parcelles adjacentes au jardin de case...).

En ce qui concerne la fraction aérodynamique et advective de l'ETRM, seule la fraction énergétique de l'ETRM est productive. L'autre, définie comme fraction advective, constitue une perte d'énergie improductive, qu'il convient de diminuer :

$$\text{ETRM culture} = kc\ ETP = F\ (\text{énergie}) + F\ (\text{advectif})$$

On rappellera à ce sujet les propositions de Dancette visant à étudier finement le rôle de l'arbre sur la modération de la demande climatique. On rappellera à ce propos des travaux, malheureusement non publiés, par l'IRAT... On invitera enfin l'assemblée, si cela n'a déjà été fait, à consulter l'excellent livre du CTFT et de la coopération française sur l'*Acacia albida*, dans lequel est fait allusion à la fonction de "tampon" biologique et climatique de l'arbre intégré aux cultures...

On sait en effet que la relation entre la production de matière sèche (Tanner *et al.*) et l'évapotranspiration ETR est pondérée par le facteur "déficit de vapeur d'eau", De, au sein de l'interface couvert végétal-atmosphère intégré au cours de la durée du jour :

$$\text{Rdt m.s.} = c \,.\, \text{ETRc/De}$$

Ce qui nous amène à considérer un critère d'appréciation de la potentialité d'un milieu à travers une formulation originale de l'efficience de l'eau du système sol-culture-atmosphère :

$$\text{efficience de l'eau} = \frac{\text{Rdt m.s.}}{\text{ETRc}} = c/\text{De}$$

avec "c" caractérisant la structure du couvert, le type variétal...

Ce critère peut être rapproché des résultats du projet ESPACE, qui a permis de caractériser une relation du type :

$$\frac{\text{Rdt grain}}{\text{ETRc}} = a \,.\, \text{ETR/ETM pc (phase critique)}$$

avec "a" caractérisant le niveau de fertilité, estimé avec une précision acceptable (base PRODCLIM, Baron *et al.*).

Le rapprochement des deux formulations semble être l'occasion de faire travailler ensemble les chercheurs plantes et chercheurs milieu. Suivant Robelin *et al.*, et en s'appuyant sur les acquis en agroclimatologie tropicale, en particulier en matière de relation rendement alimentation hydrique, il nous est désormais possible de travailler avec succès sur la fonction suivante, que nous définissons comme une fonction de sécurisation :

$$\text{ETR/ETM pc} = \frac{c}{a \times \text{De}}$$

où le terme "ETR/ETM pc", qui caractérise la productivité de la plante pour un couvert végétal fixé (c) et un niveau de fertilité donné (a), décroît avec le facteur humidité atmosphérique.

Il nous semble donc prometteur d'orienter nos travaux concernant la compréhension des effets des aménagements de l'espace (talus, arbre, association...) sur les liaisons entre la productivité de l'épi et les régimes énergétiques et hydriques au sein de la couche limite, à travers l'analyse *in situ* de la fonction tirée des deux équations précédentes.

L'analyse de la relation nous montre en effet que la minimisation du terme "De" est une condition nécessaire préalable à toute tentative d'accroissement du facteur "a" (intensification) au sein d'un système de culture (c) en équilibre avec son environnement. On justifiera, à ce niveau, les résultats exemplaires et spectaculaires obtenus à la sole C du CNRA de Bambey, où irrigation de complément et apport

de compost régulier (8 ans) ont été conjugués en conformité avec ce principe d'équilibre eau-fertilité. Des efficiences de l'ordre de 40 kg grains de mil/mm-irrigation ont été obtenus (Forest, Farinet, Sarr).

On notera, à ce propos, que les travaux en station de recherche sont encore limités à la manipulation des facteurs "a" et "c" caractérisant des pratiques culturales idéales, dans des environnements pédoclimatiques optimisés, où le terme "De" est minimisé : parcellaire bocage, environnement préservé, voire artificialisé (irrigation, jardins...).

Cette réflexion ne remet pas en cause les mécanismes bioclimatiques qui bonifient cet environnement des stations. Bien au contraire, elle conduit à promouvoir, au sein de la recherche agronomique, une programmation sur l'intégration de l'arbre dans le milieu rural où nous intervenons. Sans oublier que nous mettrions la main sur un mode d'investissement, source de revenu pour le bénéficiaire si l'espèce est bien choisie, et dont nous avons le plus grand besoin pour redynamiser notre attractivité auprès des décideurs et opérateurs du développement.

En termes de stratégie régionale, une analyse plus globale, reprenant le constat de Monteny, milite pour la généralisation de la politique d'intégration de l'arbre, dont l'activité évapotranspiration contribue aussi :

– au cours de la journée, à réalimenter l'atmosphère en humidité et, ainsi, à renforcer la puissance du flux de mousson ;

– au cours de la nuit — par effet de couverture et de suppression des flux d'énergie de rayonnement depuis le sol vers l'atmosphère, ce qui refroidit le sol — à maintenir, dès le lever du jour, une température du sol la plus élevée possible, ce qui est favorable au déclenchement précoce de la convection, moteur indispensable à la formation des nuages pluviogènes.

A ce titre, il convient d'attirer l'attention de nos directions scientifiques sur le caractère interdépendant des politiques de lutte contre la sécheresse et de lutte contre le déboisement. Notre réflexion amène à recommander que la reforestation soit menée avec envergure dans les parties sud de l'Afrique de l'Ouest si l'on veut à terme redynamiser la mousson hivernale, dont dépend l'agriculture sahélienne.

Par ailleurs, afin que les Sahéliens ne soient pas écartés d'une telle stratégie, il conviendrait d'exiger que tout périmètre irrigué fort consommateur en eau reboise environ l'équivalent de deux fois sa surface irriguée en recourant à des dispositifs d'aménagement innovants, associant l'activité à court terme (le vivrier) et un mode intelligent d'entretien du moteur générateur des pluies (le couvert forestier et sa contribution à la logique hydrique).

Accroître l'efficience de l'eau

La sanction finale de la recherche agronomique tropicale portera sur notre capacité à promouvoir une agriculture productive capable de répondre avec fiabilité aux aspirations des hommes qui la pratiquent ou qui en dépendent.

S'il est possible de réduire les pertes en eau en agissant avec des moyens appropriés à l'échelle (la petite région, le versant...) où s'exercent les mécanismes et leurs interactions, il est bien évidemment nécessaire de construire des systèmes de culture nouveaux associant par optimisation successive des avantages pour le court et le long terme. En cela, l'analyse agroclimatique et les outils qu'elle mobilise peut apporter une contribution efficace.

La sécheresse, à l'instar de la crise pétrolière (recherches sur le cx par les constructeurs d'automobiles), implique que les concepteurs de nouveaux produits — que nous sommes — prennent en compte l'efficience de l'eau pour proposer des variétés et des systèmes de culture moins consommateurs en eau s'ils veulent continuer à satisfaire des utilisateurs...

Or, les facteurs de sécheresse sont nombreux et ne se limitent pas à la pénurie pluviométrique, bien au contraire.

L'exemple des zones subhumides à vocation agricole nous semble à ce titre intéressant. Un zonage climatique sommaire les qualifie comme favorables et aptes à l'intensification marchande (zone maïs-coton en Afrique, système riz-maïs-soja dans les cerrados au Brésil). De récents travaux de l'IRAT dans ces deux régions nous ont montré que l'intensification pouvait générer des facteurs de sécheresse plus complexes à isoler et contrôler. On citera le rôle du travail au disque (Seguy *et al.*), sur la semelle de labour et ses conséquences sur le bilan hydrique (Reyniers, Steinmetz, Forest,) et l'espérance de rendement (perte de plus de 25 q/ha en riz...).

On rappellera l'effet de la perte de la matière organique sur l'activité d'extraction hydrique et minérale du système racinaire (Cissé, Vachaud, Affoldher...), responsable d'une réduction de la productivité de l'épi (baisse mesurée du terme "ETR/ETM pc").

On citera les liaisons entre les problèmes de toxicité et le régime hydrique des sols, en particulier pour l'alumine (Reyniers et *al.*...), la sodisation des sols (Legoupil, Bertrand, Marlet...).

Enfin, dans le souci de faire coïncider nos écrits avec notre action, nous citerons le lancement de travaux méthodologiques au CATIE (Costa Rica, Maraux, Hautecœur *et al.*) visant, en collaboration étroite avec l'INRA, à développer une modélisation bioclimatique du fonctionnement de systèmes arbre-culture, dont nous aurons la plus grande utilisation dans les années à venir.

CONCLUSION

Ne pas renforcer notre capacité de recherche dans cette voie consistant à mieux appréhender les flux de matière et d'énergie nous semble caractériser un aveuglement particulièrement risqué pour le futur de notre entreprise et faire preuve d'un manque de conscience planétaire, lorsque l'on sait que c'est par l'absence de maîtrise de ces flux que les plus grandes civilisations ont disparu, comme en Mésopotamie, dans l'Euphrate, en Egypte, en Algérie (colonisation romaine et monoculture du blé...).

J'ose espérer, en conclusion, que cet exposé contribuera à renouveler notre démarche, à faire bouger les choses en vue d'une meilleure adaptation de notre outil de recherche aux grandes préoccupations de la communauté humaine.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

VI

QUELQUES IDÉES EN VRAC SUR LES RELATIONS ENTRE SYSTÈMES DE CULTURE ET SYSTÈMES DE PRODUCTION

J. PICHOT

❑ 1

Le système de culture est un sous-ensemble du système de production, lequel est aussi un sous-ensemble des activités des exploitants agricoles.

L'exemple fameux du projet PIDZAR au Venezuela nous a montré progressivement, après de nombreuses missions d'experts, que les cultures irriguées intéressaient peu les paysans, qui étaient surtout des éleveurs de chèvres, et que, tout compte fait, l'argent des ménages provenait principalement de la confection de hamacs !

Ailleurs, ce pourra être la pêche ou le charbon de bois.

❑ 2

La notion de système de culture n'a pas sans doute la même signification pour des paysans vivant en quasi-autarcie dans des zones enclavées et pour des paysans — par exemple maraîchers — en prise directe avec le marché.

Dans le premier cas, il y aura une liaison obligée entre besoins nutritionnels et sociaux et calendriers de production, pratiques de stockage, pratiques de cueillette des paysans.

Dans le second cas, la monétarisation des échanges permettra une disjonction partielle ou totale entre systèmes de consommation et systèmes de production ou de culture. Dans ce cas, il peut d'ailleurs y avoir dérive complète vers un raisonnement purement économique privilégiant les revenus à très courts termes.

Dans le schéma qui cherche à visualiser les évolutions possibles liées à une monétarisation croissante de la production, on peut s'arrêter sur une troisième situation, fréquente en Afrique mais aussi en France au début du siècle. Dans ce cas, une partie des productions est autoconsommée, une partie est mise sur le marché.

Ce genre de situations est intéressant à analyser car les pratiques de recherche et de développement les concernant ont été parfois étonnantes.

• Exemple n° 1

En République centrafricaine, de 1965 à 1989, le cadre fixé (et accepté !) des recherches agronomiques de l'IRCT et de l'IRAT a consisté en un système de culture excluant pratiquement le manioc mais comprenant arachide, riz pluvial, maïs, coton.

Dans un pays où la ration de base des paysans (et des ruraux en général) est constituée à 90 % par le manioc, c'est assez inadapté,

même si l'arachide et le riz sont de bonnes têtes de rotation et si le maïs valorise bien les reliquats de la fumure coton !

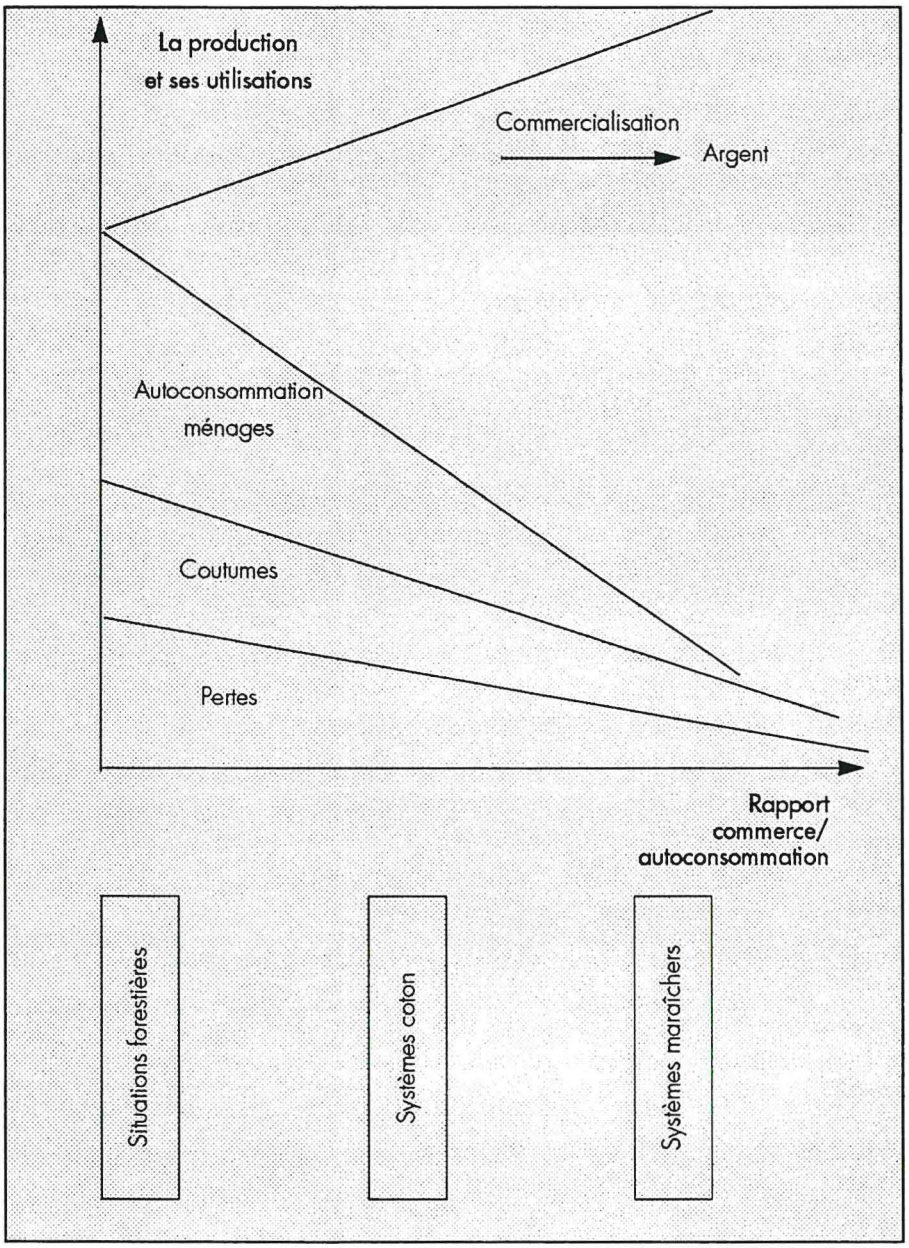


Schéma de l'évolution possible de l'autoconsommation et du commerce.

• Exemple n° 2

Au Cameroun avec la SODECOTON, dans les années 70-80, mais aussi en Côte-d'Ivoire avec l'AVB, la disjonction entre les blocs mécanisés consacrés au coton et à ses cultures "associées" et ceux

affectés aux activités vivrières, dites traditionnelles, destinées à l'autoconsommation a également contribué à développer les recherches sur le paquet coton + vivriers mécanisés + jachère à légumineuses en laissant de côté le "traditionnel", supposé non améliorable.

A l'usage, on a fini par s'apercevoir que ces activités sur le vivrier traditionnel tenaient une place importante dans les calendriers de travaux manuels des ménages paysans et que le système de culture intensifié succombait à la loi de l'enherbement maximal...

Ces deux exemples, volontairement choisis en dehors de l'actualité la plus récente, ne doivent pas laisser croire que le problème n'existe plus.

❑ 3

La notion de systèmes de culture ne peut être isolée de celle d'assolement... et celle d'assolement est liée aux débouchés des produits.

Dans le cas des collines qui entourent le lac Alaotra, point n'est besoin de montrer une fois de plus que l'arachide est un bon précédent pour le riz pluvial, puisque, dans les conditions de cette région, l'arachide ne trouve pratiquement pas de débouchés et que les paysans n'y consacrent que de très faibles surfaces.

❑ 4

La relation entre systèmes de culture et mécanisation doit être explorée avec précaution, en ne négligeant pas les complémentarités entre opérations manuelles, attelées et motorisées.

Dans la conception des dispositifs expérimentaux, on a vu parfois comparer des itinéraires intitulés culture manuelle, culture attelée... Ceci ne faisait que refléter notre méconnaissance affligeante des pratiques paysannes.

❑ 5

La place de l'élevage comme contrainte ou comme complémentarité (voire comme moyen de financement de certaines opérations telles que le repiquage du riz) doit toujours être analysée par rapport au système de culture pris dans son ensemble — et pas

seulement vis-à-vis des cultures de contre-saison par exemple —, en prêtant attention au partage des tâches et des revenus entre hommes et femmes.

❑ 6

Il en est de même pour la place de l'arbre. Chez les Bamilékés, les hommes s'occupent (ou s'occupaient) des caféiers, et les femmes des vivriers intercalaires... Complémentarités ou concurrences ? La conclusion peut changer si le café ne se vend plus aussi bien et ne bénéficie plus d'un système de distribution d'intrants.

❑ 7

Le système de culture doit aussi être envisagé dans sa relation avec les moyens de production réels des exploitants.

Moyens en terres

L'assolement conçu par un paysan dépend de ses disponibilités en terres de différentes natures : parcours, plateau, glacis, bas-fond sableux, bas-fond argileux.

Ses pratiques culturales sur chacune des parcelles dépendent de leurs qualités intrinsèques mais aussi des droits d'usage et des contraintes sociales (vaine pâture, par exemple), ce qui peut mener à des solutions suboptimales.

Moyens en matériel et en main-d'œuvre

Il faut être très vigilant sur l'appréciation des moyens réellement disponibles et éviter tout raisonnement simpliste et normatif ; tout système technique doit comporter des variantes, des itinéraires de délestage, etc. (Les divergences de vues entre les experts CIRAD lors de la mission riz - Mauritanie mériteraient d'être analysées sous cet angle, me semble-t-il.)

Moyens financiers

Les modalités d'accès au crédit s'avèrent de plus en plus déterminants pour la mise en œuvre d'itinéraires techniques faisant appel aux intrants et à la mécanisation.

Toutes ces remarques sur les moyens de production doivent, me semble-t-il, amener les chercheurs à travailler systématiquement sur des systèmes techniques alternatifs permettant aux paysans de se tirer d'affaire en conditions variables, le plus souvent suboptimales.

Concernant les engrais, par exemple, cette réflexion conduit ou devrait conduire à chercher des réponses à des questions de type : j'ai 10 000 FCFA à dépenser en engrais, quelles sont les utilisations les plus rentables ou les moins risquées..., en utilisant peut-être davantage qu'actuellement des techniques de modélisation.

EN GUISE DE CONCLUSION

Les systèmes de culture ne peuvent être analysés, élaborés, améliorés en ne prenant en compte que les paramètres du milieu physique et les caractéristiques des cultures qui entrent en combinaison. Les impasses faites antérieurement sur le contexte englobant et sur les objectifs des paysans semblent avoir conduit à des erreurs et/ou à des études académiques sans portée en termes de développement durable.

Si, demain, l'institut des plantes annuelles élabore ses programmes en termes de systèmes de culture, le DSA-CEEMAT est prêt à apporter sa contribution au processus de création-diffusion en participant, en complémentarité avec le laboratoire d'économie filières de Raymond et Leplaideur, à la définition du cadre d'étude, à l'analyse de l'environnement socio-économique des exploitations ainsi qu'au suivi-évaluation des innovations et à leur diffusion dans le milieu paysan.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

VII

ÉTUDE DE ROTATIONS DE SORGHO ET LÉGUMINEUSE EN CULTURE PURE OU ASSOCIÉE ET DE COTONNIER

P. SALEZ

CADRE DE L'ÉTUDE

Cette étude, conduite en station, constitue le premier volet du programme "agronomie" réalisé dans le cadre du projet régional Sorgho IRAT-ICRISAT basé à Bamako.

Ce premier volet, prioritaire pour nos partenaires des pays d'Afrique de l'Ouest, a démarré en 1989.

Le deuxième volet du programme, que nous ne présenterons pas ici, est une expérimentation sur la culture associée sorgho-arachide menée en paysannat du sud (avec la CMDT) et du centre du Mali (OHV) depuis 1990 seulement. Cette expérimentation compare un certain nombre de paquets techniques avec l'itinéraire technique traditionnellement pratiqué.

Enfin, le troisième volet du programme concerne l'interaction techniques x concurrence interspécifique dans les associations sorgho-légumineuse.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Les premiers résultats de cette étude de rotations culturales ont été présentés lors d'un atelier de travail à Niamey (Salez et Traore, 1991). Ces résultats seront abordés après avoir résumé les objectifs et la méthode de cette étude.

Objectifs

L'évolution des productions et de la fertilité du sol dans des rotations culturales, incluant le sorgho, une légumineuse (souvent l'arachide) et le cotonnier, a été étudiée dans le passé en Afrique de l'Ouest (Pichot *et al.*, 1981 ; Loynet, 1987 ; Gigou, 1977, cité par Pieri, 1989). L'effet d'apports fertilisants organiques et minéraux sur la production de cultures continues de sorgho et d'arachide a également fait l'objet de publications (Kwakye, 1988).

Les systèmes de cultures associées sorgho-légumineuse, couramment pratiqués en Afrique de l'Ouest et centrale, ont été comparés aux cultures pures sous l'angle agronomique (Shetty *et al.*, 1987) ; les comparaisons, cependant, ont été ponctuelles et n'ont toujours concerné qu'une seule saison culturale sur une même parcelle.

Les mobilisations minérales des cultures associées diffèrent en général nettement de celles des cultures pures correspondantes, du fait d'interactions entre plantes différentes (Salez, 1988). Il paraît donc important, pour comparer ces divers systèmes sur un plan

agronomique, d'entreprendre des expérimentations de longue durée, faisant intervenir des rotations de cultures pures et de cultures associées.

Les légumineuses concernées sont essentiellement l'arachide et le niébé (cultivé pour ses fanes), souvent associés au sorgho en culture manuelle dans notre région d'intervention. Le soja, considéré par la CMDT comme une culture de diversification, a également été inclus dans l'un des dispositifs. Enfin en 1990, des légumineuses de couverture (*Canavalia ensiformis, Mucuna,* dolique) ont été introduites dans l'expérimentation.

Parallèlement au facteur "successions culturales", un facteur "fertilisation" (minérale et organique) est testé, étant donné son importance dans les rotations incluant le cotonnier.

Méthode

Trois essais ont été mis en place à Samanko (près de Bamako) et l'un d'entre eux également à Longorola, près de Sikasso.

Nous essayons de recueillir dans ces essais, trois types de données :

– évolution des rendements des diverses espèces ;

– composantes du rendement, répartition de la biomasse et exportations minérales ;

– fertilité chimique, et parfois physique, du sol.

Cela suppose des dispositifs complexes permettant d'effectuer des prélèvements destructifs en cours de culture et de diviser certains traitements pour diversifier les successions culturales.

(Les essais A, B et C sont présentés sous forme de fiches en fin d'exposé.)

RÉSULTATS

Les deux stations, Samanko (près de Bamako) et Longorola (près de Sikasso), diffèrent par la pluviométrie reçue et la teneur en argile du sol. Différents niveaux de fertilisation ont été comparés : absence d'engrais, engrais minéral, engrais minéral additionné de compost.

Aucun effet allélopathique du sorgho sur lui-même n'est constaté ; le cotonnier présente le même arrière-effet que la céréale sur la production du sorgho qui lui succède.

Une légumineuse cultivée en pur — arachide ou niébé selon le site considéré — constitue le meilleur précédent du sorgho, avec des

gains moyens de rendement de 20 à 30 % par rapport à la succession sorgho-sorgho.

Les associations sorgho-légumineuse n'ont pas d'arrière-effet sur le sorgho qui leur succède. Elles présentent par contre un arrière-effet important sur le cotonnier, en l'absence d'engrais ou avec un apport minéral ; la fumure organominérale, quant à elle, confond les arrière-effets des différents systèmes culturaux.

Les associations répétées sur une même parcelle en seconde année conservent leur avantage de rendement par rapport aux cultures pures se succédant à elles-mêmes (LER entre 1 et 1,40). En revanche, ces successions de cultures associées ne se montrent pas plus avantageuses que des rotations de cultures pures faisant intervenir une légumineuse en année 1 et du sorgho en année 2.

DISCUSSION SUR L'EXPOSÉ

Collaboration avec la DRN dans cette opération d'un agronome "plante" de la DCV

Notre appartenance passée à la DRN nous a permis de conserver des liens avec certains de ses chercheurs (P. Siband, R. Oliver). Depuis 1990, G. Loynet (agronome "milieu" de la DRN, également basé à Bamako) a été associé à cette étude (essai C).

Liaison avec la CMDT et le milieu réel

Plutôt que de résoudre un problème formulé par la CMDT, nous essayons ici de mieux comprendre les systèmes techniques traditionnels et des systèmes techniques améliorés (successions culturales plus adaptées) en intégrant la composante "gestion de la fertilité du sol". Cela répond à une demande des SNRA avec lesquels nous collaborons.

Le deuxième volet de notre programme est conduit en paysannat, en collaboration avec la CMDT. Mais il est plus récent et non prioritaire en raison de notre statut régional.

Questions sur l'expérimentation

Durée de l'expérimentation

Des successions binaires ou ternaires sont comparées ; une première évaluation après trois années permettra de fixer la durée des essais.

Ce sont les variations de fertilité des sols, attendues mais difficiles à mettre en évidence, qui peuvent retarder l'échéance.

Calcul économique

Des calculs économiques sont effectués sur l'essai réalisé en paysannat (budgets partiels) ; sur ces essais réalisés en station, seuls l'enregistrement des temps de travaux et le chiffrage des différents intrants sont effectués.

Enfouissement des résidus de récolte

L'enfouissement n'est pas effectué, alors qu'il permettrait de conserver le potassium du sol ; il faut rappeler que cet enfouissement est impossible à réaliser en culture manuelle.

De plus, le sorgho n'est que très rarement enfoui dans notre zone d'activité du fait de ses autres utilisations — toitures, combustion, affouragement.

Fiche 1. ***Essai A***

Evolution de la production et de la fertilité du sol dans des rotations de cultures pures et associées de sorgho et de légumineuse

Mise en place : 1989

Sites : Samanko et Sikasso

14 traitements

7 cultures x 2 niveaux de fertilisation (80 N)

- Sorgho
- Arachide
- Niébé
- Soja
- Sorgho x arachide
- Sorgho x niébé
- Sorgho x soja

Systèmes comparés sur 4 années

(S = sorgho ; L = légumineuse)

S - S - S - S
L - L - L - L
S x L - S x L - S x L - S x L
L - S - L - S
S x L - S - S x L - S

] Avec et sans engrais

Parcelle élémentaire : 24 m²

8 blocs

Divisés en deuxième année

- 4 blocs : même système qu'en première année
- 4 blocs : culture pure de sorgho

Prélèvements à la récolte pour analyse

- Composantes du rendement
- Poids sec, différents organes
- Exportations minérales

Fertilité du sol

Analyse chimique dans chaque parcelle, en début d'expérimentation et à partir de la troisième année

*Fiche 2. **Essai B***

Evolution de la production et de la fertilité du sol dans des rotations incluant sorgho, légumineuse et cotonnier

Mise en place : 1989

Site : Samanko

18 traitements

6 successions culturales x 3 niveaux de fertilisation

- Fertilisation

– F0 = sans fertilisation ;
– F1 = fertilisation minérale recommandée ;
– F2 = F1 + compost (5 t/ha).

Successions culturales

1989	1990	1991
Sorgho	Cotonnier	Arachide
Arachide	Sorgho	Cotonnier
Cotonnier	Sorgho	Arachide
Sorgho x Arachide	Cotonnier	Sorgho x Arachide
Sorgho x Niébé	Cotonnier	Sorgho x Niébé
Sorgho	Sorgho	Sorgho

Blocs

- Parcelles élémentaires de 90 m^2
- Carrés de rendement de 14,4 m^2 par parcelle élémentaire

Prélèvements

Prélèvement destructif dans parcelle élémentaire en cours de végétation + prélèvement de récolte pour analyse

- Composantes du rendement
- Poids sec différents organes
- Exportations minérales

Fertilité du sol

Voir Essai A (fiche 1)

Fiche 3. ***Essai C***

Suivi des dynamiques minérales et maintien de la fertilité du sol dans des rotations sorgho-légumineuse-cotonnier

Mise en place : 1990, après un an de "neutralisation" par culture de maïs

Site : Samanko

18 traitements

9 successions x 2 niveaux de fertilisation

- Fertilisation

– F0 = sans fertilisation ;

– F1 = fertilisation minérale recommandée.

Les successions incluent sorgho, arachide et niébé purs ou associés ainsi qu'association sorgho-légumineuse de couverture (*Mucuna*, dolique, *Canavalia*)

8 blocs

Dont 2 utilisés pour prélévements destructifs en cours de végétation

Parcelle utile : 28,8 m^2

Prélèvements

Destructifs "tournants" (parcelle utile divisée en quatre)

Etudes

Nodulation des légumineuses, surfaces foliaires et composantes du rendement avant analyse minérale des échantillons

Analyses chimiques du sol

Tous les ans

Mesure de paramètres physiques du sol

Pénétrométrie, densité apparente, stabilité structurale, prévues en fin de deuxième année

Suivi des flux minéraux

Par bougies poreuses, en troisième année, pour examen de concurrence interspécifique

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

VII

RECHERCHES SUR LES SYSTÈMES DE CULTURE DANS LES HAUTS DE L'OUEST DE LA RÉUNION

R. MICHELLON

Les Hauts de l'Ouest, situés au-dessus de 600 mètres d'altitude dans la région sous le vent, s'étendent sur 20 000 hectares (dont 9 000 sont à vocation agricole) et regroupent environ 20 000 habitants pour lesquels l'agriculture est la principale activité économique.

La culture du géranium rosat a permis de mettre en valeur ces terrains accidentés, inexploités au début de ce siècle. Cependant, la production de son huile essentielle connaît des cycles rapides d'expansion-récession qui ont entraîné, dès 1963, la création d'une station IRATd'expérimentation.

Les recherches, d'abord thématiques, concernaient des cultures fourragères, vivrières ou industrielles mises en place dans des sytèmes de culture souvent différents de ceux rencontrés dans le milieu. Mais les opérations de diversification des cultures ou d'intensification du géranium rosat, conduites par les services de vulgarisation à partir des propositions globales de la recherche, ont montré que certaines recommandations techniques n'étaient pas adaptées (fortes distorsions entre les rendements obtenus en station et chez les agriculteurs...) ou inapplicables. Confrontée à une baisse régulière des rendements du géranium et de sa production globale, la recherche a décidé de travailler davantage en relation directe avec le milieu, afin de mieux répondre aux besoins des agriculteurs et de valoriser les acquis antérieurs.

Une approche globale et pluridisciplinaire a été mise en œuvre. Elle a mobilisé plusieurs départements du CIRAD présents à la Réunion, dont le CEEMAT, le CTFT, l'IRAT et l'IRFA, appuyés par des chercheurs extérieurs, de l'IRAT-Brésil en particulier, ainsi que certains chercheurs de l'université ou du service de protection des végétaux à la Réunion. Outre les agriculteurs, les services de développement et de formation se sont associés à la démarche. L'Association pour la promotion en milieu rural (intervenant surtout dans la formation) a été un partenaire essentiel.

Après une synthèse des études antérieures, une première phase de diagnostic a été réalisée en 1983.

LE DIAGNOSTIC

Le diagnostic préalable à toute intervention en matière de recherche- développement est rapide. Il doit permettre de repérer les problèmes majeurs communs au groupe d'agriculteurs considérés et de définir les conditions d'intervention de la recherche.

Le diagnostic porte à la fois sur les exploitations agricoles et sur les itinéraires techniques mis en oeuvre par les agriculteurs.

Il est provisoire, et un diagnostic permanent le complète : les priorités de la recherche évoluent au fur et à mesure des résultats obtenus et de l'avancée des connaissances sur le milieu physique et humain.

Les exploitations

Les exploitations s'étendent sur de petites superficies (90 % ont moins de 3 ha) et sont généralement spécialisées dans la production du géranium. Le colonage, forme de métayage par laquelle le colon verse une rente en nature et le propriétaire fixe la culture et participe aux frais, était encore dominant il y a peu d'années. Mais la réforme foncière en cours permet l'établissement d'exploitations de taille moyenne (4 à 10 ha). Simultanément, les surfaces en géranium régressent, remplacées par les cultures vivrières et maraîchères, les prairies et la canne à sucre.

Les itinéraires techniques

Traditionnellement, le géranium rosat est cultivé de manière itinérante après jachère arborée ou en rotation avec la canne à sucre à la limite inférieure de la zone. Les itinéraires techniques se caractérisent par des transports réduits entre le champ et l'extérieur (engrais) et la présence de cultures associées destinées à l'autoconsommation. Mais les surfaces cultivées se sédentarisent progressivement, sans changement d'itinéraire technique jusqu'à une époque récente. En 1985, trois quarts des planteurs produisaient en permanence sur la même parcelle.

Avec l'abandon de la jachère, la restauration de la fertilité n'est plus assurée. Après quelques années, la monoculture entraîne une baisse de rendement liée à l'appauvrissement des sols (en l'absence de lutte antiérosive efficace), à la prolifération des adventices et au dépérissement du géranium. Les temps de travaux, et en particulier de sarclage, sont tels que la main-d'œuvre n'est plus suffisamment rémunérée.

Les objectifs de la recherche

Les objectifs de la recherche découlent de ce diagnostic :

– protection, voire restauration des potentialités du agricoles du milieu ;

– augmentation de la production d'essence de géranium, assurée d'un marché à l'exportation, grâce à un accroissement de la productivité des facteurs terre et travail ;

– diversification et intensification des productions destinées au marché local : cultures vivrières, maraîchères et élevage.

La recherche s'inscrit dans le plan d'aménagement des Hauts, dont l'objectif majeur est de freiner l'exode rural, et dégage son financement du contrat de plan Etat-Région, ainsi que des aides du ministère de la Recherche et de la Technologie.

LA CONCEPTION ET LA MISE AU POINT DES INNOVATIONS

Démarche

Les expérimentations sont conçues dans un souci d'opérationnalité. Les agriculteurs, ainsi que les formateurs et conseillers agricoles, sont associés très tôt aux travaux afin de faciliter la diffusion ultérieure des résultats et les échanges réciproques de savoir-faire.

La mise au point de systèmes de production susceptibles de se pérenniser comporte une évaluation des différentes solutions envisageables, compatibles avec les contraintes des agriculteurs.

Différents systèmes de culture sont comparés en grandeur réelle sur plusieurs années : géranium en monoculture, conduit avec des intercalaires ou des rotations selon différents itinéraires techniques. Les observations portent sur les facteurs d'élaboration du rendement (profils culturaux, densités, adventices, maladies...), les coûts et les temps de travaux...

Les problèmes engendrés par chaque système sont étudiés dans des expérimentations thématiques (variétés, fumures, herbicides...) afin de proposer des solutions et d'expliquer les phénomènes constatés.

Pour qu'une telle démarche soit réellement opérationnelle, le formateur-vulgarisateur et l'agriculteur doivent être associés pleinement au processus d'expérimentation.

Une concertation est nécessaire pour fixer un calendrier de suivi et les éléments à observer en commun. Elle doit se poursuivre jusqu'à la discussion des résultats. Il est impératif de conserver, dans chacun des dispositifs, l'itinéraire technique suivi antérieurement par l'agriculteur, afin d'évaluer l'intérêt réel des facteurs étudiés et, éventuellement, de le dédommager en cas de perte importante.

La répartition de la prise en charge du risque ne constitue pas le seul élément à considérer dans l'établissement du budget de l'opération. Il faudrait aussi y inclure les intrants non encore accessibles à l'agriculteur (qui peuvent parfois être présentés comme une avance sur récolte), ainsi que la main-d'œuvre supplémentaire nécessaire, lors de l'implantation et pour la quantification des résultats (mesures de parcelles, pesées...).

Résultats

La démarche permet de hiérarchiser les problèmes à résoudre, et de relativiser les solutions en fonction des contraintes des différents types d'exploitation, des itinéraires pratiqués, des conditions du milieu.

Restauration ou maintien de la fertilité et amélioration des rendements

• La matière organique

La fertilité des sols de type andique peut être restaurée progressivement, en particulier grâce à des apports de matière organique. Ceux-ci ont une action prépondérante sur le rendement des cultures vivrières et sur celui du géranium associé ou qui leur succède. Mais leur arrière-effet reste limité s'ils ne sont pas renouvelés. De plus, cette restauration est indissociable en sol nu d'une lutte contre l'érosion visant à maintenir les acquis par des aménagements appropriés (cordons antiérosifs...).

• Les rotations

Les rotations culturales permettent d'augmenter très sensiblement la production du géranium. Ainsi, après rotation, les rendements apparaissent très supérieurs à ceux d'une monoculture, même avec une fumure seulement minérale. En outre, lorsque les précédents culturaux reçoivent des apports de compost, le rendement du géranium qui leur succède apparaît incomparablement accru.

• La lutte contre les maladies

Pendant la saison cyclonique, les dégâts d'anthracnose peuvent conduire à des pertes voisines de la moitié de la production annuelle espérée et à une mortalité supérieure au tiers des plantes. Les traitements préventifs au captane, associés à une taille des plantes suffisante pour limiter les dégâts dus au vent, permettent de lutter efficacement.

Lorsque l'anthracnose est maîtrisée, les dépérissements dus au flétrissement bactérien et aux pourridiés apparaissent comme les

principaux agents de mortalité. Très élevée en monoculture, même intensive, la mortalité peut être nettement diminuée grâce aux cultures intercalaires avec restitution de matière organique. Elle apparaît encore plus faible pour les plantations mises en place après rotation.

• Le travail du sol

Les agriculteurs qui avaient recours à des entreprises extérieures en période de pointe de travail, utilisaient souvent le matériel de la zone cannière. Ils ont alors introduit le labour dans leur itinéraire.

Le labour favorise la levée et l'enracinement des plantes, mais, outre les dangers de l'érosion, il provoque souvent une baisse de rendement de la plupart des cultures à cycle court (pomme de terre, haricot, maïs, riz...) car il entraîne un assèchement du sol, et réduit la productivité du géranium.

• Couverture du sol et travail minimal

Habituellement éliminés par sarclage, les résidus de la culture précédente détruite au glyphosate (cannes à sucre, adventices...) permettent de constituer une couverture morte du sol. Elle assure une protection antiérosive très efficace, augmente l'infiltration de l'eau de pluie, stimule l'activité microbienne du sol et devrait permettre d'accroître les restitutions organiques. Les couvertures mortes conduisent à des rendements généralement équivalents ou supérieurs en raison d'une humidité du sol plus favorable en surface. De plus, en zone infestée par le ver blanc, *Hoplochelus marginalis*, les dégâts occasionnés par cet insecte apparaissent réduits.

• L'intensification des cultures vivrières et maraîchères

L'introduction des cultures vivrières ou maraîchères en intercalaire ou en rotation avec le géranium doit permettre l'intensification des systèmes. Mais il importe aussi d'accroître la productivité, qui est liée à la fumure — en particulier organique, à la date de la plantation —, à la protection phytosanitaire, et qui peut être très sensiblement améliorée par la sélection variétale.

Amélioration de la productivité de la main-d'œuvre

En culture pure traditionnelle, les temps de travaux consacrés au géranium varient de 100 à 250 jours par hectare, en fonction de l'âge de la parcelle et de son intensification.

• La lutte contre les adventices

Les sarclages représentent une part de temps considérable et augmentent d'année en année, au fur et à mesure de l'en-

vahissement par les adventices. L'enherbement, limité après la défriche de l'*Acacia decurrens,* devient ensuite difficile à maîtriser manuellement, en particulier pendant la saison cyclonique pour les plantes à multiplication végétative (*Phalaris arundinacea, Oxalis* sp., *Cyperus rotondus*...).

Une nette amélioration de la productivité est cependant possible par l'emploi des herbicides de pré et de post-levée conseillés. En culture pure intensive, ils permettent de réduire les temps de sarclage par quatre, ou même plus.

En présence d'une couverture, la prolifération des adventices apparaît encore réduite en raison probablement de la libération de substances inhibitrices lors de sa décomposition ou d'une modification du microclimat au niveau du sol (semences photosensibles masquées par la litière). Les temps de travaux consacrés à la lutte contre les adventices sont alors considérablement diminués.

Cette couverture qui se décompose progressivement doit être renouvelée pour ne pas perdre ses effets bénéfiques, soit en introduisant une plante adaptée dans les rotations annuelles multiples, soit en conservant une plante pérenne compatible avec les cultures mises en place. Ainsi, dans l'optique d'une orientation de certaines exploitations vers la polyculture-élevage, des études d'association avec les cultures fourragères sont entreprises, en particulier avec le kikuyu, *Pennisetum clandestinum*. Sa rusticité et son agressivité ont conduit à sa généralisation en altitude. Il peut être maîtrisé par des applications régulières, à très faible dose, de Fluazifop-p-butyl, graminicide sélectif du géranium. Le développement du géranium installé après pâturage paraît alors amélioré dans cette couverture vivante par rapport à un sol nu.

● Implantation et récolte

Lorsque l'enherbement est maîtrisé, l'implantation et la récolte deviennent ensuite les postes essentiels des besoins en main-d'œuvre. Une mécanisation adaptée, qui peut être manuelle dans un premier temps, permet de les réduire encore très sensiblement (introduction des cannes planteuses du Brésil, récolteuse à géranium...).

Systèmes de culture proposés

Pour stabiliser les systèmes et améliorer les revenus agricoles, des solutions sont proposables aux agriculteurs selon leurs contraintes et leurs moyens de production :

— lorsque la surface est limitée et la main-d'œuvre abondante, les intercalaires permettent d'augmenter la productivité de la terre et du

travail, de la régulariser malgré les aléas climatiques tout en conservant la souplesse de la production du géranium ;

— lorsque les contraintes de l'exploitation permettent d'introduire des rotations de cultures vivrières, industrielles ou maraîchères avec le géranium, les résultats économiques sont nettement améliorés (figures 1 et 2).

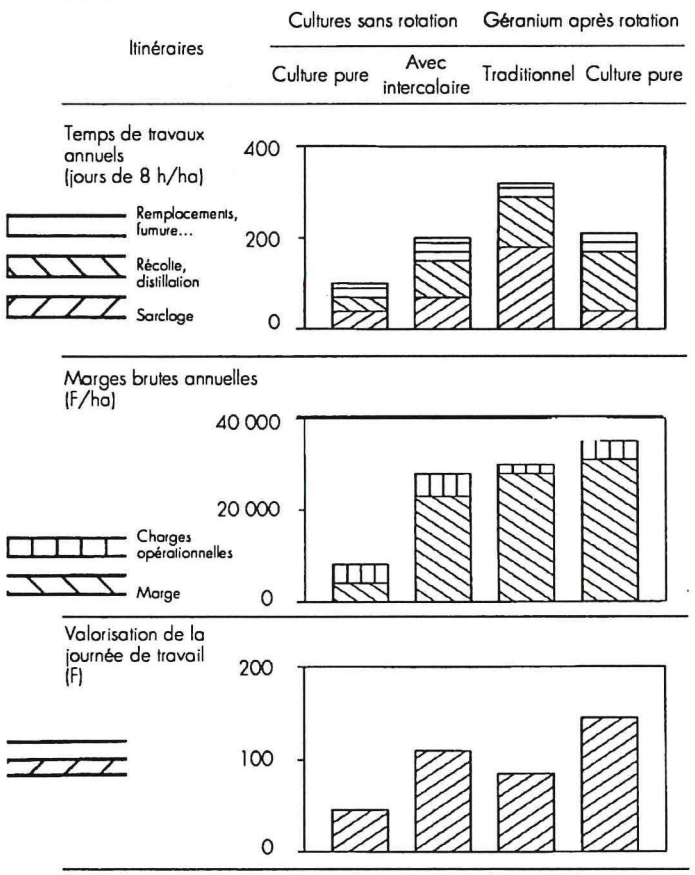


Figure 1. Influence des rotations et des itinéraires sur les temps de travaux, les marges et la valorisation des journées de travail pour le géranium en production (Trois-Bassins, 1988).

Dans l'itinéraire traditionnel amélioré grâce aux rotations, les traitements phytosanitaires ne sont pas réalisés et la fumure minérale est réduite.

LA DIFFUSION DES INNOVATIONS

Démonstrations et tests multilocaux, suivis de systèmes d'exploitation

Afin d'adapter les innovations à l'ensemble de la zone et aux différents types d'exploitations, des tests très simplifiés sont conduits avec la collaboration des organismes de formation et de

développement chez des agriculteurs intéressés (le plus souvent chez des agriculteurs en formation). Comme les essais thématiques et les comparaisons de systèmes de culture, ces tests permettent de démultiplier les résultats de la recherche.

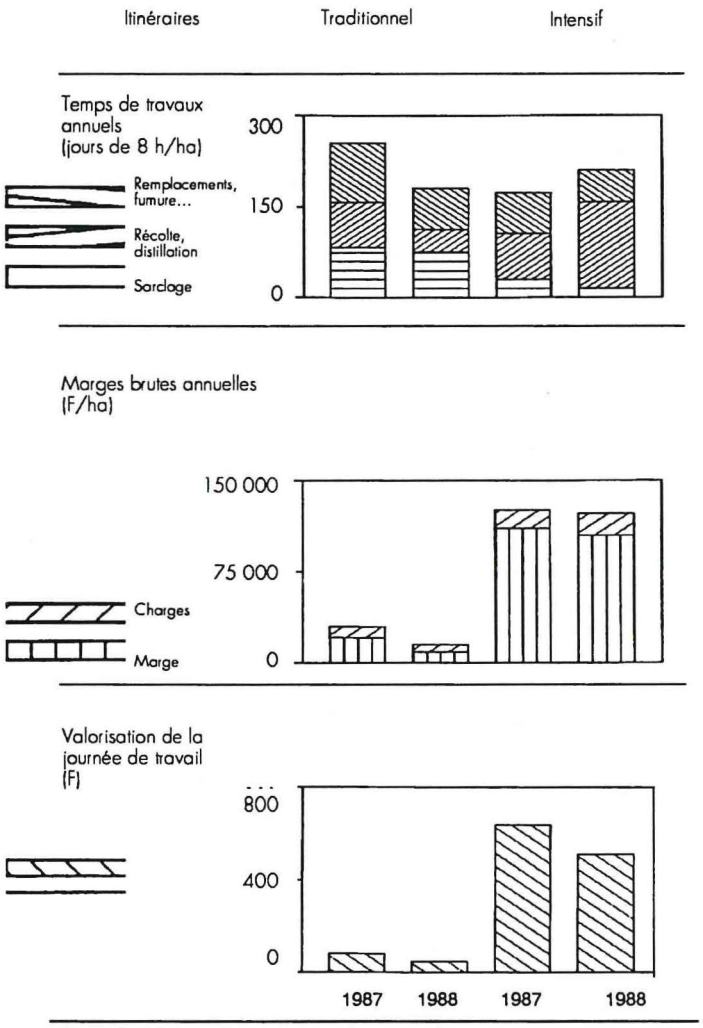


Figure 2. Influence de l'itinéraire technique sur les temps de travaux, les marges et la valorisation des journées de travail pour la succession annuelle haricot-pomme de terre (après pomme de terre-maïs).

Dans l'itinéraire traditionnel les traitements phytosanitaires ne sont pas réalisés et la fumure minérale est réduite.

Afin de compléter le référentiel technico-économique pour la zone, des outils de suivi et d'évaluation technico-économique des systèmes d'exploitation ont été élaborés avec les organismes de formation et de développement.

L'intérêt d'une réelle collaboration est indéniable pour chacun des partenaires :

– appropriation directe de l'innovation par l'agriculteur en fonction d'un choix raisonné ;

– utilisation de l'essai ou du test comme support pédagogique ou point de démonstration par le formateur-vulgarisateur ;

– élaboration d'un référentiel technique et de propositions cohérentes avec le milieu pour le chercheur.

Mais l'efficacité d'une telle démarche dépasse l'objectif escompté (cf. tableau). Pour la recherche, elle ne se limite pas à une démultiplication des essais ou tests réalisables avec un budget déterminé dans des conditions plus représentatives qu'en milieu contrôlé. Ces études permettent aussi d'intégrer le savoir-faire des agriculteurs et leurs connaissances empiriques, d'améliorer la qualité des informations recueillies dans les essais, de hiérarchiser

Intérêt pour chacun des partenaires d'une réelle collaboration dans la mise en œuvre commune d'essais ou de tests (d'après Michellon et Payet).

Partenaire de la collaboration	Agriculteur	Formateur-vulgarisateur	Chercheur
Intérêt individuel	Acquisition des connaissances et du savoir-faire :		
	Suivi technique avec conseils sur la culture étudiée (traitements au stade optimal...) et son système d'exploitation	Actualisation des connaissances techniques et de la formation pour les résultats de la recherche et les systèmes de culture et d'exploitation rencontrés	Appréhension du suivi et de la mise en œuvre des techniques traditionnelles Meilleure connaisssance des itinéraires techniques et systèmes de culture pratiqués, des contraintes et facteurs favorables rencontrés dans les systèmes d'exploitation
	Appropriation de l'innovation en fonction d'un choix raisonné	Utilisation de l'essai comme support pédagogique ou démonstration	Démultiplication des essais permettant de mieux intégrer la variabilité du milieu
	Valorisation de la profession d'agriculteur		Augmentation quantitative et qualitative des observations effectuées
		Elaboration d'un référentiel technique et de propositions en phase avec le milieu réel. Analyse des modalités d'appropriation des innovations et de leurs transformations éventuelles par les agriculteurs	
Intérêt pour le groupe ou l'institution	Création de réseaux d'entraide formelle et informelle	Constitution de groupes d'exploitants, supports d'activités ultérieures de formation et de développement	Hiérarchisation des facteurs conditionnant le rendement et des problèmes à résoudre par une équipe pluridisciplinaire avec des priorités selon les zones et les systèmes d'exploitation
	Appropriation de l'innovation par le réseau d'exploitants en relation avec l'agriculteur	Définition de paramètres de prise de décision et élaboration d'outils pédagogiques	
		Définition de systèmes de production susceptibles d'être proposés à l'ensemble des agriculteurs ou à certains types d'exploitants	

rapidement les facteurs qui conditionnent les rendements et les problèmes à résoudre par l'équipe pluridisciplinaire en fonction des zones pédoclimatiques ou des systèmes d'exploitation en évolution permanente.

Réalisation de manuels, de fiches techniques

La présentation des conseils techniques relève d'un travail commun associant recherche et développement. Les résultats de la recherche doivent être accessibles au plus grand nombre.

Formation de chercheurs

Outre la formation des agriculteurs, techniciens, formateurs et chercheurs impliqués, ce dispositif constitue un support privilégié de formation de stagiaires, thésards et chercheurs ou développeurs des pays voisins (Madagascar, Comores...).

NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE

Un plan de développement visant l'intensification raisonnée du géranium et la diversification des productions qui peuvent l'accompagner a été mis en oeuvre dès 1985. L'ensemble des partenaires du développement se trouve associé aux agriculteurs — organismes d'aménagement foncier, de financement, de vulgarisation, de formation, de recherche, coopératives —, et contribue à la mise au point de systèmes d'exploitation plus performants et préservant le milieu.

De nouvelles propositions sont en cours d'élaboration afin d'améliorer la productivité de la terre et de la main-d'œuvre. Elles associent le non-travail du sol et sa couverture permanente à un embocagement des parcelles, permettant ainsi d'intégrer un ensemble de facteurs favorables et convergents.

Réunion "agronomie-systèmes de culture"

4 septembre 1991

ANNEXE

Résumé, par E. Jallas,

de la communication de M. Sebillotte

lors du 1er congrès européen d'agronomie

Les conditions dans lesquelles s'exerce l'activité agricole dans les pays occidentaux ont fortement évolué depuis la fin de la dernière guerre. Aujourd'hui, l'agriculteur est confronté, non seulement aux aléas climatiques, mais aussi à des exigences économiques et environnementales plus fortes.

Techniques (ou précédent)	⟶	Rendement	*Cette relation simpliste, qui se traduit en général par une confusion d'effets et ne permet pas le diagnostic, est donc à rejeter*

Les agronomes doivent maintenant fournir aux agriculteurs des outils d'aide au choix du (des) scénarios(s) optimal(aux) pour la conduite de leur exploitation.

Pour cela, l'agronome dispose de nombreux outils. Par exemple, des modèles d'élaboration du rendement, qui lui permettent de déterminer les états du milieu et du peuplement à atteindre pour satisfaire des objectifs fixés. Mais il peut aussi élaborer des diagnostics en explicitant la diversité des états du milieu au niveau de l'exploitation, à partir de la lecture et de l'interprétation des transformations de ce milieu et de la reconstruction de leur genèse. Cependant, il doit rester conscient que la recherche d'une production maximale pour chaque parcelle est impossible car le fonctionnement global de l'exploitation interfère avec chaque technique mise en œuvre.

Fonctionnement de l'exploitation	⟶	Organisation des opérations techniques et des successions culturales	*En explicitant ces relations, l'agronome constate que des opérations agronomiquement critiquables résultent d'une démarche rationnelle qui répond à beaucoup de raisons autres qu'agronomiques*

Dans son analyse de l'histoire des parcelles cultivées, l'agronome peut s'appuyer sur quatre concepts propres à la science agronomique :

– **l'effet précédent cultural,** qui ne se détermine qu'à posteriori par l'étude des états du milieu ;

– **la sensibilité du suivant,** qui correspond à la réponse de la culture suivante aux différents états du milieu ;

– **les effets cumulatifs,** qui sont produits par les cultures successives en interaction avec le climat ;

– **l'état moyen du milieu,** qui est l'équilibre atteint sous l'action de modalités de conduite suffisamment stables.

Mais la science agronomique n'existe que parce qu'il y a des agriculteurs, qui transforment le milieu. L'agronome doit donc réintégrer l'acteur et accepter la différence radicale entre une technique culturale, qu'il a définie à partir d'un cadre théorique, et l'opération technique correspondante, réalisée par l'agriculteur dans sa parcelle. Cette différence provient du fait que la réalité du milieu, mal définie, et les aléas climatiques ont des effets non prévus dans les définitions des techniques culturales. Ainsi, une opération technique ne peut définir une technique qu'à posteriori, une fois que l'on a examiné l'ensemble des transformations du milieu qui résultent de l'état initial, des intrants, du climat au moment de l'opération, etc.

Alors, pour préparer l'action de l'agriculteur, l'agronome doit se situer à l'intersection de sa logique et de celle de l'agriculteur. Cette action suppose un objectif à atteindre, des diagnostics pour analyser la situation, en comprendre sa genèse et la juger, et enfin un programme d'opérations techniques pour aller de l'état initial du système à l'"état objectif". Pour s'aider dans cette préparation l'agronome dispose de trois concepts :

– **l'itinéraire technique,** qui est une combinaison logique et ordonnée de techniques culturales qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée. Concept qui, en postulant l'impossibilité de déterminer l'effet d'une opération technique sans se référer à leur ensemble, permet d'établir des ponts entre la logique de l'agriculteur et celle de l'agronome ;

– **le système de culture,** qui est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Il est aujourd'hui essentiellement utilisé pour analyser des situations culturales et émettre des diagnostics ;

– **les modèles d'action pour la conduite d'une culture,** qui sont la représentation mentale que se fait l'agriculteur de la manière d'agir pour atteindre certains objectifs.

En réintroduisant l'acteur dans sa démarche, l'agronome a un autre regard sur l'organisation de ses propres démarches et s'ouvre à de nouvelles disciplines telles que l'intelligence artificielle ou la psychologie cognitive. Mais il ne faut jamais qu'il oublie de se poser la question : "jusqu'où gagne-t-on, dans l'action, à remplacer l'empirisme de l'acteur par des procédures de calcul directement issues des connaissances théoriques ? ".