

La modélisation de systèmes complexes appliquée en arboriculture

F. LESCOURRET

INRA
Centre de Clermont-Ferrand-
Theix
Laboratoire d'écopathologie
63122 Saint-Genès
Champanelle
France

R. HABIB

INRA
Centre d'Avignon
U. R. écophysologie
et horticulture
84134 Montfavet cedex
France

La modélisation de systèmes complexes appliquée en arboriculture.

RÉSUMÉ

Le document présente quelques éléments fondamentaux à prendre en compte dans une démarche de modélisation de systèmes complexes. Les points forts de l'approche système (description d'un système, propriétés émergentes) sont rappelés pour les aspects conceptuels avec quelques options de fond qui permettent de déterminer la nature du modèle. L'utilisation d'une méthode d'analyse et de conception de système d'information est préconisée pour les aspects méthodologiques. La présentation des points forts d'une méthode orientée objets est illustrée par des exemples relatifs à l'arboriculture.

Design Features for Modelling Complex Systems. Orchard Management Applications.

ABSTRACT

A few fundamental design features for modelling complex systems are reviewed. For conceptual features, systems thinking is emphasized with reference to system description and emergent properties. Fundamental choices which direct modelling are also discussed. For building features, the advantages of information system design methods are underlined. The main features of an object-oriented method are presented and illustrated through orchard management examples.

La modelización de sistemas complejos aplicados a la arboricultura.

RESUMEN

El documento presenta algunos elementos fundamentales a tomar en cuenta para la modelización de sistemas complejos. Los puntos fuertes del sistema (descripción de un sistema, propiedades emergentes) son enunciados mediante aspectos conceptuales con algunas opciones de fondo que permiten determinar la naturaleza del modelo. La utilización de un método de análisis y la concepción de un sistema de información es recomendado para los aspectos metodológicos. La presentación de los puntos más importantes de un método con objetivos orientados es ilustrado mediante un ejemplo relativo a la arboricultura.

Fruits, vol. 49, n°2, p. 121-131

MOTS CLÉS

Culture fruitière, modèle, analyse de système, conception.

KEYWORDS

Fruit growing, models, systems analysis, design.

PALABRAS CLAVES

Fruticultura, modelos, análisis de sistemas, diseño.

•••• introduction

Le terme de système renvoie à un courant de pensée très présent dans les sciences agronomiques, notamment dans l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. L'approche système, en rupture avec la démarche qui consiste à séparer un système en ses parties pour les analyser indépendamment, privilégie les interrelations existant entre composants d'un système. Elle utilise le modèle comme outil principal d'étude (BAWDEN *et al.*, 1984), comme le démontre la teneur méthodologique de presque tous les articles du journal spécialisé *Agricultural Systems*. Les perspectives de recherche actuelles en arboriculture sur la mise au point, en réponse à la demande sociale, de programmes d'interventions techniques permettant une meilleure maîtrise de l'élaboration du rendement (quantité et qualité), et les réflexions concomitantes sur l'intérêt cognitif et appliqué de la modélisation de systèmes complexes (SORENSEN et KRISTENSEN, 1992), nous amènent à réfléchir sur la démarche appropriée pour une telle modélisation en arboriculture.

Dans cet article, qui ne peut être exhaustif compte tenu de l'ampleur du sujet, quelques aspects conceptuels importants de cette démarche sont évoqués. Ils sont relatifs à l'approche système et à la nature des modèles orientée par l'objectif de la modélisation. Ces aspects ont été largement traités dans une littérature abondante appliquée à la modélisation de systèmes (DALTON, 1975 ; DENT et BLACKIE, 1979). Nous évoquons aussi certains aspects méthodologiques de la démarche concernant la façon de bâtir un modèle pour l'amener jusqu'à une version informatisée qui, en revanche, a été moins souvent abordé.

•••• aspects conceptuels

approche système

L'approche système a fait l'objet de nombreux développements théoriques à partir d'idées fondatrices émises dans les

années 30 (VON BERTALANFFY, 1973) et de synthèses appliquées au domaine agronomique (ROUNTREE, 1977). Elle propose une méthode de description du système qui renvoie à la construction du modèle qui le représente.

Un premier aspect important est la fixation d'une frontière au système étudié. Celle-ci est fonction d'objectifs et de priorités choisis. Ainsi, dans le modèle d'élaboration du rendement chez le kiwi de DOYLE *et al.* (1989), le système est implicitement limité aux parties aériennes du kiwi dans un verger.

Un second aspect concerne l'identification de sous-systèmes qui renvoient à autant de sous-modèles. Dans l'application précédemment citée, les sous-systèmes sont les composantes du rendement (figure 1).

Enfin, un point crucial consiste en la formalisation mathématique des interrelations existant entre les sous-systèmes (entre sous-modèles), qui s'expriment généralement dans la dynamique du système.

Un exemple de lien simple où la sortie d'un sous-modèle correspond à l'entrée d'un autre est fourni à la figure 1 : la variable L qui représente la longueur des cannes / ha est le produit du sous-modèle "formation des cannes" et constitue l'entrée du sous-modèle "formation des sarments". Celui-ci calcule les variables b (nombre moyen de bourgeons / unité de longueur) et p (probabilité qu'un bourgeon devienne un sarment) ; il donne en sortie la valeur S ($S = L \cdot b \cdot p$) qui représente le nombre de sarments / ha.

Des liens plus complexes existent. La rétroaction, qui est un schéma stimulus-réponse en boucle, en est une illustration : elle peut être positive (par exemple la photosynthèse produit les assimilats nécessaires à la croissance ; il s'ensuit une augmentation de la surface foliaire qui, en retour, agit positivement sur la photosynthèse), ou négative (le taux d'infection des feuilles par un parasite fongique diminue lorsque le taux de tissu infecté augmente, DENT et BLACKIE, 1979). Le schéma de rétroaction permet, quoique de manière non exclusive, l'autorégulation des systèmes (VON BERTALANFFY,

1973) dont il est ainsi une caractéristique fondamentale.

Les liens hiérarchiques (agrégation des arbres dans un verger selon un gradient pédoclimatique, par exemple) sont d'autres liens complexes. Leur formalisation est parfois délicate (PENNING DE VRIES et VAN LAAR, 1982).

Le faisceau des interrelations précédemment évoquées conduit à ce qu'on appelle les propriétés émergentes du système, qui décident de son comportement. L'étude du comportement du système passe par l'étude de celui du modèle qui le représente. On peut reconnaître cinq propriétés émergentes des agroécosystèmes d'après CONWAY (1987) et MARTEN (1988). Elles s'expriment dans le temps :

- la première est la productivité ; c'est la quantité de produit fournie par un agroécosystème par unité de ressource entrante (sol, travail, capital) ; les modèles d'élaboration du rendement en arboriculture prennent en compte cette propriété ; en nous basant sur le caractère multidimensionnel de la productivité (MARTEN, 1988), nous pouvons avancer que le produit est également exprimable en unités de qualité (produits par classes de calibre, taux de sucres) ;

- la seconde propriété est la stabilité ; elle est relative à la variation de la productivité dans le temps autour d'une tendance ; les phénomènes d'alternance en production fruitière sont concernés par cette propriété ;

- la troisième propriété est la soutenabilité ; elle recouvre à la fois la tendance à long terme de la productivité, et la réaction du système face à une grave perturbation ; les modèles en arboriculture qui s'intéressent à l'effet du réchauffement climatique (ATKINS et MORGAN, 1990) ou à celui d'une invasion de ravageurs (BLAISE et GESSLER, 1990) s'y réfèrent ;

- l'équitabilité recouvre la notion de partage de la productivité dans une communauté et concerne donc plutôt des échelles de perception comme la région agricole ;

- enfin l'autonomie est liée de façon négative au degré d'intégration de l'agroécosystème qui se mesure en termes de

flux de matière, d'énergie et d'information à l'intérieur du système et entre le système et son environnement ; un système autonome est peu intégré (MARTEN, 1988).

choix fondamentaux

Certains choix fondamentaux orientent la nature du modèle. Ces aspects, par ailleurs bien traités dans tous les ouvrages de modélisation, ne seront que sommairement présentés.

Certains de ces choix sont relatifs à des objectifs de construction. Ainsi, les modèles mécanistes, au sens où ils fondent la compréhension de phénomènes au niveau "i" de la hiérarchie d'un système sur des processus aux niveaux inférieurs, répondent à des objectifs de connaissance. En revanche, les modèles empiriques, qui décrivent *a contrario* des comportements de niveau "i" en termes d'attributs du même niveau, répondent plutôt à des objectifs de prédiction (THORNLEY et JOHNSON, 1990). Cela doit toutefois être considéré en tenant compte du principe de hiérarchisation des systèmes, qui renvoie à celui d'agrégation de sous-modèles dans un modèle global. C'est dans l'architecture d'un modèle "système" composé de sous-modèles empiriques qu'on peut trouver ses aspects mécanistes (cf. *supra*).

Les modèles déterministes ne prennent pas en compte les éléments d'incertitude de la perception d'un système (l'inexpliqué ou l'inexplicable), au contraire des modèles stochastiques (DENT et BLACKIE, 1979). Quelques modèles stochastiques ont été développés dans des sciences agronomiques comme la zootechnie (modèles de simulation du troupeau laitier et de ses produits : DIJKHUIZEN *et al.*, 1986 ; SORENSEN *et al.*, 1992) mais à notre connaissance ils sont peu courants en arboriculture.

D'autres choix sont relatifs à des objectifs d'utilisation. Dans le contexte de l'aide à la décision, en particulier, des types de modèles très différents peuvent être construits selon le degré de structuration des aspects décisionnels en jeu.

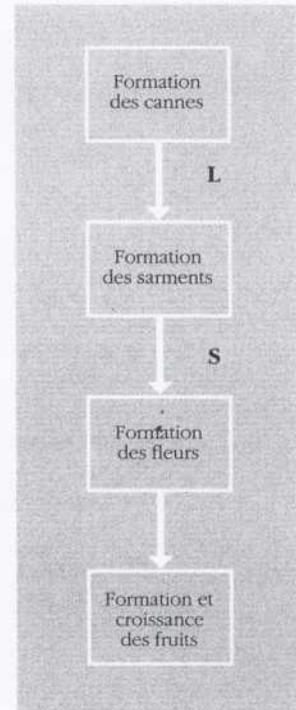


Figure 1
Trame d'un modèle d'élaboration du rendement chez le kiwi, d'après DOYLE *et al.* (1989) : sous-modèles (boîtes), interrelations (flèches).

$$S = L + b \cdot p.$$

S = nombre de sarments / ha.
L = longueur des cannes / ha.
b = nombre moyen de bourgeons / unité de longueur.
p = probabilité qu'un bourgeon devienne un sarment.

Ainsi, l'analyse de décision (NGATEGIZE *et al.*, 1986) considère comme sorties d'un système une série d'"états de la nature" (états d'infection dans un troupeau, si l'on prend comme exemple le domaine de la pathologie animale où l'on trouve des applications de la méthode) résultant d'actions alternatives qui correspondent à des décisions. A chaque état sont associées d'une part une probabilité, et d'autre part une valeur (en unités monétaires par exemple). Ce type d'analyse tient compte, par la distribution de probabilité pour la série d'états correspondant à chaque décision, de l'incertitude associée à une décision.

A l'opposé, les techniques de programmation mathématique (programmation linéaire et dérivés) sont adaptées à des situations sans ambiguïté où l'on est en droit de supposer qu'il existe une solution optimale au problème. Ces techniques s'intéressent en effet à optimiser une fonction objectif (par exemple une fonction de coût de deux fertilisants) en fonction de contraintes (seuil critique admis pour l'apport de chaque élément minéral en jeu, temps, etc. ; FRANCE et THORNLEY, 1984).

Entre ces deux extrêmes, il y a la simulation. Bien qu'à strictement parler ce terme recouvre, entre autres, l'application de modèles basés sur la programmation mathématique (DENT et BLACKIE, 1979), dans la pratique il désigne des modèles de forme beaucoup plus libre. Ceux-ci ne bénéficient ni d'axiomatics établies ni d'algorithmes généraux, et leur mise en œuvre ne permet pas de trouver une solution optimale mais seulement une solution jugée satisfaisante par l'utilisateur (ATTONATY *et al.*, 1990). Par souci de simplicité et en accord avec SORENSEN et ENEVOLDSEN (1992), nous pouvons appeler modèles de simulation les modèles qui "imitent" le fonctionnement d'un système biologique. Un usage courant de la simulation consiste à prévoir le comportement du système en fonction de différents *scenarii* (BENNETT, 1992) qui peuvent correspondre, en matière d'arboriculture, à différents modes de conduite du verger. Le modèle de DOYLE *et al.* (1989) est construit et utilisé dans ce sens.

Lorsque ce sont les aspects techniques du fonctionnement du système agricole qui sont étudiés, il est clair que l'objet de la simulation doit être la sphère biotechnique, ou encore le "sous-système opérant" selon la terminologie de LE MOIGNE (1984) adaptée à l'exploitation agricole par LANDAIS et DEFFONTAINES (1988). Cette dernière est constituée de l'ensemble des phénomènes biologiques qui interviennent dans l'élaboration des performances (agronomiques ou zootechniques), modulées par les interventions techniques des agriculteurs. Il en va différemment si le simulateur est destiné à être un véritable instrument d'aide à la décision. Dans ce domaine, et spécialement en France, les choses évoluent vers une prise en compte affirmée du processus de décision ("sous-système de décision") qui est susceptible d'améliorer à la fois l'efficacité de l'aide au décideur et la compréhension du fonctionnement du système (ATTONATY et CHATELIN, 1989). Les pratiques des agriculteurs constituent l'intersection entre la sphère biotechnique et la sphère décisionnelle (LANDAIS et DEFFONTAINES, 1988). Dans ce contexte, le processus de décision fait l'objet de travaux portant sur sa représentation en termes de "modèle général" (CERF et SÉBILLOTTE, 1988 ; DURU *et al.*, 1988), ou sur sa représentation symbolique (RELLIER et MARCAILLOU, 1990). La complétude d'un système d'aide à la décision paraît pouvoir être assurée par le couplage d'un modèle de décision issu de ces travaux et d'un modèle biotechnique, comme dans un projet de simulateur de gestion de la sole fauchée, en cours de réalisation (GIBON *et al.*, 1989 ; GIRARD *et al.*, à paraître).

●●●● aspects méthodologiques

nécessité d'une méthode d'analyse et de conception

Il existe dans la littérature un relatif consensus sur le découpage en phases d'un projet de modélisation. La figure 2 présente un tel découpage inspiré de

RABBINGE *et al.* (1989) et qui s'inscrit en fait dans un cadre très général. Cependant, les parties de ce découpage qui concernent la représentation du modèle, de l'établissement de la liste des types de données et des relations en jeu à la définition d'un algorithme complet qui est la représentation informatique du modèle et le moyen de l'animer, sont généralement très peu détaillées (encadré sur la figure 2). Nous parlons bien ici de la "représentation du modèle" et non de la quantification des relations par des outils mathématiques, au sujet de laquelle la littérature est prolifique (FRANCE et THORNLEY, 1984). Ces lacunes traduisent, à notre sens, le besoin d'une méthode d'analyse et de conception pour le développement des modèles. Ce besoin n'est du reste pas spécifique au domaine des sciences agronomiques (AKKERMANS et VAN DIJKUM, 1990). Pour garantir la portabilité et les possibilités de communication (partage de solutions conceptuelles, échanges méthodologiques passant outre aux frontières des disciplines), la méthode recherchée doit être indépendante d'une part du langage de programmation ou du logiciel utilisés et d'autre part du type de modèle.

méthodes disponibles

Les méthodes disponibles sont les méthodes d'analyse et de conception de système d'information, ce dernier terme étant entendu ici comme l'image informationnelle d'un système réel. Ces méthodes viennent du champ de l'informatique ; si elles sont largement entrées dans les domaines industriels et de la gestion d'entreprise, leur application à la recherche agronomique semble rare ou, en tout cas, peu explicite (voir toutefois LESCOURET *et al.* (1992) pour une application à des recherches de type exploratoire). Le bilan critique fait par BOUZEGHOUB (1993) les classe en trois générations.

Les méthodes de la première génération (SADT, JACKSON, etc., années 70) ne s'intéressent qu'aux fonctions d'un système qu'elles abordent de manière cartésienne : les fonctions sont décomposées en sous-fonctions de manière hié-

Formulation de la perception du système

- en fonction d'objectifs
- en fonction de limites

Liste des types de données en jeu

Liste des relations en jeu

+ quantification

Développement du modèle

(définition de l'algorithme)

Vérification

(test du comportement)

Validation

Optimisation

(simplification)

Utilisation

chique. Ainsi en arboriculture, il pourrait s'agir de la fonction "production de fruits par un verger" qui serait décomposée en sous-fonctions "photosynthèse", "croissance", etc. Cette approche est appelée fonctionnelle hiérarchique. Dans un contexte de recherche, le problème réside dans le fait que la perception des fonctions d'un système est susceptible d'évoluer en permanence. Cette approche fonctionnelle hiérarchique est alors mal adaptée.

La structure d'un système (par exemple, dans le cas du verger, les composantes comme l'arbre, ses différents organes, etc., et leur organisation) est naturellement moins volatile que ses fonctions, ou plutôt la représentation qu'on s'en fait. En écho, les méthodes systémiques de deuxième génération (MERISE, AXIAL, etc., années 80) proposent une approche conjointe des aspects structurels ou statiques (types de données telles que arbre, feuille, fruit, etc.) et dynamiques (évolution, fonctions telles que croissance de l'arbre, respiration, croissance des fruits, etc.) d'un système. La méthode de deuxième génération la plus utilisée en France est MERISE (TARDIEU *et al.*, 1983). Malgré son succès, BOUZEGHOUB (1993) a mis en évidence :

– son manque de prise en compte de la cohérence entre les aspects statique et dynamique (pas de lien formel entre la représentation des données qui décrivent le verger, et celle de ses fonctions),

Figure 2
Découpage en phases d'un projet de modélisation.

– son relatif échec, pour les aspects dynamiques, du passage d'une représentation conceptuelle (diagramme des fonctions) à une représentation "physique" (code informatique).

Les méthodes d'analyse et de conception "orientées objets" de la troisième génération (OOA, OOD, etc., années 90) pallient ces inconvénients. La notion d'objet sur laquelle elles sont fondées correspond en effet à la réunion, dans une même entité, d'attributs (propriétés) et d'opérations (fonction ou transformation applicable à un objet ou par un objet, qui modifie la valeur d'un ou plusieurs attributs). Un objet "fruit" contiendrait par exemple, entre autres, la propriété "poids" et l'opération "croissance". Cette méthode met donc en cohérence, par définition, les aspects statique et dynamique précédemment évoqués. D'autres avantages particuliers de l'objet peuvent être soulignés :

- sa souplesse pour la description d'un système réel,
- les concepts qui lui sont liés, notamment l'héritage des opérations d'objets parents, pour la construction de logiciels (MEYER, 1990). Ainsi, un objet "fruit" pourrait hériter des opérations "respiration" et "croissance" d'un objet parent "organe".

Les objets font également leur apparition dans le domaine de l'intelligence artificielle, où ils participent aux modes de représentation des connaissances, seuls ou dans des systèmes hybrides utilisant aussi les schémas à base de règles (SI conditions, ALORS actions ; RECHENMANN, 1993). Ainsi OTELO (organisation du travail en langage-objet ; ATTONATY *et al.*, 1990) est un simulateur d'organisation du travail dans les exploitations de grandes cultures, qui utilise les objets ; la maquette actuelle d'ANSYL, le simulateur de gestion de la sole fauchée évoqué précédemment, est un système à base de connaissances orientée objets (GIRARD *et al.*, à paraître).

applications d'une méthode orientée objets

Plusieurs méthodes de conception orientées objets sont aujourd'hui disponibles. Ainsi SEQUEIRA *et al.* (1991) ont utilisé

OOD (Object Oriented Design ; BOOCH, 1991), pour représenter un modèle de simulation de la croissance du cotonnier vue comme un ensemble de processus comprenant l'organogénèse, la croissance des différents organes et de la plante entière, et les interactions entre organes. Sept méthodes, dont OOD qui peut être considéré comme un précurseur, ont fait l'objet d'une analyse critique par BOUZEGHOUB (1993). Cela nous a permis de choisir une méthode particulièrement accessible et complète pour démontrer l'intérêt de la démarche : il s'agit de OMT (Object Modelling Technique) conçu par les services de recherche de General Electric (RUMBAUGH *et al.*, 1991). Quelques points forts de cette dernière méthode peuvent être illustrés à l'aide d'exemples tirés du domaine de l'arboriculture, qui ne visent cependant en aucun cas la complétude ou la justesse des représentations.

OMT aborde le système étudié selon trois aspects fondamentaux, l'aspect statique, l'aspect dynamique et l'aspect fonctionnel, pour lesquels la méthode propose des modes de représentation spécifiques.

Dans la représentation statique, entités et associations du système sont définies sous forme d'objets pour les premières et éventuellement pour les secondes ; en outre, des liens d'agrégation (un objet est composé de plusieurs objets) ou de généralisation (un objet est un "cas particulier" d'un autre objet) sont établis entre les objets. La figure 3 présente un exemple grossier de modèle statique du verger. Elle présente :

- des objets aussi différents que le verger (entité) ou le mode de conduite (association),
- des liens d'agrégation entre l'arbre et ses divers composants,
- des liens de généralisation entre un rameau et une "branche", comprise ici comme un terme générique.

Cette figure est implicitement dédiée à un modèle biotechnique de fonctionnement du verger ; les objets "arboriculteur" et "mode de conduite" sont censés y représenter des choses beaucoup plus simples (par exemple des choix initiaux de gestion) que si on s'était préoccupé des aspects décisionnels. Pour ceux-ci,

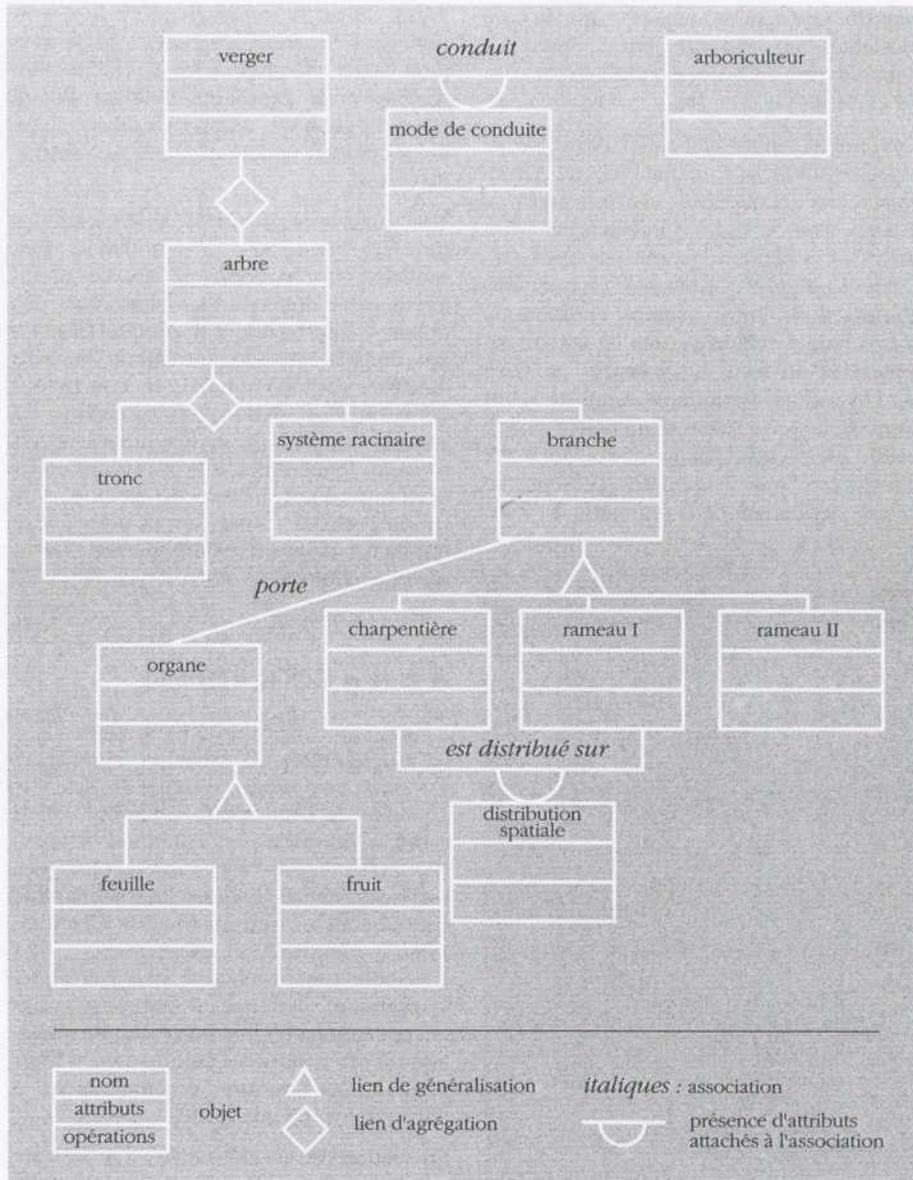


Figure 3
Modèle statique du verger
(méthode OMT).

méthodes et langages à objets peuvent être utilisés (cf. *supra*), mais il paraît nécessaire de séparer la représentation des connaissances (règles de décision en matière de conduite par exemple) du mécanisme de leur utilisation (qui est dédié au moteur d'inférence dans les systèmes-experts largement utilisés en aide à la décision) pour mieux les appréhender ou les modifier.

Dans la représentation dynamique, on décrit l'évolution des objets en termes d'états et d'événements. L'état d'un objet est sa valeur à un instant donné.

Le terme d'évolution renvoie tout d'abord à l'évolution "intra", ou cycle de vie des objets, qu'on appelle couramment "diagramme d'états". Ce dernier représente l'ensemble des états d'un objet avec les événements et les actions ou activités

de leur modèle de simulation du cotonnier la simplification de la traduction des concepts en code par l'approche objets. D'après ces auteurs, cette approche permet au modélisateur de se dégager des détails et de la complexité des algorithmes de programmation. A partir du même modèle, SEQUEIRA *et al.* (1993) défendent l'idée que l'approche objet facilite l'explicitation d'une modélisation dont la base est l'individu, et où la notion de population émerge (au sens des propriétés émergentes du système) de l'interaction entre les individus, et de leur variabilité causée par des mécanismes structuraux. Enfin, ces mêmes auteurs n'hésitent pas à placer l'approche objet au rang de paradigme, en soulignant qu'elle apporte de nouveaux éclairages pour le fondement conceptuel des modèles de simulation aussi bien que pour la programmation de ces modèles. ●

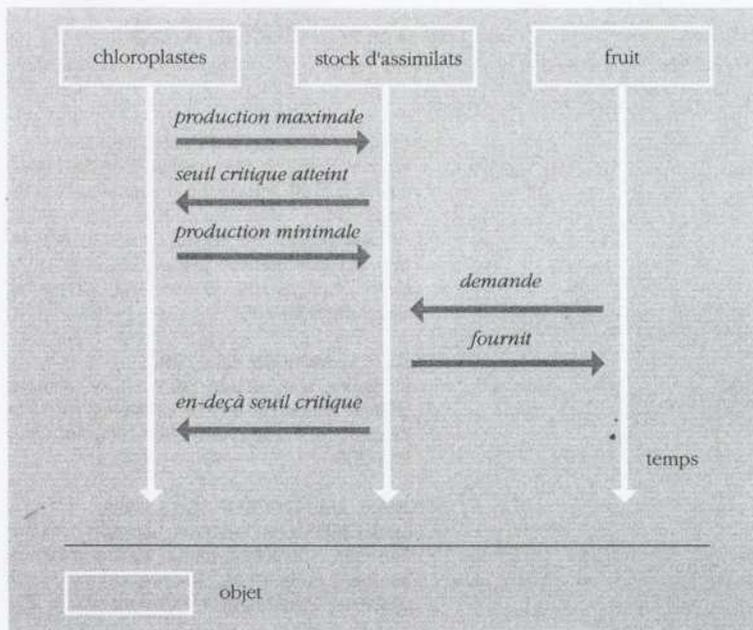


Figure 5
Modèle dynamique : scénario d'interactions entre composants d'une feuille et fruit (méthode OMT).

remerciements

Cette réflexion a bénéficié de stimulantes discussions "autour de l'objet" avec Laurent PÉROCHON.

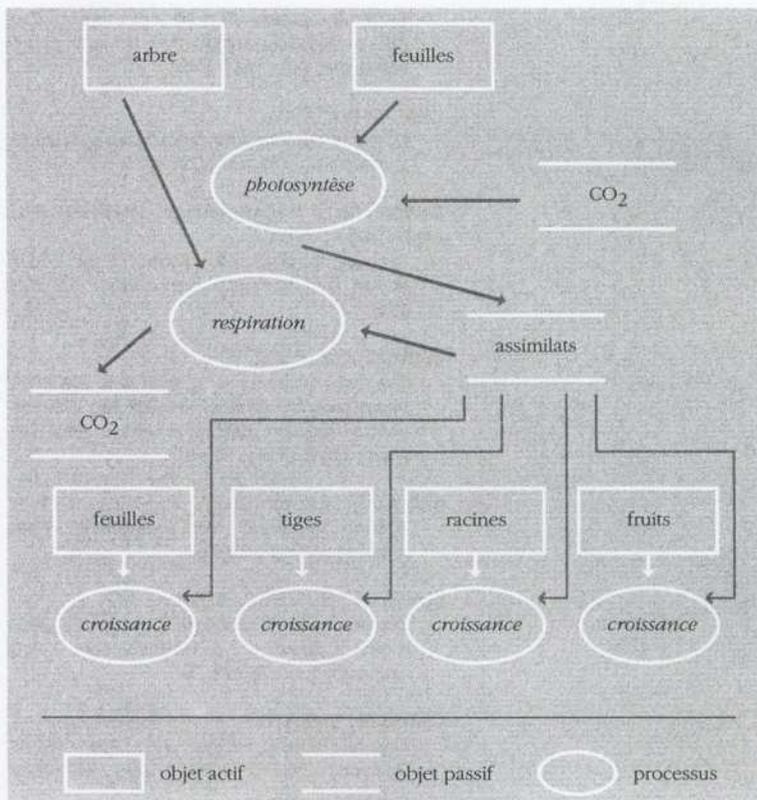


Figure 6
Modèle fonctionnel de la croissance de l'arbre (méthode OMT).

- LE MOIGNE J.L., 1984.
La théorie du système général. Théorie de la modélisation. Paris (France) : PUF, 320 p.
- LESCOURRET F., PEROCHON L., COULON J.B., FAYE B., LANDAIS E., 1992.
Modelling an information system using the MERISE method for agricultural research: the example of a database for a study on performances in dairy cows. *Agric. Syst.*, 38, 149-173.
- MARTEN G.G., 1988.
Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agric. Syst.*, 26, 291-316.
- MEYER B., 1990.
Conception et programmation par objets. Pour du logiciel de qualité. Paris (France) : InterEditions, 622 p.
- NGATEGIZE P.N., KANEENE J.B., HARSH S.B., BARTLETT P.C., MATHER E.L., 1986.
Decision analysis in animal health programs: merits and limitations. *Prev. Vet. Med.*, 4, 187-197.
- PENNING DE VRIES F.W.T., LAAR H.H. van, 1982.
Simulation of plant growth and crop production. Wageningen (Pays-Bas): Pudoc, 308 p.
- RABBINGE R., WARD S.A., LAAR H.H. van, 1989.
Simulation and systems management in crop protection. Wageningen (Pays-Bas): Pudoc, 420 p.
- RECHENMANN F., 1993.
Objets et représentation des connaissances. In: *Autour de l'objet : actes de l'école d'été 1993*, 255 p. ENSAM-INA-INRA: tome 2, 229-255.
- RELLIER J.P., MARCAILLOU J.C., 1990.
Modèles de raisonnement en conduite de culture et conséquences pour les systèmes d'aide à la décision. *Agronomie*, 6, 487-498.
- ROUNTREE J.H., 1977.
Systems thinking - some fundamental aspects. *Agric. Syst.*, 2, 247-254.
- RUMBAUGH J., BLAHA M., PREMIERLANI W., EDDY F., LORENSEN W., 1991.
Object-oriented modeling and design. Englewood Cliffs, New Jersey (USA): Prentice-Hall International, 500 p.
- SEQUEIRA R.A., SHARPE P.J.H., STONE N.D., EL-ZIK K.M., MAKELA M.E., 1991.
Object-oriented simulation: plant growth and discrete organ to organ interactions. *Ecol. Modelling*, 58, 55-89.
- SEQUEIRA R.A., STONE N.D., MAKELA M.E., EL-ZIK K.M., SHARPE P.J.H., 1993.
Generation of mechanistic variability in a process-based object-oriented plant model. *Ecol. Modelling*, 67, 285-306.
- SORENSEN J.T., ENEVOLDSEN C., 1992.
Modelling the dynamics of the health-production complex in livestock herds: a review. *Prev. Vet. Med.*, 13, 287-297.
- SORENSEN J.T., KRISTENSEN E.S., 1992.
Systemic modelling: a research methodology in livestock farming. In: *Agriculture, programme de recherche Agrimed - Approche globale des systèmes d'élevage et étude de leurs niveaux d'organisation : concepts, méthodes et résultats*, 510 p. Bruxelles (Belgique) : A. Gibon et G. Matheron, CECA-CEE-CEEA, 45-57.
- SORENSEN J.T., KRISTENSEN E.S., THYSEN I., 1992.
A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. *Agric. Syst.*, 39, 177-200.
- TARDIEU H., ROCHFELD A., COLLETTI R., 1983.
La méthode MERISE. Tome 1. Principes et outils. Paris (France) : Les éditions d'organisation, 318 p.
- THORNLEY J.H.M., JOHNSON I.R., 1990.
Plant and crop modelling. A mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford (UK): Clarendon Press, 669 p.