



HAL
open science

L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable.

Jean-Marc Meynard, Thierry Doré, Robert Habib

► **To cite this version:**

Jean-Marc Meynard, Thierry Doré, Robert Habib. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable.. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 2001, 87 (4), pp.223-236. hal-01382344

HAL Id: hal-01382344

<https://agroparistech.hal.science/hal-01382344>

Submitted on 19 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ÉVALUATION ET LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE POUR UNE AGRICULTURE DURABLE

EVALUATION AND CONCEPTION OF CROPPING SYSTEMS FOR A SUSTAINABLE AGRICULTURE

par Jean-Marc Meynard (*), Thierry Doré (**) et Robert Habib (***)

(note présentée par Jean-Marc Meynard)

RÉSUMÉ

Les problématiques et méthodes des agronomes impliqués dans l'étude et l'amélioration des systèmes de culture ont évolué au cours des dernières années, pour faire face aux enjeux qu'imposent les préoccupations de durabilité de l'agriculture. Le concept de système de culture met en avant les liens qui existent entre les actes techniques, mis en œuvre successivement sur une parcelle agricole, liens dont l'origine tient à la fois au fait que les actes techniques résultent de décisions fortement liées les unes aux autres et à l'absence de relations bi-univoques entre techniques culturales et caractéristiques du milieu. Quels que soient le pas de temps ou l'échelle spatiale considérés, il est essentiel de prendre en compte ces liens pour répondre aux questions posées aux agronomes, questions qui sont de deux types : quel jugement porter sur les parcelles agricoles (évaluation), quels systèmes davantage adaptés aux exigences de la société proposer (conception) ? Dans le domaine de l'évaluation des pratiques agricoles, les agronomes s'attachent à produire des outils méthodologiques permettant de juger la compatibilité des systèmes de culture d'une parcelle ou d'une exploitation agricole avec les exigences de la durabilité (indicateurs de durabilité), et de porter un diagnostic sur tel ou tel aspect particulier du fonctionnement du champ cultivé (outils de diagnostic). Dans le domaine de la conception, la mise au point de méthodes tient également, parallèlement aux productions opérationnelles (nouvelles modalités de raisonnement des systèmes de culture), une place importante. Dans une démarche commune de mise au point ou d'amélioration des systèmes de culture, intégrant une étape de diagnostic et une étape d'évaluation des solutions proposées, deux voies sont actuellement proposées pour la mise au point de nouvelles règles : celle du recours à la modélisation et celle de la mobilisation de connaissances expertes. Enfin, une partie des recherches sur les systèmes de culture, nécessaires pour mener à bien l'évaluation et la conception, a une vocation plus cognitive. L'objectif de durabilité des agrosystèmes conduit à un renforcement des collaborations interdisciplinaires entre chercheurs agronomes des systèmes de culture et disciplines biologiques, sciences de l'environnement, sciences de la décision et sciences économiques et sociales, ainsi qu'entre les chercheurs et les ingénieurs impliqués dans l'évolution des systèmes de culture.

Mots clés : agriculture durable, systèmes de culture, diagnostic, modélisation, agrosystème, agriculture.

SUMMARY

In recent years, with the new concern for sustainability in agriculture and the challenges it entails, agronomists seeking to improve cropping systems have been examining new issues and using new methods. The concept of a cropping system focuses on the links between the successive technical operations carried out on a field. These links originate in the facts that

(*) Institut national de la Recherche agronomique, UMR d'Agronomie, INRA INA-PG, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon.

(**) Institut national agronomique Paris-Grignon, UMR d'Agronomie, INRA INA-PG, 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

(***) Institut national de la Recherche agronomique, Unité d'Écophysiologie et Horticulture, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9.

Acad. Agric. Fr., 2001, 87, n° 4, pp. 223-236. Colloque Olivier de Serres, Le Pradel, 28-30 septembre 2000.

the technical operations result from decisions that are themselves closely interlinked, and that there are not one-to-one relationships between cropping methods and environmental characteristics. On any time or spatial scale, agricultural scientists must take these links into account when seeking to answer the two types of question they are asked: which assessment to make of a given field? (evaluation); which system would be most appropriate for the requirements of society? (system design). To evaluate farming practices, agricultural scientists produce methodological tools for judging the degree of compatibility between the cropping systems used on a field or farm and the requirements of sustainability (sustainability indicators), and make diagnostic analyses of specific aspects of the functioning of the cultivated field (diagnostic tools). On the system design side, besides operational output (new ways of working out cropping systems), an important part of the work is to develop design methods. Taking the same approach to improve existing cropping systems and develop new ones (a diagnostic phase followed by a phase evaluating the proposed solutions), two pathways are currently proposed for developing new rules: one uses modeling, the other one uses expert knowledge. Finally, an aspect of cropping systems research which is also necessary for successful evaluation and design has a more cognitive purpose. The goal of achieving sustainable farming systems requires stronger interdisciplinary collaboration between cropping systems research, biology, ecology, decision-making science, economics and sociology, and also between the researchers and the engineers involved in cropping systems development.

Key words : *sustainable agriculture, cropping systems, diagnosis, modelisation, agro-systems, agriculture.*

L'attention croissante portée, dans les milieux de l'Agronomie, à la problématique du développement durable, se traduit par un regain d'intérêt pour les approches globales des pratiques agricoles. Le concept de **"système de culture"**, qui focalise une telle approche globale des pratiques, est ainsi au centre d'un renouveau méthodologique qui concerne tant les organismes de recherche (24, 42, 48) que les institutions impliquées dans le développement agricole. Tous sont en effet amenés à s'interroger sur les moyens de concilier objectifs à court et long terme, impératifs économiques et environnementaux, intérêts des agriculteurs et de leurs partenaires d'amont ou d'aval, attentes des citoyens vis-à-vis du monde rural et projets des sociétés locales – qui sont les lignes de force du développement durable appliqué à l'agriculture (28). Cet article présente la manière dont ont évolué, face à ces nouveaux enjeux, les problématiques et méthodes des agronomes impliqués dans l'étude et l'amélioration des systèmes de culture.

1. LE CONCEPT DE "SYSTÈME DE CULTURE"

En 1990, M. **Sebillotte** définit le système de culture comme "l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique ; chaque système de culture se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures". L'itinéraire technique (53, 54) désigne quant à lui l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur le pas de temps d'un cycle de production au niveau d'une parcelle (sur une culture en succession céréalière ou légumière, sur une année pour des cultures pérennes). En employant ces concepts, les agronomes affirment qu'il est essentiel de s'intéresser aux liens qui existent entre les actes techniques mis en œuvre successivement sur une parcelle agricole. Dans la définition du concept d'itiné-

raire technique, M. **Sebillotte** évoque ainsi, de manière significative, la "combinaison logique et ordonnée de techniques culturales". Ces liens ont deux origines (55) :

a. d'une part, les modalités techniques constitutives du système de culture ou de l'itinéraire technique résultent de **décisions fortement liées les unes aux autres** : celui qui les prend (disons, pour simplifier, l'agriculteur) les raisonne toutes dans un cadre unique rassemblant ses objectifs de production, les contraintes de son système et les moyens disponibles (54). Ainsi, l'itinéraire technique de l'orge de brasserie diffère (par la variété, la fertilisation azotée, souvent la date de semis) de celui de l'orge pour l'alimentation animale ; ainsi, l'itinéraire technique du blé dans une exploitation d'élevage sera-t-il contraint par la concurrence pour la main-d'œuvre au moment de l'application des fertilisants et fongicides, ce qui peut entraîner des retards ou des anticipations de ces interventions (40). L'observation de la parcelle par l'agriculteur constitue également une source de liens forts entre décisions techniques : une technique culturale est souvent raisonnée en fonction d'une appréciation des résultats des précédentes : en verger de pommiers, par exemple, la fertilisation peut être raisonnée en fonction de l'objectif de rendement visé l'année "n", mais en tenant compte du rendement obtenu l'année "n-1" (5), lui-même conséquence de l'itinéraire technique et des conditions de milieu qui avaient prévalu en "n-1" ;

b. d'autre part, les différentes techniques culturales agissent sur les mêmes caractéristiques de l'environnement de la plante cultivée : une même technique joue à la fois sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du milieu, et symétriquement chacune de ces caractéristiques est influencée (contrôlable) par plusieurs techniques (56). Par exemple, le travail du sol joue à la fois sur la porosité du sol, donc son aération, la dynamique de l'eau, la localisation des résidus de culture et donc la dynamique de l'azote, la destruction des mauvaises herbes, la localisation de l'*inoculum* parasitaire... De même, la fertilisation azotée joue sur l'alimentation azotée de la culture, mais influence aussi indirectement sa transpiration et sa sensibilité aux maladies. Inversement, une caractéristique du milieu (par exemple une épidémie de piétin verse du blé) est influencée à la fois par la succession de cultures, le travail du sol, la fertilisation, la date de semis, la variété et les traitements fongicides (11). Du fait de cette absence de relation bi-univoque entre techniques culturales et caractéristiques du milieu, il existe de **fortes interactions entre les techniques culturales**.

Il est essentiel de prendre en compte ces deux types de liens pour analyser, évaluer ou améliorer les pratiques agricoles : on ne peut pas étudier les effets d'une technique culturale indépendamment des autres techniques. Un même objectif de production peut être atteint de différentes manières et, dès que l'on change d'objectif ou de contraintes matérielles (par exemple, de temps disponible pour réaliser les interventions culturales), il faut souvent modifier plusieurs techniques (40). L'impact d'une culture sur l'environnement ne peut être caractérisé indépendamment de la donnée de son itinéraire technique et de la succession dans laquelle elle s'insère ; une innovation (nouvelle variété, nouveau mode de prévention des pollutions...) ne peut être évaluée sans considérer la manière dont elle changera l'ensemble du système de culture.

Si différents pas de temps sont d'emblée pris en charge dans la définition du système de culture, la question importante du niveau spatial pertinent pour l'analyse des pratiques reste cependant ouverte : M. **Sebillotte** (op. cit.) parle d'un ensemble de "parcelles conduites de manière identique" ; le concept anglo-saxon de "*cropping system*" appréhende une zone plus vaste, par exemple une petite région agricole où la nature des successions de cultures et les modalités de maîtrise de la production sont peu variables (64). En fait, une des richesses du concept tenant à l'affirmation de la cohérence entre les actes techniques, il est important de remarquer que cette cohérence s'exprime à différentes échelles (31) : celle de la plante individuelle (en arboriculture ou maraîchage où certaines interventions sont raisonnées plante à plante), celle de la partie de parcelle (lorsqu'il y a modulation intraparcélaire des interventions culturales - agriculture manuelle, arboriculture, ou agriculture de précision -), celle de la parcelle agricole élémentaire, celle de l'îlot de parcelles ou de la petite région agricole. Dans ces deux derniers cas, les relations spatiales entre parcelles (échanges de pollen, de spores ; déplacements de ravageurs ; flux d'eau et de terre...) deviennent primordiales : laissant au concept de système de culture son acception parcélaire, on parle alors d'organisation spatiale (ou de coordination territoriale) des systèmes de culture, pour désigner les interactions et interdépendances complexes qui existent entre les techniques culturales appliquées sur des parcelles différentes (48).

2. ORIGINE ET NATURE DES QUESTIONS POSÉES

L'amélioration des systèmes de culture doit prendre en compte deux dimensions essentielles de l'agriculture durable :

- **une grande diversité des situations** : à la diversité, bien connue des agronomes, des sols et du climat s'ajoute aujourd'hui une diversité croissante des marchés agricoles ("à chaque marché, son produit") et des contraintes administratives (réglementations environnementales définissant des "zones vulnérables", politiques régionales...);

- **une grande instabilité du contexte** : les marchés, les réglementations évoluent parfois très rapidement ; parallèlement, le rythme des innovations génétiques ou technologiques s'accélère.

Face à cette hétérogénéité des situations et à cette instabilité du contexte, l'agriculture, pour être durable, doit être diverse et adaptative. Il n'est donc pas question de proposer de nouveaux systèmes de culture passe-partout ou immuables ; il s'agit, avant tout, d'aider les acteurs sociaux qui, à un degré ou à un autre, interviennent dans la définition des systèmes de culture, à faire évoluer ceux-ci dans le sens d'une amélioration de l'atteinte de leurs objectifs économiques, environnementaux, sociaux.

Les acteurs concernés sont très nombreux : agriculteurs, agents de développement, responsables d'aménagements, entreprises d'agrofour-nitures, de transformation agro-industrielle, de services à l'agriculture

(logiciels, certification), décideurs administratifs et politiques. Les inter-relations entre ces acteurs sont importantes et la recherche de solutions à un antagonisme entre objectifs (de production et d'environnement, par exemple) nécessite souvent de contribuer à l'aide à la décision de plusieurs d'entre eux ; les territoires concernés par les décisions de ces différents acteurs étant imbriqués (19), les recherches sur les systèmes de culture doivent souvent prendre en considération la coordination entre des actions dont les effets s'expriment sur des espaces différents (emboîtés : la parcelle dans l'exploitation agricole, l'exploitation dans le bassin d'approvisionnement d'une entreprise agroalimentaire ; ou discordants : les découpages de l'espace en bassins versants et bassins d'approvisionnement sont fréquemment non superposables...).

Ces acteurs sont confrontés à deux types de questions relevant de la problématique de recherche sur les "Systèmes de culture".

- **Ils doivent porter un jugement sur les systèmes de culture des agriculteurs (les pratiques agricoles)**. Il s'agit, par exemple, d'estimer l'impact des pratiques sur l'environnement ou l'évolution de la fertilité du milieu ; d'identifier quelles sont les parcelles responsables d'un problème identifié à un niveau régional (pollution de l'eau, qualité insuffisante ou irrégulière d'un produit récolté...) ; d'identifier quels sont les actes techniques qui sont à l'origine des problèmes. Toutes ces questions peuvent être résumées par l'interrogation suivante : "Qu'est-ce qui va, qu'est-ce qui ne va pas dans la situation actuelle ?".

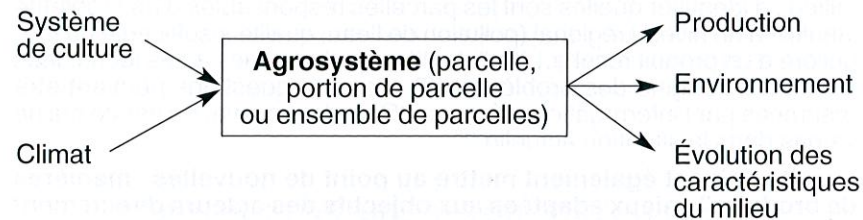
- **Ils doivent également mettre au point de nouvelles "manières de produire", mieux adaptées aux objectifs des acteurs directement impliqués et aux exigences de la société**. Un nouveau débouché pour les produits agricoles d'une région, de nouvelles contraintes administratives, une innovation technique majeure, ou tout simplement un diagnostic d'impact peu satisfaisant peuvent ainsi amener à chercher à mettre au point de nouveaux itinéraires techniques, de nouveaux systèmes de culture, ou de nouvelles modalités d'agencement spatial des systèmes de culture. Les questions posées peuvent être résumées par les interrogations : "Que faut-il faire pour ... ?" et "Que se passerait-il si ... ?". Dans le cas des questions du premier type, on donne les objectifs et on cherche le meilleur moyen de les atteindre ; les questions du second type correspondent à l'analyse de l'intérêt d'une innovation avant sa diffusion.

Comme on peut s'en douter, de même qu'elles concernent différentes échelles spatiales, ces questions se déclinent à différents pas de temps : ainsi, une évaluation d'impact de méthodes de protection contre les ennemis des cultures devra considérer aussi bien les conditions d'application des produits pesticides (pas de temps court) que l'influence des itinéraires techniques sur les risques phytosanitaires (pas de temps du cycle cultural) ou l'évolution sur le long terme de l'*inoculum* parasitaire et des populations de mauvaises herbes résistantes à certaines matières actives (pas de temps pluriannuel). De même, la réduction des pollutions nitriques suppose à la fois d'améliorer le calcul des doses et le fractionnement de l'engrais azoté, en tenant compte, en temps réel, des caractéristiques des sols et des plantes ; de raisonner la conduite des intercultures en fonction

de la présence d'azote minéral dans le sol ; et de s'assurer sur le long terme de la maîtrise des arrière-effets de l'enrichissement de la teneur en azote des sols liée aux apports d'éléments fertilisants (23, 38, 39, 43).

3. L'ÉVALUATION ET L'AMÉLIORATION DES SYSTÈMES DE CULTURE : RECHERCHES EN COURS

L'objet d'étude commun aux recherches évoquées ici est un espace agricole (parcelle, fraction de parcelle ou ensemble de parcelles), soumis à un ou plusieurs systèmes de culture. Cet objet d'étude comprend des peuplements végétaux cultivés ou non, des parasites, des auxiliaires et une certaine épaisseur de sol et d'atmosphère qui interagissent directement avec eux. Il est parfois désigné, en référence au concept d'écosystème, sous le nom d'agrosystème ou d'agroécosystème.



Les recherches actuelles s'articulent autour de trois objectifs :

- évaluer les pratiques agricoles,
- mettre au point de nouveaux systèmes de culture,
- acquérir des connaissances concernant les effets des systèmes de culture sur le fonctionnement de l'agrosystème.

3.1. L'évaluation des pratiques agricoles

Dans ce domaine, les chercheurs sont parfois amenés à travailler sur telle ou telle étude locale d'impact, suite à une demande qui recherche une réponse opérationnelle rapide. Mais, le plus souvent, ils s'attachent à se dégager des cas spécifiques pour produire des **outils méthodologiques** qui pourront être ensuite mis en œuvre par des agriculteurs, des organismes de développement, des organismes certificateurs ou les pouvoirs publics. Ces outils méthodologiques appartiennent à deux grandes familles : celle des indicateurs de durabilité et celle des outils de diagnostic.

P. Girardin et C. Bockstaller (21) précisent que le but d'un indicateur est de donner une information simple et lisible sur une réalité complexe. Les indicateurs de durabilité ont pour fonction de juger la compatibilité des systèmes de culture d'une parcelle ou d'une exploitation agricole avec les exigences de la durabilité ; ils permettent de classer les systèmes de culture

les uns par rapport aux autres et d'apprécier si, au cours d'une période donnée, l'évolution des pratiques a été ou non favorable. Pour pouvoir être utilisés par des agriculteurs, des conseillers, des organismes certificateurs, ils ne doivent nécessiter pour leur calcul que des données disponibles dans une exploitation agricole (assolement, succession, techniques culturales, structure du parcellaire, achats d'intrants...). Le premier rôle du chercheur est alors de raccorder ces variables, connues parfois de manière peu précise, avec sa connaissance du fonctionnement de l'agrosystème pour fournir des informations pertinentes à l'utilisateur. Les indicateurs sont généralement ciblés sur un impact environnemental particulier, comme la pollution des eaux par l'ion nitrate ou la contamination des sols et des eaux par les pesticides. H. Van der Werf (62) propose une synthèse bibliographique sur les indicateurs de durabilité actuellement disponibles en Europe. Le second travail de la recherche en ce domaine est - tâche importante, mais souvent délicate - de s'assurer de la qualité des indicateurs, en les confrontant à des mesures réelles de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement et les caractéristiques du sol, à des modèles mécanistes bien connus ou, au moins, à des avis d'experts (22).

L'ambition du **diagnostic agronomique régional** est d'identifier et de hiérarchiser les actes techniques responsables d'un problème agronomique donné dans une région : par exemple, une productivité insuffisante ou irrégulière, la qualité moyenne d'un produit insuffisante au niveau d'un bassin de production, la pollution d'un aquifère par des nitrates ou des pesticides... Une synthèse sur la méthode du diagnostic agronomique a été publiée par Doré *et al.* (20), donnant des éléments sur l'échantillonnage des sites d'observation et de mesure, les variables à recueillir, l'analyse des données... Le développement d'outils permettant de porter un diagnostic sur tel ou tel aspect particulier du fonctionnement du champ cultivé, comme la méthode du profil cultural (26), l'utilisation des composantes du rendement (7, 57), la mise au point de l'indice de nutrition azotée (29, 30), a permis un accroissement de l'acuité et de la pertinence du diagnostic. La multiplicité des interactions entre techniques existant au niveau du système de culture complique en effet singulièrement ce dernier : l'enjeu est de comprendre ces interactions pour s'affranchir des confusions d'effets et identifier les causes réelles des problèmes (44). Par exemple, les céréaliculteurs réalisent en général leurs semis de blé les plus précoces derrière certains précédents (pois protéagineux, pomme de terre, colza) ; le semis précoce induit des risques phytosanitaires qui obligent souvent à accroître la protection fongicide et insecticide. Dans ces conditions, si l'on observe que les rendements sont inférieurs en semis tardif, est-ce parce que le blé est semé dans des conditions plus humides, parce que le cycle est plus court ou parce que les précédents culturaux sont moins favorables ? La réponse est différente selon les régions, selon les années, et la connaître est important pour espérer régulariser le rendement. Et si les produits phytosanitaires du blé ont un impact négatif sur l'agrosystème, faut-il remettre en cause leur emploi ou le choix des dates de semis par les agriculteurs, choix qui les rend nécessaires ? Le diagnostic nous oblige à expliciter les relations entre les différentes techniques culturales, c'est-à-dire à aller jusqu'au bout de la cohérence du système de culture.

D'une manière générale, les recherches sur l'évaluation des pratiques agricoles sont en forte expansion dans le monde, en relation avec la demande des agriculteurs pour des méthodes d'autodiagnostic et d'évaluation d'impact, le développement des démarches de qualification et de certification des exploitations agricoles, et la mise en place d'observatoires de l'environnement (3, 6, 25, 45, 60 ...).

3.2. Mise au point de systèmes de culture innovants

L'objectif des recherches est ici de mettre au point :

- de nouvelles modalités de raisonnement des techniques, itinéraires techniques, systèmes de culture et organisation spatiale des systèmes de culture, accompagnées de leurs domaines de validité ;

- des méthodes transmissibles aux acteurs du développement agricole et aux entreprises liées à l'agriculture, en vue de concevoir d'autres modalités de raisonnement et d'en déterminer le domaine de validité.

L'expérimentation factorielle est la méthode classiquement utilisée en agronomie pour améliorer les systèmes de culture : on met en œuvre (dans des conditions identiques) plusieurs variantes d'une technique donnée (par exemple, plusieurs doses d'engrais) ou plusieurs combinaisons de deux ou trois techniques et on détermine, en s'appuyant sur une analyse de variance, les solutions les plus satisfaisantes. Face aux enjeux de la durabilité, cette méthodologie rencontre ses limites : l'évolution très rapide du contexte rend vite obsolètes les solutions techniques sélectionnées par l'expérimentation ; pour représenter la diversité des situations agricoles, un grand nombre d'expérimentations est nécessaire, rendant les coûts prohibitifs ; enfin, les effets à long terme des systèmes de culture innovants ne sont connus que longtemps après leur adoption (16).

En conséquence, on considère de fait aujourd'hui que, chaque fois que c'est possible, l'amélioration des systèmes de culture doit s'appuyer sur l'utilisation de modèles de fonctionnement de l'agrosystème (24, 42, 51, 56) : schématiquement, si l'on est capable de prévoir les effets des systèmes de culture sur le fonctionnement de l'agrosystème, on peut alors déterminer, par exploration de scénarios, quels systèmes de culture permettent au mieux d'atteindre des objectifs donnés. Par rapport à l'expérimentation factorielle, cette démarche donne des réponses rapides pour l'adaptation des techniques culturales à un nouveau milieu ou à une évolution du contexte ; les modèles permettent d'explorer la sensibilité du résultat aux climats possibles et de prévoir les effets à long terme des nouveaux systèmes. Enfin, le modèle autorise l'exploration de scénarios techniques très divers, ce qui rend cette démarche beaucoup plus innovante que l'expérimentation factorielle. Le domaine de validité du modèle (défini par ses hypothèses de construction et son évaluation) permet de cerner celui des nouveaux systèmes de culture.

Ce recours à la modélisation s'insère dans une démarche générale de mise au point ou d'amélioration des systèmes de culture présentée à la figure 1. Cette démarche débute par une définition du problème de décision : quel est le décideur concerné (éventuellement, quels sont les déci-

deurs) ? Quels sont les objectifs et les contraintes du (des) décideur(s) ? Quelle est l'échelle d'espace pertinente (parcelle, exploitation agricole, bassin d'approvisionnement d'une entreprise, petite région...) ? Quelles sont les techniques culturales sur lesquelles peut ou doit porter l'amélioration technique ? Cette investigation amène souvent l'agronome à collaborer avec des économistes, des sociologues, des spécialistes des sciences de la gestion ou de la décision.

La seconde étape vise à disposer d'une modélisation de l'agrosystème adaptée au problème de décision. Chaque fois que possible, des modèles issus des disciplines amont (sciences du sol, écophysiologie végétale...) sont mobilisés ; un travail spécifique est cependant généralement nécessaire, concernant les variables d'entrée et de sortie du modèle ou la modélisation de processus importants dans une situation donnée et mal simulés par les modèles disponibles. Pour modéliser le fonctionnement d'un verger de kiwi (espèce dioïque nécessitant la pollinisation des fleurs des plants femelles par du pollen des fleurs des plants mâles pour atteindre une récolte commerciale), il a fallu modéliser les processus de floraison (1) et de pollinisation (32, 33) avant de pouvoir proposer un modèle adapté à la gestion des opérations techniques les plus importantes sur cette espèce (choix du schéma de plantation, taille, éclaircissage, irrigation) en France (31).

J.M. **Meynard** (42) souligne que le diagnostic agronomique permet souvent d'orienter la modélisation en donnant au chercheur une hiérarchie des processus importants à prendre en considération dans une région donnée. S. **de Tourdonnet** et J. **Roger-Estrade** (61) en donnent un exemple en production légumière sous abri. Par ailleurs, le développement des recherches sur la coordination territoriale des systèmes de culture amène de plus en plus à concevoir des modèles spatialisant les effets des systèmes de culture sur la production et l'environnement, ce qui n'est pas sans poser des problèmes spécifiques (changement d'échelle, prise en compte des haies et bordures de champs...)(13, 42).

Dans une troisième étape, le modèle est utilisé pour déterminer les scénarios techniques qui permettent d'atteindre le mieux possible les objectifs assignés (en termes de production, de préservation de l'environnement...). Ces scénarios sont souvent décrits par des "règles de décision" qui mettent en correspondance les valeurs prises par certaines variables d'état de la culture (stade ou statut nutritionnel du végétal, humidité ou structure du sol, pluviométrie récente ou prévue, etc.) et des actions techniques ("Si..., alors..."). Un jeu de règles de décision, conçu en cohérence avec un objectif de production donné, définit un itinéraire technique ou un système de culture prévisionnel (49, 56, 58).

Un gros travail est actuellement effectué sur les méthodes de conception de ces "systèmes de culture prévisionnels" : comment déterminer, grâce au modèle, les règles de décision qui permettent de respecter à la fois des exigences économiques, environnementales... ? La comparaison, par simulation, de jeux de règles de décision, constitue la possibilité la plus simple : très favorable à une interaction entre le modèle et son utilisateur, elle a l'inconvénient de ne pas permettre de tester de très nombreuses solutions (2). Les méthodes de l'intelligence artificielle

(résolution de problèmes de satisfaction de contraintes - CSP - , apprentissage automatique...) sélectionnent directement les itinéraires techniques ou les systèmes de culture les mieux adaptés à un cahier des charges donné ; elles sont actuellement à l'étude dans des outils d'aide à la conception d'itinéraires techniques (34). Les méthodes fondées sur l'optimisation (programmation linéaire, contrôle optimal...) offrent de grandes potentialités pour les problèmes où une fonction objectif peut être définie (35) ; les méthodes multicritères d'aide à la décision permettent de comparer et de sélectionner des itinéraires techniques ou des systèmes de culture en prenant en compte simultanément de nombreux critères qui ne peuvent pas être exprimés dans la même unité (34). On voit ainsi que l'utilisation de modèles agronomiques pour la conception de nouveaux systèmes de culture ouvre un champ très prometteur de collaboration avec des disciplines (gestion, intelligence artificielle, automatique, ...) que l'agronomie n'avait pas coutume de côtoyer.

La quatrième étape consiste à vérifier que le modèle a bien permis de déterminer les règles de décision et systèmes de culture prévisionnels qui répondent le mieux à un cahier des charges donné. Les expérimentations "Systèmes de culture" dont le principe a été décrit par **Meynard et al.** (46) et **Debaeke et al.** (16), conduites par des règles de décision, peuvent être utilisées dans ce but. **P. Vereijken** (63) propose de tester les nouveaux systèmes de culture dans des fermes pilotes, ce qui permet d'évaluer non seulement leur cohérence agronomique et leur aptitude à atteindre les objectifs assignés, mais également leur faisabilité en conditions agricoles. Cependant, de telles expérimentations ne permettent généralement pas d'évaluer l'aptitude des modèles à raisonner l'agencement spatial des systèmes de culture ou leurs effets à long terme. Un effort doit être réalisé concernant la mise en place d'expérimentations "Systèmes de culture" de longue durée et d'observatoires spatialisés des effets des pratiques agricoles, pour préparer les conditions d'une évaluation des modèles de l'agriculture durable.

La place croissante prise par les modèles dans la mise au point de systèmes de culture innovants (voie *a* de la figure 1) ne doit cependant pas faire oublier que l'on ne dispose pas encore de connaissances suffisantes pour modéliser tous les processus, toutes les cultures, tous les milieux. Pour pallier cette difficulté, une alternative est possible (voie *b*) : un diagnostic agronomique approfondi permet d'identifier, au sein des systèmes de culture des agriculteurs, les actes techniques à l'origine d'une non-atteinte des critères de la durabilité. On propose alors, en s'appuyant sur des connaissances expertes, des jeux de règles de décision susceptibles de résoudre les problèmes identifiés. Des expérimentations "Systèmes de culture" multilocales, échantillonnant la gamme des conditions agronomiques locales, sont alors mises en place pour tester les nouveaux jeux de règles ; un diagnostic agronomique réalisé sur les expérimentations est souvent utile pour déterminer les points faibles du nouveau jeu de règles et le faire évoluer en tenant compte avec réalisme de la diversité des conditions agricoles. Cette méthode de mise au point de systèmes de culture en l'absence de modèle a également progressé ces dernières années, souvent à partir de questions très concrètes issues des professionnels (10, 17).

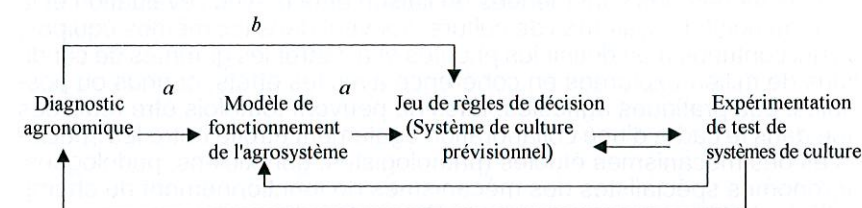


Figure 1 : Démarche de mise au point et d'amélioration des systèmes de culture.
Figure 1 : Process for setting and improving cropping systems.

3.3. Connaissance de l'effet des systèmes de culture sur l'évolution des caractéristiques du milieu, l'environnement et la production

En amont des travaux méthodologiques et directement appliqués, souvent menés de concert avec les acteurs de l'agriculture, qui viennent d'être décrits, une partie des recherches sur les systèmes de culture a une vocation plus cognitive. En effet, l'évaluation des pratiques et la mise au point de nouveaux systèmes nécessitent une très bonne connaissance de base sur les techniques culturales, leurs effets, contingents du milieu, et leurs interactions. Or, des lacunes importantes demeurent en la matière (18, 42). Les effets des systèmes de culture sur la dynamique de l'azote, de l'eau, des matières organiques commencent à être bien connus et leur modélisation constitue l'ossature des modèles de simulation du fonctionnement des agrosystèmes dont on dispose aujourd'hui (par exemple : 8, 9, 59). Mais des lacunes très importantes subsistent concernant les effets des techniques agricoles sur les adventices, les parasites, la faune du sol, la structure du sol... Comme le soulignent **H. Manichon** et **J. Roger-Estrade** (37) pour la structure du sol, ou **P. Debaeke** (15) pour les adventices, les variables clés des modèles et leur organisation sont directement liées à leur vocation à prendre en compte les effets anthropiques : si les connaissances et méthodes de l'écologie, de la microbiologie ou de la physique du sol sont nécessaires pour bâtir les hypothèses de recherche et analyser les résultats, les agronomes les enrichissent de leurs propres concepts et méthodologies. Ainsi, le mode de description de la structure du sol proposé par **H. Manichon** (36) a-t-il considérablement facilité l'analyse des effets du travail du sol sur la structure (50), le parasitisme tellurique (12) ou les adventices (14). De même, l'analyse de la nuisibilité des parasites s'appuie sur le suivi de la diminution de l'indice foliaire du peuplement ou de ses composantes du rendement (4, 52). Par ailleurs, certains processus ne peuvent être étudiés qu'à des échelles spatiales très supérieures à la parcelle, en raison du caractère déterminant des flux de matière ou de propagules entre parcelles, et du rôle des espaces non cultivés : érosion, contaminations génétiques, épidémies de maladies à dispersion aérienne... Le paysage, la biodiversité, la structure génétique des populations d'êtres vivants deviennent pour l'agronome sources de nouvelles questions concernant les effets de l'organisation spatiale des systèmes de culture (27).

Ces recherches sont menées en liaison étroite avec l'évaluation et la mise au point de systèmes de culture, souvent dans les mêmes équipes, ce qui contribue à en définir les priorités et à cadrer les gammes de conditions de milieu explorées en cohérence avec les effets, connus ou possibles, des pratiques agricoles. Elles ne peuvent toutefois être réalisées que dans le cadre d'une collaboration également étroite entre les spécialistes des mécanismes étudiés (pathologistes, généticiens, pédologues, agronomes spécialistes des mécanismes de fonctionnement du champ cultivé...) et les agronomes des systèmes de culture.

CONCLUSION

L'explicitation de la cohérence du système de culture, liée aux objectifs des acteurs, aux contraintes auxquelles ils sont soumis, à l'existence d'interactions diverses entre les techniques, est un point de passage obligatoire, tant pour évaluer les pratiques agricoles que pour améliorer leur efficacité économique ou environnementale. Sans analyse de cette cohérence, l'évaluation des pratiques court le risque de passer à côté des problèmes de fond, des points de blocage réels et la conception de nouveaux systèmes de culture risque de devenir un exercice d'école, coupé des réalités, caricaturant le contexte de la décision et réduisant la complexité de la réalité à ce que l'on est capable de modéliser. Dans ce cadre, un savoir-faire capital de l'agronome consiste à appréhender les itinéraires techniques et les systèmes de culture dans leur globalité, à comprendre leur logique et à intégrer celle-ci dans ses diagnostics et ses propositions de systèmes innovants.

On l'a vu, l'objectif de durabilité des agrosystèmes conduit à un renforcement des collaborations interdisciplinaires. L'agronome spécialiste des systèmes de culture est en mesure d'y jouer un rôle de coordination entre disciplines biologiques, sciences de l'environnement, d'une part, et sciences de la décision, sciences économiques, sciences sociales, d'autre part, par la **production de connaissances sur les évolutions du champ cultivé sous l'effet des pratiques**, dans une véritable coproduction avec les spécialistes des mécanismes, et la **production coordonnée de systèmes de culture innovants**, dans une coproduction avec les spécialistes de l'action et des acteurs (18). Cette double production est directement en relation avec les deux types de liens à l'origine de la cohérence des systèmes de culture, évoqués ci-dessus.

Mais, pour une discipline technique fortement finalisée, l'implication, dans les programmes de recherche, des utilisateurs potentiels des indicateurs, des méthodes de diagnostic, des nouveaux itinéraires techniques ou outils d'aide à la décision doit rester une exigence constante. Le lien fort entre les chercheurs agronomes et les ingénieurs impliqués dans l'évolution des systèmes de culture, lien fait de transferts de méthodes, de "remontées" de questions, mais surtout de collaborations régulières, est un facteur essentiel du dynamisme de l'Agronomie, devenue une véritable ingénierie de la production végétale (47).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) AGOSTINI D., HABIB R. et CHADCEUF J., 1998. - A stochastic approach for a flowering model in kiwifruit "Hayward". *J. Hort. Sci.*, **74**, 30-38.
- (2) AUBRY C., LOYCE C., MEYNARD J.M., CHATELIN M.H., RELIER J.P. et VERJUX N., 1996. - Outils et méthodes pour l'évaluation et la conception d'itinéraires techniques. *In* : Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles. Actes du Colloque, INRA, Laon, 10-11 décembre 1996, pp. 111-126.
- (3) AULAGNIER M., 1996. - Élaboration de la production du pêcher. Application à l'étude du potentiel qualitatif dans la Drôme. Mémoire de Mastère en Ingénierie agronomique, INA P-G, 100 pages + annexes.
- (4) BASTIAANS L., 1993. - Effects of leaf blast on growth and production of a rice crop. 1. Determining the mechanism of yield reduction. *Neth. J. Plant Path.*, **99**, 323-334.
- (5) BELLON S., LESCOURRET F. et CALMET J.P., 2001. - Caractérisation of apple orchard management systems in a French mediterranean vulnerable Zone. *Agronomie*, **21**, 203-213.
- (6) BLAND W.L., 1999. - Toward integrated assesment in agriculture. *Agric. Sys.*, **60**, 157-167.
- (7) BOIFFIN J., CANEILL J., MEYNARD J.M. et SEBILLOTTE M., 1981. - Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. I. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie*, **1**, 549-558.
- (8) BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEFFROY M.H., RUGET F., NICOLLAUD B., GATE Ph., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD J.M. et DELÉCOLLE R., 1998. - STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**, 311-346.
- (9) CABELGUENNE M., DEBAEKE P. et BOUNIOLS A., 1999. - EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat. *Agric. Syst.*, **60**, 175-196.
- (10) CLERMONT-DAUPHIN C., 1995. - Fertilisation minérale d'une association haricot-mais en zone tropicale humide. Thèse de doctorat INA P-G, Paris, 233 pages.
- (11) COLBACH N., DUBY C., CAVELIER A. et MEYNARD J.M., 1997. - Influence of cropping systems on foot and root diseases of winter wheat. Fitting a statistical model. *Eur. J. Agron.*, **6**, 61-77.
- (12) COLBACH N. et MEYNARD J.M., 1995. - Soil tillage and eyespot : influence of crop residue movement on disease evolution and infection cycles. *Eur. J. Plant. Pathol.*, **101**, 601-611.
- (13) COLBACH N., MEYNARD J.M., CLERMONT-DAUPHIN C. et CHAMPOLIVIER J., 2000. - GeneSys-Colza : un modèle des effets à moyen et à long terme des systèmes de culture sur les flux de gènes entre champs de colza et repousses dans un espace agricole. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, **7**, 329-340.
- (14) COLBACH N., ROGER-ESTRADE J., CHAUVEL B., CANEILL J., 2000. - Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing. *Eur. J. Agron.*, **13**, 111-124.
- (15) DEBAEKE Ph., 1990. - Effets à moyen et long terme des systèmes de culture sur la flore adventive : intérêt de la modélisation pour cette approche. *In* : Les systèmes de culture, L. COMBE et D. PICARD (éd.), INRA Éditions, pp. 57-68.
- (16) DEBAEKE P., VIAUX P. et DORÉ T., 1996. - Production de références sur les successions de culture. *In* : Expérimenter sur la conduite des cultures, Comité Potentialités/DERF/ACTA, pp. 87-98.
- (17) DEJOUX J.F., MEYNARD J.M., REAU R., ROCHE R. et SAULAS P., 2001. - Evaluation of environment friendly crop management systems for winter rapeseed based on very early sowing dates. *Agronomie (soumis)*.
- (18) DORÉ T., 2000. - Contribution à la recherche sur les systèmes de culture : diagnostic agronomique régional et maîtrise des effets précédents. Habilitation à diriger des recherches, INPL, Université de Nancy-Metz, 104 pages.
- (19) DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P. et PAPY F., 2001. - Les exploitations agricoles et la gestion des territoires : questions de recherche. *In* : Gestion des territoires et environnement, BILLAUD Coord., La Documentation Française/CNRS (sous presse).
- (20) DORÉ T., SEBILLOTTE M. et MEYNARD J.M., 1997. - A diagnosis method on regional crop yield variations. *Agric. Syst.*, **54**, 169-188.
- (21) GIRARDIN Ph., BOCKSTALLER C., 1997. - Les indicateurs agroécologiques, outils pour évaluer des systèmes de culture. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, **4**, 418-426.
- (22) GIRARDIN Ph., BOCKSTALLER C. et VAN DER WERF H., 1999. - Indicators tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *J. Sustainable Agric.*, **13**, 5-21.
- (23) HABIB R., 1984. - La formation des réserves azotées chez les arbres fruitiers. *Revue bibliographique. Fruits*, **39**, 623-635.
- (24) HABIB R. et LESCOURRET F., 1999. - Highlights on integrated production systems : current research and proposal for the future. *Congrès international sur la recherche en Horticulture, ISHS-ASHS*, 17-20 juin 1998, Rome (Italie), *Acta Hort.*, **495**, 307-312.
- (25) HATFIELD J.L. et KARLEN D.L., 1994. - Sustainable Agriculture Systems. Lewis Pub., Boca Raton, FL.
- (26) HENIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969. - Le Profil Cultural. Masson, Paris, 332 pages.
- (27) HURNI H., 2000. - Assessing sustainable land management. *Agric. Ecosystems Environ.*, **81**, 83-92.
- (28) J.O.C.E., 1999. - Pistes pour une agriculture durable. *Journal officiel des Communautés européennes*, C 173/2, 19 juin 1999.
- (29) LEMAIRE G. et GASTAL F., 1997. - Nitrogen Uptake and Distribution in Plant Canopies. *In* : Diagnosis of nitrogen status in crops, G. LEMAIRE (éd.), Springer Verlag, Heidelberg, pp. 3-43.
- (30) LEMAIRE G. et MEYNARD J.M., 1997. - Use of the Nitrogen Nutrition Index for the Analysis of Agronomical Data. *In* : Diagnosis of nitrogen status in crops, G. LEMAIRE (éd.), Springer Verlag, Heidelberg, pp. 345-355.
- (31) LESCOURRET F., BLECHER N., HABIB R., CHADCEUF J., AGOSTINI D., PAILLY O., VAISSIÈRE B. et POGGI I., 1999. - Development of a simulation model for studying kiwifruit orchard management. *Agric. Syst.*, **59**, 215-239.
- (32) LESCOURRET F., GENARD M., HABIB R. et PAILLY O., 1998 b. - Pollination and fruit growth models for studying the management of kiwifruit orchards. II. Models behavior. *Agric. Syst.*, **56**, 91-123.
- (33) LESCOURRET F., HABIB R., GENARD M., AGOSTINI D. et CHADCEUF J., 1998 a. - Pollination and fruit growth models for studying the management of kiwifruit orchards. I. Models description. *Agric. Syst.*, **56**, 67-89.
- (34) LOYCE C., RELIER J.P. et MEYNARD J.M., 2002. - Management planning for winter wheat with multiple objectives (1) : the BETHA System. *Agric. Syst. (sous presse)*.
- (35) MAKOWSKI D., 2001. - Modèles et méthodes statistiques pour optimiser la dose d'engrais azoté du blé tendre. Thèse de Doctorat, INA P-G, Paris, 126 pages.
- (36) MANICHON H., 1982. - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de Docteur Ingénieur, INA P-G, Paris, 214 pages + annexes.
- (37) MANICHON H. et ROGER-ESTRADE J., 1990. - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. *In* : Les systèmes de culture, L. COMBE et D. PICARD (éd.), INRA Éditions, pp. 27-55.

- (38) MARIOTTI A., 1996. - Quelques réflexions sur le cycle biogéochimique de l'azote dans les agrosystèmes. *In* : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, G. LEMAIRE et B. NICOLARDOT (éd.), INRA Editions, pp. 9-22.
- (39) MARTIN Ph. et MEYNARD J.M., 1997. - Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate. *In* : L'eau dans l'espace rural, C. RIOU (éd.), INRA Editions, pp. 303-322.
- (40) MEYNARD J.M., 1985. - Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Doctorat INA P-G, Paris, 258 pages + annexes.
- (41) MEYNARD J.M., 1997. - Which crop models for decision support in crop management? Example of the DECIBLE system. *In* : Model-based decision support in agriculture, H.F.M. ten BERGE et A. STEIN (eds.), Quantitative approaches in systems analysis, n°15, PE, Ab/dlo, INRA Editions, Wageningen, pp. 107-112.
- (42) MEYNARD J.M., 1998. - La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture. *In* : La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes, A. BIARNES (éd.), ORSTOM, Paris, pp. 30-54.
- (43) MEYNARD J.M., AUBRY C., JUSTES E., LE BAIL M., 1997. - Nitrogen diagnosis and decision support. *In* : Diagnosis of nitrogen status in crops, LEMAIRE G. (éd.), Springer Verlag, Heidelberg, pp. 147-161.
- (44) MEYNARD J.M. et DAVID G., 1992. - Diagnostic sur l'élaboration du rendement des cultures. *Cah. Agricultures*, 1, 9-19.
- (45) MEYNARD J.M. et GIRARDIN, 1991. - Produire autrement. *Le Courrier de la Cellule Environnement (INRA)*, 15, 1-19.
- (46) MEYNARD J.M., RÉAU R., ROBERT D. et SAULAS P., 1996. - Évaluation expérimentale des itinéraires techniques. *In* : Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. Comité Potentialités/DERF/ACTA, Paris, pp. 63-72.
- (47) MEYNARD J.M. et SEBILLOTTE M., 1989. - La conduite des cultures : vers une ingénierie agronomique. *Écon. rurale*, 192/193, 35-41.
- (48) PAPY F., 2001. - Pour une théorie du ménage des champs : l'agronomie des territoires. *In* : Gestion des territoires et environnement, BILLAUD coord., La Documentation Française/CNRS, (sous presse).
- (49) RÉAU R., MEYNARD J.M., ROBERT D. et GITTON C., 1996. - Des essais factoriels aux essais 'conduite de culture'. *In* : Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. Comité Potentialités/DERF/ACTA, Paris, pp. 52-62.
- (50) ROGER-ESTRADE J., 1995. - Modélisation de l'évolution à long terme de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture. Thèse de Doctorat, INA P-G, Paris, 238 pages + annexes.
- (51) ROSSING W.A.H., MEYNARD J.M. et VAN ITTERSUM M.K., 1997. - Model-based explorations to support development of sustainable farming systems case studies from France and the Netherlands. *Eur. J. Agron.*, 7, 271-283.
- (52) SCHOENY A., 1999. - Influence des cinétiques de développement de piétin-échaudage sur la croissance, la nutrition azotée et l'élaboration du rendement du blé tendre d'hiver. Thèse de Doctorat INA P-G, Paris, 146 pages.
- (53) SEBILLOTTE M., 1974. - Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cah. ORSTOM, série Biol.*, 24, 3-25.
- (54) SEBILLOTTE M., 1978. - Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 64, 906-913.
- (55) SEBILLOTTE M., 1987. - Du champ cultivé aux pratiques des agriculteurs. Réflexions sur l'agronomie actuelle. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 73, 69-81.
- (56) SEBILLOTTE M., 1990. - Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *In* : Les systèmes de culture. L. COMBE et D. PICARD (éds.), INRA Editions, Paris, pp. 165-196.
- (57) SEBILLOTTE M., BOIFFIN J., CANEILL J. et MEYNARD J.M., 1978. - Sécheresse et fertilisation du blé d'hiver : essai d'analyse de situations au champ par l'étude des composantes du rendement. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol.*, 3, 197-214.
- (58) SEBILLOTTE M. et SOLER L.G., 1990. - Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et question vives. *In* : Modélisation systémique et systèmes agraires, J. BROSSIER *et al.* (éd.), INRA Editions, Paris, pp. 93-101.
- (59) STOCKLE C.O., MARTIN S.A. et CAMPBELL G.S., 1994. - CropSyst, a cropping systems simulation model : water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.*, 46, 335-359.
- (60) SUPIT I. et WAGNER W., 1999. - Analysis of yield, sowing and flowering dates of barley of field survey results in Spain. *Agric. Syst.*, 59, 107-122.
- (61) TOURDONNET S. de et ROGER-ESTRADE J., 1997. - Prise en compte de l'hétérogénéité du milieu sous abri plastique dans la construction d'un modèle pour la gestion technique d'une culture de laitues. *In* : Modélisation, gestion et aide à la décision dans les systèmes de production sous abri, BAILLE (éd.), INRA Editions, Paris.
- (62) VAN der WERF H., 2001. - Assessing the ecological sustainability of agroecosystems. *Agric. Ecosystems and Environ. (soumis)*.
- (63) VEREIJKEN P., 1997. - A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (IEAFS) in interaction with pilot farms. *Eur. J. Agron.*, 7, 235-250.
- (64) ZANDSTRA H.G., 1979. - Cropping systems research for the Asian rice farmer. *Agric. Syst.*, 4, 135-153.

