

■ REPÈRES

# Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision

---

Eric Malézieux, Guy Trébuil et Marc Jaeger  
*Editeurs scientifiques*



CIRAD

INRA

## LES ÉDITEURS

---

Eric Malézieux est délégué scientifique pour l'agronomie, la gestion de l'environnement et des ressources naturelles, Ager, au sein de la direction scientifique du Cirad.

Docteur en agronomie, ingénieur agronome, il a conduit des recherches sur le fonctionnement des peuplements végétaux en Côte d'Ivoire, puis à l'université d'Hawaii, avant de diriger un programme pluridisciplinaire sur la diversification fruitière, puis de rejoindre la direction scientifique du Cirad.

Guy Trébuil, docteur en agronomie, ingénieur agronome, a consacré près de vingt années de recherche à l'analyse et à l'amélioration des systèmes agraires dans plusieurs pays du Sud-Est asiatique. Après avoir été chargé de mission au sein de la délégation scientifique Ager, il est aujourd'hui en poste à l'International Rice Research Institute, en Thaïlande.

Marc Jaeger, docteur en informatique, spécialisé en imagerie numérique, conduit des recherches sur la simulation de la croissance et de l'architecture des plantes, la représentation des paysages et la modélisation d'entités biologiques. Auparavant délégué scientifique pour les mathématiques et l'informatique appliquées au sein de la direction scientifique du Cirad, il est maintenant en poste en Chine.

## LE CIRAD

---

Le Cirad, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, est un organisme scientifique spécialisé en agriculture des régions tropicales et subtropicales. Il réalise, dans une cinquantaine de pays, des opérations de recherche, de développement agricole et de formation.

# Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision

« Il n'est pas facile de s'orienter dans un ensemble dont les organes relèvent de dimensions différentes. [...] L'instrument manque qui permettrait de discuter synthétiquement une simultanéité à plusieurs dimensions. Malgré ce grave défaut, nous procéderons à un examen détaillé des parties de cet ensemble. Mais autant que possible en gardant devant chaque partie la conscience qu'il s'agit d'une approche partielle, afin de ne pas s'alarmer lorsqu'une nouvelle partie révèle d'autres dimensions, propose une tout autre direction menant dans une région écartée où le souvenir pâissant des dimensions déjà parcourues risque de faire défaut. »  
Paul KLEE, 1924, « De l'art moderne », conférence prononcée à Iéna.

Fan Chi demanda à Confucius de lui enseigner l'agronomie.  
Le Maître dit : « Adressez-vous plutôt à un vieux paysan. »  
Il lui demanda de lui enseigner le jardinage.  
Le Maître dit : « Adressez-vous plutôt à un vieux jardinier. »  
A quoi bon l'agronomie ?  
Maître KONG, 400 av. J.-C., *Les entretiens de Confucius*.



# Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision

Eric Malézieux, Guy Trébuil et Marc Jaeger  
*Editeurs scientifiques*

## REMERCIEMENTS

Cet ouvrage, œuvre collective, est le fruit de nombreuses collaborations. Nous tenons à remercier en premier lieu chacun des auteurs pour sa contribution, ainsi que l'ensemble des relecteurs qui, par leurs critiques et propositions attentives et constructives, ont contribué à sa qualité scientifique. Les éditeurs remercient ainsi personnellement pour leur travail de relecture Michel Benoit-Cattin, Jean-Marc Bousard, Nadine Brisson, Patrick Caron, Jean Dautat, Philippe Debaeke, Marcel de Raïssac, Michaël Dingkuhn, Thierry Doré, Michel Etienne, Bernard Fontaine, Michel Gay, Michel Génard, Sylvie Gourlet-Fleury, Christian Grataloup, Florence Jacquet, Winfried Kurth, Etienne Landais, Christian Langlais, Philippe Lecomte, Florent Maraux, Serge Marlet, Jean-Marc Meynard, Pierre Milleville, François Papy, Xavier Perrier, Nicolas Picard, Vincent Piveteau, Raymond Réau, Paul Robin, Pierre Ruelle, Françoise Ruget, Bernard Seguin, Hervé Sinoquet, Emmanuel Torquebiau, Alain Vidal, Jacques Weber, Jacques Wéry.

Point de départ de cet ouvrage, l'atelier « Le pilotage des agroécosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision » s'est tenu à Montpellier le 31 août 2000. Il a été organisé par les délégations scientifiques Ager, agronomie, gestion de l'environnement et des ressources naturelles, et Mia, mathématiques et informatique appliquées. Le bon déroulement de cet atelier a été permis grâce à la présidence des sessions par Michel Griffon, Jacques Wéry, Alain Capillon, Bernard Seguin, François Papy, Pierre Usselman et Elisabeth de Turckheim. Le rapport des débats a été réalisé grâce à la collaboration de Jean Dautat, Agnès Bégué, Florent Maraux, Hervé Saint Macary, Michel Passouant, Xavier Perrier et Patrick Dugué.

L'organisation de cet atelier, ainsi que l'édition de cet ouvrage, doivent beaucoup à l'implication efficace et continue de Sandrine Renoir, assistante de la délégation Ager, à qui nous exprimons notre reconnaissance. Nous tenons à remercier enfin le service des éditions du Cirad pour le soin porté à la préparation des textes, des figures et des illustrations.

# Sommaire

---

- 9      Préface  
par Michel Griffon, directeur scientifique du Cirad
- 11     Préambule  
par Elisabeth de Turckheim, chef du département Biométrie  
et intelligence artificielle de l'Inra
- 13     Abstract
- Défis et opportunités pour l'aide à la décision
- 17     Modéliser les agroécosystèmes  
Eric Malézieux, Guy Trébuil, Marc Jaeger
- Ecologie, agronomie et aide à la décision
- 37     L'écologie et la gestion durable  
Robert Barbault
- 51     Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation  
François Papy
- 75     La conception des outils d'aide à la décision  
Francis Sévila

## Diagnostiquer et évaluer

- 95 Evaluer le statut azoté du riz irrigué  
Pierre Siband, Chantal Loyce, Christian Witt, Michaël Dingkuhn
- 107 Modèles de culture et diagnostic agronomique régional  
François Affholder, Eric Scopel
- 127 Changements à long terme de la productivité forestière  
Jean-François Dhôte, Jean-Christophe Hervé, François Houllier

## Conduire et piloter un système de culture

- 145 Modèles mathématiques de conduite culturale  
Romain Nosenzo, Philippe de Reffye, Frédéric Blaise,  
François-Xavier Le Dimet
- 173 Quels modèles pour la gestion des vergers ?  
Robert Habib, Françoise Lescourret, Jean-Marie Legay
- 187 Cogito, un modèle pour l'irrigation du maïs  
Frédéric Levraut, Françoise Ruget
- 203 Serriste, un outil pour la gestion climatique des serres  
Marc Tchamitchian, Jacques Lagier, Roger Martin-Clouaire,  
Sébastien Mercier
- 217 Intelligence artificielle et aide à la décision en agriculture  
Eric Jallas, Roger Martin-Clouaire, Ronaldo Antonio Sequeira,  
Pierre Martin, Richard Nowak, Michel Crétenet

## Prendre en compte l'hétérogénéité spatiale

- 243 La prévision agricole à l'échelle du Sahel  
Abdallah Samba, Benoît Sarr, Christian Baron, Eric Gozé,  
Florent Maraux, Benoît Clerget, Michaël Dingkuhn
- 263 L'estimation régionale des productions fourragères  
Françoise Ruget, Richard Delécolle, Christine Le Bas,  
Michel Duru, Nicole Bonneville, Véronique Rabaud,  
Isabelle Donet, Victorine Pérarnaud, Sylvie Paniagua
- 283 Coupler modèle agronomique et système  
d'information géographique  
Danny Lo Seen, Manuel Arreola, Alain Clopes,  
Eric Scopel, Agnès Bégué
- 303 Télédétection, hétérogénéité parcellaire  
et gestion spatialisée des interventions techniques  
Martine Guérif, Frédéric Baret, Sophie Moulin, Agnès Bégué

## Gérer et coordonner

- 329 Un modèle bioéconomique pour l'analyse du risque  
Philippe Bonnal, François Affholder, Damien Jourdain, Eric Scopel
- 351 Intervention et décision collective dans les périmètres irrigués  
Pierre-Yves Le Gal, Erwin de Nys, Michel Passouant,  
Dirk Raes, Thierry Rieu

## Représenter et décider

- 373 Jeux de rôle et simulations multi-agents  
Patrick d'Aquino, Michel Etienne, Olivier Barreteau,  
Christophe Le Page, François Bousquet
- 391 La modélisation graphique, de la recherche au développement  
Muriel Bonin, Pascal Thinon, Jean-Paul Cheylan, Jean-Pierre Deffontaines
- 413 La visualisation des paysages pour l'aménagement agroforestier  
Daniel Auclair, Jean-François Barczi, Frédéric Borne,  
Michel Etienne, René Lecoustre
- 427 L'almanach numérique de planification à Madagascar  
François Baleux, Agnès Bégué, John D. Corbett, Dominique Rollin,  
Guilhem Grellet, Jeffrey W. White
- 441 Adresses des auteurs



## Préface

*Modéliser les agroécosystèmes pour mieux les gérer et aider ceux qui en assurent la gestion à prendre des décisions est l'objet de cet ouvrage, qui rassemble les principales contributions présentées lors des Rencontres du Cirad 2000 à Montpellier.*

*Il faut d'abord relever que l'intitulé de la rencontre, « Le pilotage des agroécosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision », marque une évolution des conceptions.*

*D'une part, l'objet des recherches s'élargit en passant du système de culture à l'écosystème cultivé. On ne s'intéresse donc plus uniquement au système de culture en tant que partie de l'écosystème, mais d'abord à l'écosystème, puis plus précisément à sa partie cultivée. S'engager dans la problématique de la décision agricole par l'écosystème, c'est privilégier l'optique de l'écologie, plutôt que celle de l'agronomie. C'est une évolution marquante. D'abord, le champ d'analyse est plus vaste. Il inclut l'ensemble des fonctions de l'écosystème et ne rejette donc pas comme « externalités » les effets spécifiques des techniques culturales. Mais aussi, y accéder par l'écologie, c'est privilégier les outils d'analyse de cette discipline. C'est donc contribuer à faire se rejoindre écologie et agronomie.*

*D'autre part, le terme de « pilotage » des agroécosystèmes renvoie à l'idée qu'un écosystème est un système complexe dont la conduite n'est pas une chose simple, précisément en raison du caractère systémique des effets des décisions que l'on prend. Piloter un système, c'est d'abord comprendre son fonctionnement, et donc le modéliser, puis le simuler afin d'en tirer des enseignements pour l'action.*

*Pour comprendre les écosystèmes, pour les représenter et simuler leur fonctionnement, la première idée qui vient à l'esprit est d'interroger les écologues, en particulier les spécialistes de l'« écologie écosystémique » quantitative et de la modélisation. Mais la réponse de Robert Barbault, porte-parole de l'écologie comme discipline, a été d'inviter les agronomes à se saisir, tout comme d'autres, du champ de l'écologie, en élargissant leur champ d'investigation du système de culture à l'écosystème et en utilisant leurs méthodes issues de l'agronomie pour travailler sur ce nouveau champ d'investigation. Voilà une autre voie pour faire se rejoindre agronomie et écologie. Cette rencontre entre écologie et agronomie appelle de futures transitions pour aller vers l'ingénierie écologique.*

*Remercions tous les participants, en particulier les nombreux auteurs de l'Inra, ainsi que ceux de l'Ina-Pg, de l'Engref, de l'Ensam, du Cnrs, des universités. Merci aussi à Eric Malézieux, Guy Trébuil et Marc Jaeger d'avoir élaboré cet ouvrage et suivi son long travail d'édition.*

Michel Griffon  
Directeur scientifique du Cirad



## Préambule

*L'ambition des agronomes d'élargir le périmètre de l'analyse des systèmes de production agricoles pour prendre en compte les interactions avec de nombreux facteurs d'un environnement naturel, social et économique, et dans une durée qui dépasse celle des campagnes de production, leur impose de renouveler leurs outils méthodologiques et leurs collaborations disciplinaires. Agronomes et écologues, dont les objectifs de recherche se rapprochent, ont besoin de partager des représentations à priori différentes, d'intégrer des connaissances de nature variée, de les organiser en décrivant les interactions des phénomènes observés et décrits à des échelles différentes. Les objectifs d'aide à la décision renforcent ce besoin de partager des connaissances formalisées avec les experts et les utilisateurs en situation de décision.*

*La gamme des modèles disponibles est très riche. Des géographes aux informaticiens, différentes communautés de spécialistes développent des concepts de base et des techniques pour construire des représentations globales afin de les rendre opérationnelles pour le diagnostic, le pilotage ou le contrôle de systèmes, voire pour l'aide à la décision stratégique. Grâce aux techniques et outils informatiques, de plus en plus perfectionnés et puissants, les objectifs des activités de modélisation deviennent de plus en plus ambitieux. Les agronomes peuvent choisir des représentations numériques ou symboliques, en représentant l'incertitude et la variabilité de différentes manières, avec des modèles probabilistes ou avec des modèles déterministes dont on étudie, par exemple, le comportement face à des contraintes de type intervalles ou la robustesse aux spécifications. Des modèles globaux sont construits à partir de la définition de propriétés locales, non seulement pour le temps, mais aussi pour les composants du système (modèles distribués, automates...).*

*Pour les agronomes, il s'agit de s'approprier ces méthodes et ces outils de modélisation. Il faut pouvoir les utiliser, les tester, les combiner, les faire évoluer. Au-delà de la connaissance technique sur les modèles, la science du modélisateur est de choisir l'outil adapté parmi les outils dont il dispose en fonction de la nature des connaissances disponibles, mais aussi et surtout en fonction de l'objectif qu'il assigne à son modèle. De leur côté, les chercheurs en informatique ou en mathématiques bénéficient de nouveaux domaines d'application pour valider leurs méthodes, et aussi de nouveaux questionnements. Les nombreuses pistes explorées dans cet ouvrage pourront inciter nos collègues des universités, du Cnrs et de l'Inria, notamment, à travailler sur les enjeux agroenvironnementaux. Par ailleurs, les collaborations entre chercheurs du Cirad et de l'Inra sur des projets associant une démarche de modélisation à la recherche de solutions sur le terrain contribuent à enrichir les échanges entre disciplines mathématiques et informatiques et sciences agronomiques autour de cette exigence renouvelée de modèles pour l'action.*

Elisabeth de Turckheim  
Chef du département Biométrie  
et intelligence artificielle de l'Inra



## Abstract

Faced with new challenges, agronomy is moving towards an increasingly holistic view of the ecosystem. Beyond establishing the scientific basis of the functioning of agroecosystems, at various levels of organisation, agronomists should also contribute to the development of new approaches, methods and tools to support stakeholders with varied, complementary and sometimes divergent objectives, to achieve an integrated and sustainable management of all the resources of the environment. These methods and tools must incorporate recent advances in agricultural and social sciences, by making use of formal disciplines, such as mathematics, and the tremendous innovations in computer science and information technology. Different approaches to modelling will play a central role in the development of new methods and tools for managing increasingly complex systems.

This book presents a broad range of methodological tools developed recently for this purpose. Diagnosis and evaluation, guidance and management, management of spatial heterogeneity, coordination, representation, etc., are all potential approaches to assist stakeholders in making decisions. These viewpoints, illustrating the multiple aspects of decision support and leading to as many different ways of designing, developing and implementing models, form the framework for the different chapters of this volume. The diversity of hierarchical levels in agroecosystems (from plant populations to cropping systems and farm holdings to regional areas) is also addressed. Different types and extents of interdisciplinarity are involved, encompassing biophysical and management sciences, and ultimately incorporating agroecological and socioeconomic dynamics.

This book is intended for researchers, teachers and students in agricultural science. Various situations and experiences in both temperate and tropical environments are used to identify the potential role of modelling as a decision support tool in the integrated management of agroecosystems.



Défis et opportunités  
pour l'aide  
à la décision

---



# Modéliser les agroécosystèmes

---

Eric Malézieux, Guy Trébuil, Marc Jaeger

## Ecologie, agronomie et aide à la décision

Objets complexes, les différents écosystèmes qui composent la biosphère obligent le chercheur qui veut appréhender leur dynamique à adopter un état d'esprit respectant, par construction, leur complexité intrinsèque. Cette « obligation méthodologique » (LEGAY, 1999) repose dans une large mesure sur de nouvelles pratiques de recherche, fondées sur la mobilisation de disciplines distinctes mais complémentaires et aboutissant à une véritable démarche interdisciplinaire (JOLLIVET, 1992 ; MORIN, 1999). Comme le souligne Robert Barbault dans cet ouvrage, dans une biosphère aujourd'hui dominée par l'homme, le rapprochement entre sciences de la nature et sciences de l'homme apparaît incontournable pour appréhender les enjeux posés par le développement durable. L'écologie et l'agronomie vivent aujourd'hui toutes deux, pour des raisons différentes, des sortes de crises en partie liées aux nouveaux défis qu'elles doivent relever (DELÉAGE, 1992 ; SEBILLOTTE, 1993).

Si l'écologie a forgé le concept d'écosystème, l'agronomie a pour objet d'étude privilégié le champ cultivé. Elle produit et assemble les connaissances nécessaires à la compréhension de son fonctionnement, tout en tenant compte des contraintes posées par sa conduite (SEBILLOTTE, 1974, 1987 ; GRAS *et al.*, 1989 ; MALÉZIEUX et TRÉBUIL, 2000). Aujourd'hui, l'agronomie évolue vers une prise en compte plus globale de l'agroécosystème et de ses différentes

fonctions pour aider les acteurs à gérer de manière intégrée et durable l'ensemble des ressources du milieu. Or les objectifs se diversifient, se complètent, et parfois divergent, selon les acteurs considérés. Par ailleurs, la frontière entre écosystèmes naturels et écosystèmes cultivés s'estompe, contribuant à rapprocher les concepts utilisés en écologie et en agronomie. C'est cette évolution, qui est à même de modifier profondément et durablement nos démarches de recherche, que l'on trouve à l'origine de cet ouvrage. Dans ce débat, le parti pris — volontairement réducteur — de l'aide à la décision pose la question concrète du type de décision envisagé, ainsi que celle, qui lui est liée, de l'échelle de l'action, dans sa double composante spatiale et temporelle.

Comprendre le fonctionnement des agroécosystèmes, sur des bases scientifiques, a longtemps nécessité, et nécessite encore dans certains cas, d'adopter une démarche réductionniste et d'analyser le fonctionnement de sous-systèmes, comme le sol, la plante ou le peuplement végétal, de privilégier l'analyse des flux, de carbone, de minéraux, d'eau, entre les différents compartiments du système. Les liens nécessaires sont alors tissés entre l'agronomie et les disciplines de la physiologie, de la bioclimatologie, des sciences du sol, ou d'autres sciences physiques ou biologiques pour acquérir de nouvelles connaissances. Comprendre le fonctionnement de ces différents systèmes signifie en particulier quantifier, à partir d'hypothèses à établir, les flux qui les composent. Pour ce faire, le recours aux principes et aux techniques de la modélisation mathématique s'est peu à peu imposé, permis et soutenu en grande partie par les considérables progrès des outils informatiques durant ces vingt dernières années.

Au-delà de la compréhension du fonctionnement biophysique des agroécosystèmes, et des aspects cognitifs qui lui sont liés, l'agronomie se veut une science de l'action, mobilisant des connaissances acquises pour établir les bases d'une agriculture durable, selon une démarche similaire à celle de la zootechnie et en convergence avec elle (LANDAIS et BONNEMAIRE, 1996). Cela implique, par-delà les aspects physiques, biologiques, écologiques, de prendre aussi en compte, simultanément, les aspects économiques, sociaux et politiques des systèmes analysés. Pour pouvoir adopter ce nouveau paradigme, de nouveaux concepts et outils doivent être élaborés. La construction d'outils destinés à conduire de manière durable les agroécosystèmes existants et à concevoir les agroécosystèmes de demain nécessite l'intégration des avancées scientifiques de domaines différents. Ces disciplines, qui relèvent à la fois des domaines biologiques, physiques et humains, doivent être confortées par les sciences formelles telles que les mathématiques, l'informatique, et par les progrès des technologies de l'information. Cette intégration, de nature complexe, permet alors d'aborder le domaine de l'aide à la décision des acteurs de façon à gérer les agroécosystèmes selon les critères que les acteurs se sont donnés. La démarche de modélisation — encore qu'il faille préciser ses différentes formes — occupe un rôle central dans l'élaboration de ces nouveaux outils d'aide à la décision.