

MICRO SYSTEMES

DECEMBRE 1987 - N° 81

DOSSIER: **VEGETATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR**

ATARI:
**LA GALAXIE
P.A.O.**

THEME DU MOIS:
**LES ROBOTS
SONT PARMI
NOUS!**



T 1508 - 81 - 28,00 F



3791508028005 00810



VEGETATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR

Des palmiers poussent sur l'écran de votre ordinateur, un minitel se charge d'arroser votre jardin en votre absence, un robot tond votre pelouse, un autre taille les arbres ou cueille des fruits... le tout sous la conduite vigilante d'un système expert. Vision futuriste ? Pas tellement. Car, quand le monde de l'informatique rencontre celui des plantes, il apparaît une nouvelle technologie, où botanistes et physiologistes des plantes se retrouvent aux côtés d'électroniciens et d'informaticiens : c'est la « végétation assistée par ordinateur ».

La végétation, symbole de la nature vivante et éternelle, paraît être à l'antipode de la froide technologie moderne que représente l'informatique. Née et développée dans les zones fortement urbanisées et industrialisées, comme les mégalo-pôles japonaises ou la californienne Silicon Valley, et confinée, à ses débuts, dans les calculs astronomiques pour les grands centres de recherches et universités, ou dans la gestion de très grandes entreprises, l'informatique investirait-elle désormais les champs, les forêts, les jardins ? Comment les plantes, dans leur diversité, pourraient-elles se prêter au traitement automatique, et les arbres, les fleurs, les feuilles se réduire à des séquences de zéros et de uns ?

Et pourtant, la branche et l'arbre ont fourni plus d'un modèle aux informaticiens. Les programmes les plus élémentaires comprennent des « embranchements » et « ramifications » ; les « arbres binaires » et « arbres de décision » servent à modéliser le raisonnement, les réseaux sémantiques utilisés pour représenter les connaissances dans les systèmes experts ont des formes arborescentes, d'autres réseaux « arborescents » relient les terminaux au centre de calcul... sans oublier le slogan publicitaire parodiant Saint-Exupéry : « Bull, dessine-moi un arbre ». Enfin, est-ce un hasard si

nos cellules nerveuses elles-mêmes arborescent cette forme et si les terminaisons neuronales ont pour nom « dendrites » (du grec « dendron » : arbre) ?

Après les petites entreprises et les professions libérales, nombre d'agriculteurs ont vaincu les réticences que leur inspirait cet instrument d'un autre monde, puisqu'ils sont déjà quelque dix mille en France à être informatisés. L'ordinateur voisine aujourd'hui avec le tracteur, le tuyau d'arrosage et la tondeuse à gazon, tandis que des botanistes, associés à des informaticiens, font croître des palmiers, peupliers et autres conifères sur des écrans cathodiques, pour le plus grand profit des architectes, paysagistes, urbanistes, étudiants en botanique ou en horticulture, et pour la plus grande joie des créateurs d'images de synthèse.

Des mathématiques et des plantes

La modélisation ou la simulation numérique par ordinateur permet, de nos jours, de calculer, de reproduire et d'observer pratiquement tous les phénomènes naturels, depuis les interactions moléculaires jusqu'à la formation d'une galaxie, et ce grâce aux techniques et aux performances inégalées des processeurs dédiés au traite-

ment d'images et aux supercalculateurs à architecture parallèle (voir notamment *Micro-Systèmes* n° 78, p. 158, septembre 1987).

Ces techniques reposent sur l'association d'une résolution numérique – impliquant un grand nombre de calculs – et d'une visualisation – nécessitant des processeurs d'images et des écrans à haute définition. Le système que l'on veut représenter est décrit par un modèle mathématique défini par un certain nombre de paramètres correspondant aux caractéristiques du système en question.

Dès les années cinquante, John von Neumann et Stanislas Ulam avaient inventé une méthode numérique pour modéliser les processus d'auto-organisation dans les systèmes biologiques, d'où leur nom d'« automates cellulaires » ou « jeu de la vie ». Cette méthode consiste à appliquer un maillage (réseau) sur le système étudié. A chaque nœud est associé un état discret qui ne peut prendre qu'un petit nombre de valeurs. La valeur d'un nœud dépend de son état antérieur et de celui de ses voisins ; inversement, elle influe sur l'état de ceux-ci.

Les plantes étant un exemple de système biologique, c'est-à-dire un automate cellulaire extrêmement complexe, il était possible, dès lors que l'on possédait des moyens de visualisation suffisamment élaborés, de

modéliser sur ordinateur leur aspect extérieur ainsi que leur évolution, en fonction des conditions initiales et de l'environnement.

Par ailleurs, les images synthétiques, fixes et bidimensionnelles à leurs débuts (1960), se sont animées et ont acquis la troisième dimension, tandis que les squelettes d'objets, dits « fil de fer », ont cédé la place à des surfaces pleines, colorées, ombrées ou transparentes, imitant au mieux toutes les matières possibles grâce à des algorithmes de lissage ou de texture.

D'abord utilisée pour créer des scènes imaginaires (notamment dans le cinéma fantastique ou de science-fiction), la synthèse d'image s'est bientôt révélée un outil intéressant pour modéliser la réalité, apportant, par rapport à l'observation directe, l'avantage de pouvoir jouer sur tous les paramètres, notamment le temps.

Un modèle mathématique pour les arbres : les fractales

Les premiers modèles géométriques assimaient les plantes à des formes simples (parallépipède, sphère, tronc de cône), pleines (il n'y a pas, le plus souvent, de description des éléments internes à ces formes) ; ils ne pouvaient être utilisés qu'à grande échelle et pour des applications particulières (calcul de zones d'ombre essentiellement).

Mais, si les objets artificiels (meubles, maisons, pièces mécaniques...) se prêtent assez facilement à la modélisation, il n'en est pas de même pour les phénomènes naturels, et notamment les plantes, qui ne se laissent pas aisément découper en polygones, segments de droites et autres courbes régulières. En revanche, la géométrie fractale, inventée par Benoit Mandelbrot (voir *Micro-Systèmes* n° 56, « Les objets fractals : vers d'autres dimensions », septembre 1985), qui permet de décrire avec un grand réalisme la forme d'un nuage, d'une montagne, d'un littoral, d'une rivière ou d'un cristal de neige... s'accorde aussi fort bien des formes végétales : ainsi, la fougère s'avère être un modèle vivant, quasi parfait, d'une fractale. En effet, chaque feuille de fougère est un ensemble de feuilles plus petites qui constituent autant d'autres ensembles, le processus s'arrêtant au niveau 4. De même, la branche d'un peuplier est l'image, en réduction, du peuplier tout entier.

Lorsque, comme dans les exemples cités et bien d'autres, les détails à petite échelle ressemblent à la structure dans son ensemble, on dit qu'il y a « autosimilarité ». Cette notion se traduit, en programmation, par la récursivité. De nombreux programmes de synthèse d'images végétales, mettant en

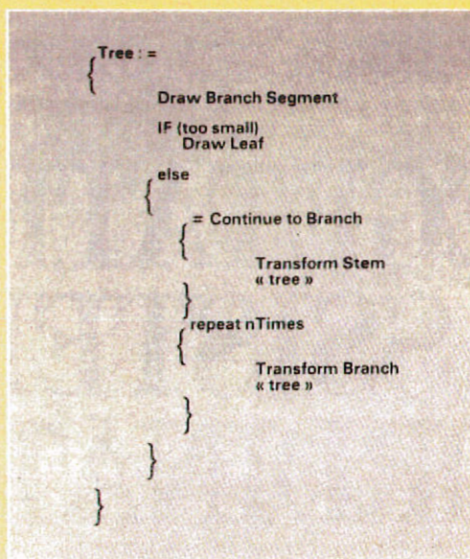


Fig. 1. — Programme mettant en œuvre un modèle récursif d'arbre. (D'après P. Oppenheimer.)

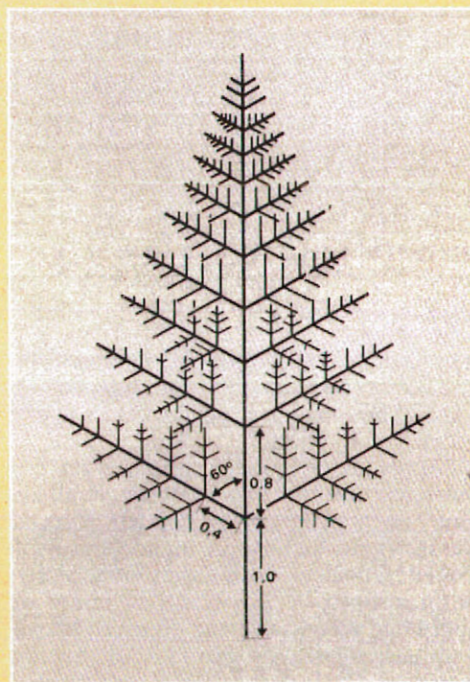


Fig. 2. — Paramètres caractérisant un arbre fractal :
Rapport tronc/tronc = 0,8
Rapport branche/tronc = 0,4
Angle d'embranchement = 60°

œuvre l'autosimilarité, ont déjà été écrits. *Grosso modo*, il s'agit de dessiner un motif de base, constitué par un nœud duquel partent des branches ; lorsqu'une branche a atteint une certaine longueur, un autre nœud se crée et fait apparaître d'autres branches plus petites, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les branches deviennent trop petites (fig. 1). La dernière étape consiste alors à dessiner des feuilles ou des fleurs au bout des branches.

Un tel programme fait intervenir plusieurs paramètres, dont dépendra l'allure générale de l'arbre : l'angle entre le tronc et les branches ; le rapport entre la dimen-

sion du tronc et celle des branches ; le nombre de branches par nœud, etc., (fig. 2). Pour approcher la réalité et sa fantaisie naturelle, une fonction aléatoire peut faire varier ces paramètres, ajouter des fruits et des fleurs en divers points des branches...

Aujourd'hui, constate Michel Fantin (1), « la production d'images réalistes fait de plus en plus appel à une modélisation qui repose elle-même sur des lois physiques ou biologiques décrivant les phénomènes représentés », comme le montrent les exemples que nous allons examiner.

C'est ainsi qu'il est possible de voir, sur l'écran de l'ordinateur, pousser des arbres, leur feuillage changer de couleur et d'allure au fil des saisons, les branches se couvrir de neige en hiver, de fleurs et de bourgeons au printemps, plier sous le vent d'automne...

Créer et faire pousser des plantes

« Pour créer une plante réaliste et esthétique, il suffit de :

- choisir un végétal dans le catalogue ;
- le faire croître, fleurir et fructifier à votre gré. »

Ainsi se présente AMAP (Atelier pour la modélisation des arbres et des plantes), progiciel de dessin assisté par ordinateur appliqué aux arbres, permettant de modifier l'âge, l'allure, la taille, l'aspect saisonnier de ceux-ci, en fonction des conditions écologiques.

A l'origine de ce produit, un mathématicien agronome — ou « agromathématicien », comme il se définit lui-même — du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), à Montpellier : Philippe de Reffye (2). Il souhaitait démontrer, par un modèle de simulation de la croissance du caféier, l'influence de l'architecture de l'arbre sur la production des cerises de café, en vue d'une meilleure compréhension de la croissance des plantes.

Bientôt, des organismes de recherche français parmi les plus prestigieux, le Laboratoire de recherche informatique d'Orsay, le Laboratoire de botanique tropicale de l'université des Sciences et techniques du Languedoc (Montpellier), l'équipe de synthèse d'images de l'université Louis-Pasteur de Strasbourg et celle de l'École normale supérieure de la rue d'Ulm à Paris, associèrent leurs informaticiens et botanistes à ce projet.

Le principe d'AMAP est de simuler le comportement des méristèmes de la plante (tissus embryonnaires, à l'origine du développement de la plante et de ses organes), et en particulier la ramification, c'est-à-dire l'élaboration d'une partie élémentaire de la plante, ou « entrenœud ». Selon Pascal Lienhardt et Jean Françon, de l'université

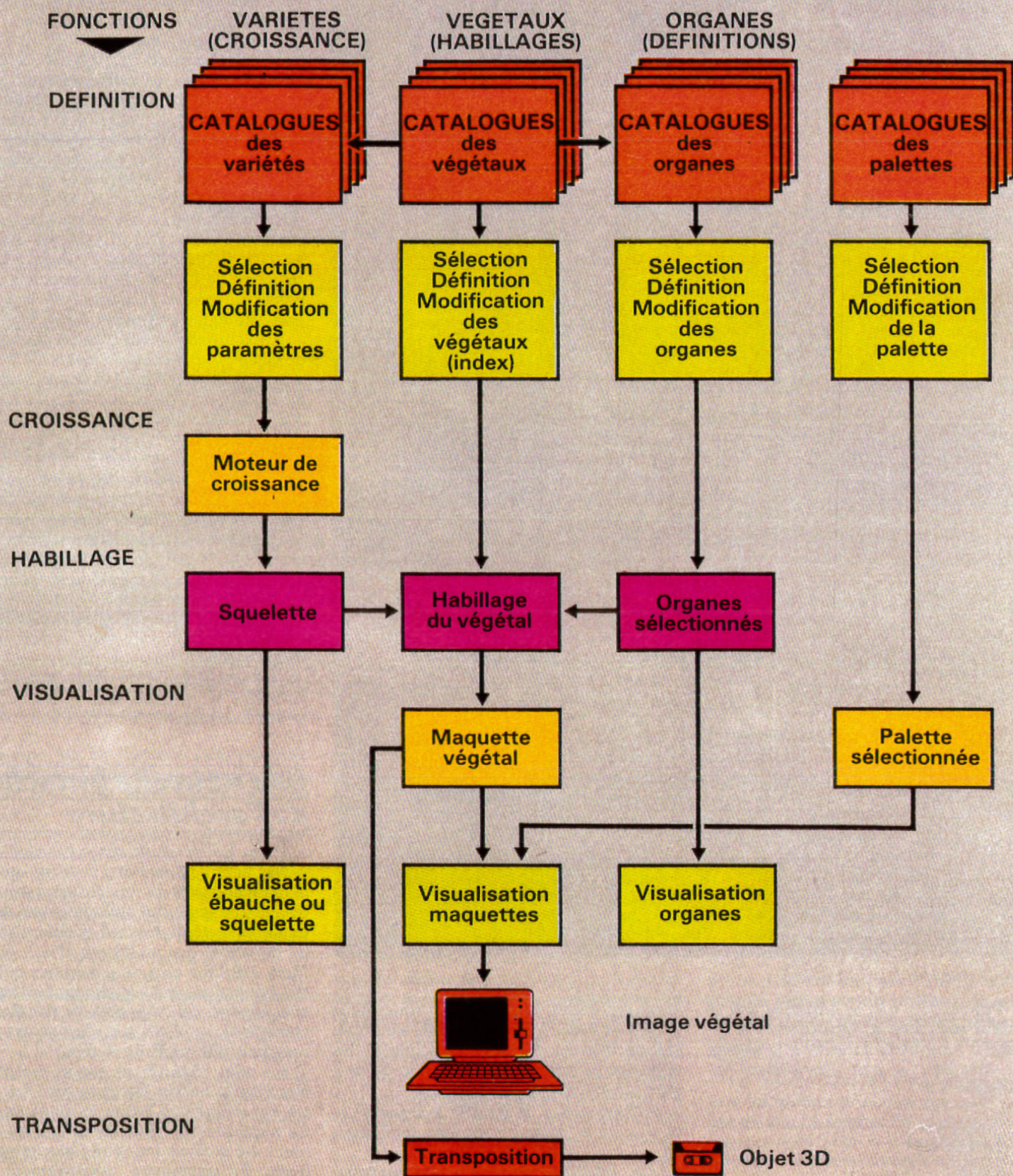


Fig. 3. - Architecture générale d'AMAP. (D'après doc. SESA.)



© SCSA

Arbre taillé généré par le logiciel AMAP.

Louis Pasteur (3), « la modélisation doit se baser sur le maximum de connaissances en botanique, (...) une forme naturelle se comprend par sa croissance, et plus généralement par son évolution. »

Modéliser les lois botaniques

En effet, à la différence des autres méthodes connues de calcul d'images de végétaux, issues de procédés purement mathé-

matiques telles les fractales (que nous venons de voir), AMAP est fondé sur l'intégration fine des fonctions biologiques des végétaux, ce qui lui confère les caractéristiques suivantes :

- la polyvalence, le modèle pouvant s'appliquer en principe à n'importe quel végétal ;
- une fidélité botanique exceptionnelle, les images obtenues étant strictement conformes à une réalité possible ;
- la prise en compte du temps, le progiciel pouvant représenter le même végétal à des âges différents ;
- la prise en compte de l'aléatoire de la

vie, deux plantes ainsi modélisées n'étant jamais identiques ;

- la possibilité d'interaction avec un certain nombre de paramètres (présence du vent, saison, densité de feuillage, taille d'un arbre à des âges déterminés, etc.) ;
- la qualité graphique.

Les observations de Philippe de Reffye sur une centaine de caféiers lui ont permis de calculer les probabilités de ramification, de mortalité ou de pause, et d'établir ainsi le premier modèle mathématique de croissance d'un arbre (4). Mais auparavant, il a fallu recenser sur le terrain un grand nombre de paramètres (environ soixante-quinze pour chaque plante, tous n'étant pas utilisés simultanément). A partir de ces données, les chercheurs calculent l'influence, sur la structure de l'arbre, de facteurs tels que la pente du terrain, la densité de la végétation, l'attaque des insectes...

Appliqué en Côte d'Ivoire à des cultures de caféiers, ce modèle a permis d'étudier la verse (phénomène qui fait pencher ou tomber les arbres), ainsi que d'autres facteurs utiles, tels que l'influence de différentes doses d'engrais sur la croissance des plantes ou la résistance à diverses maladies.

Après le caféier, c'est au tour du palmier, du cotonnier, de l'arbre à lychees, de l'hévéa... d'être modélisés. Chaque année, le programme est étendu à de nouvelles variétés.

De plus, pour chaque variété, l'intervention de nombres aléatoires, simulant le hasard dans la nature, fait que des clones d'un même arbre ne croissent jamais de la même façon, même s'ils présentent un air de ressemblance. Une forêt entière peut ainsi être synthétisée, sans qu'aucun arbre ne soit exactement identique à son voisin.

Une nouvelle branche de l'architecture

P. de Reffye n'est certes pas seul à travailler dans ce domaine ; il existe, en effet, d'autres logiciels de modélisation des plantes, notamment celui réalisé par une équipe de l'université de Cornell (Californie) sous la direction du professeur Karl Niklas. Mais AMAP a ceci de particulier qu'il est très général et peut s'appliquer à n'importe quel végétal. « Il est possible de calculer et de représenter une plante aussi loin qu'on en a le courage », affirme P. de Reffye.

En effet, AMAP se fonde essentiellement sur la notion d'architecture des plantes, qui s'applique à tout le règne végétal. Ce n'est que très récemment que cette notion a été étudiée d'un point de vue scientifique. En examinant attentivement leur croissance, des botanistes ont découvert qu'une grande variété d'arbres et de plantes évoluent de la même façon, bien qu'ils diffèrent très nettement par leur apparence. Le professeur Francis Hallé (Laboratoire de botanique tropicale à Montpel-

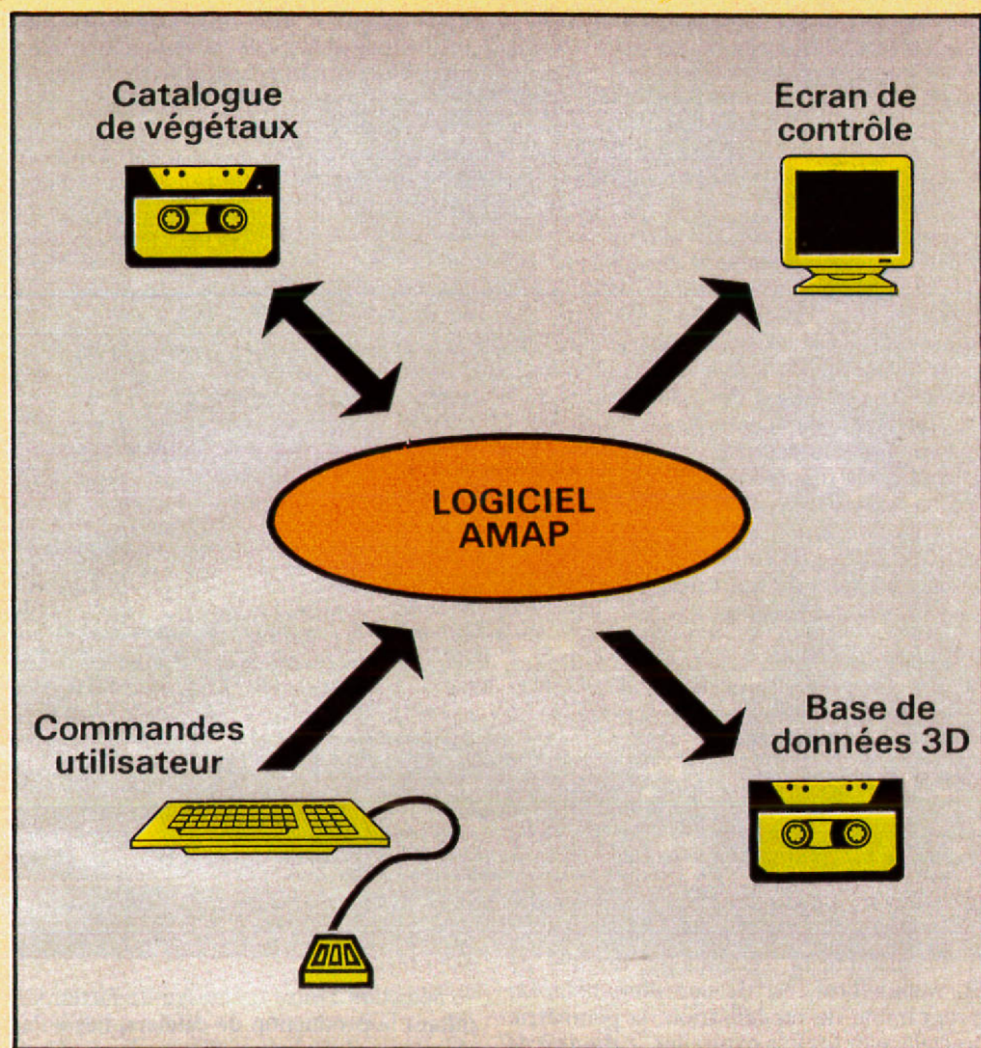


Fig. 4. - Architecture externe d'AMAP. (D'après doc. SESA.)

lier) a ainsi mis en évidence « une vingtaine de modèles architecturaux pour répertorier les quelque trois cent mille espèces d'arbres connues ».

Chaque modèle architectural est caractérisé à l'aide d'une douzaine de paramètres. Le plus simple est le modèle du palmier, comportant un tronc, pas de branches et de grandes feuilles, tandis que le pin maritime, au tronc droit et haut, aux branches dressées et disposées en étages, fournit un modèle architectural pour de très nombreux végétaux des pays tropicaux et tempérés. En fait, trois modèles seulement - assez bien représentés par le peuplier, le sapin et le hêtre - suffisent pour décrire toute la végétation de l'Europe, alors que la végétation tropicale offre un éventail beaucoup plus large. « Sans ce travail préalable des botanistes, je n'aurais rien pu faire », reconnaît P. de Reffye.

Le moteur de croissance

Par ailleurs, la croissance d'une plante est le résultat de l'évolution de ses tissus

cellulaires spécifiques, qui donnent naissance aux organes : tronc, branche, entrenœud, feuille, fleur, fruit. Cette croissance dépend essentiellement du temps. C'est pourquoi, pour modéliser les plantes, il a été nécessaire de créer un modèle de simulation de croissance, basé sur les lois générales de la biologie et appelé « moteur de croissance ».

Après initialisation, ce moteur permet de générer une plante en prenant en compte simultanément la progression dans l'architecture de la plante et la construction des organes. La progression dans l'arbre s'effectue en s'aidant des lois botaniques. Les phénomènes de la vie d'une plante (élongation, mortalité, pause, réitération, élagage) sont pris en compte dans le modèle grâce à des probabilités de succès sur chacun de ces événements. Le moteur de croissance effectue un tirage aléatoire et compare le nombre tiré avec la probabilité correspondant au phénomène testé. Le temps nécessaire à chaque étape de croissance peut être rendu dépendant de phénomènes extérieurs (sécheresse, engrais, alternance des saisons, etc.).

Simultanément, à chaque fois qu'une

branche s'accroît, la disposition dans l'espace est immédiatement déterminée, en tenant compte des paramètres géométriques (longueurs, angles) et de l'influence des éléments extérieurs (pesanteur, vent, pente du terrain...) grâce à des calculs de résistance des matériaux. C'est à ce niveau qu'il est fait appel aux procédures simulant la croissance des feuilles, fleurs, fruits.

Dessine-moi un arbre

Pour « créer » un végétal, l'utilisateur d'AMAP procède en deux étapes : il faut d'abord construire son architecture, consistant à définir une « variété » caractérisée par le tronc, les branches... puis « habiller » ce squelette végétal à l'aide de fleurs, de feuilles, de fruits, autrement dit les « organes » (fig. 3).

Les différentes variétés et les organes, qui définissent une plante, sont disponibles dans un catalogue de végétaux dans lequel l'utilisateur peut choisir le spécimen correspondant totalement ou partiellement à son besoin. Une fois choisie, la maquette 3D générée par AMAP se présente sous forme de fichier ASCII. Le végétal peut, dès lors, être visualisé, modifié, archivé, intégré dans une base de données externe (fig. 4).

Des bibliothèques de formes sont livrées avec le logiciel commercialisé par la SESA (Société d'études des systèmes d'automatisation) pour mini ou micro-ordinateur (PC/AT ou compatible). A titre indicatif, sur un Data General MV 10000 SX, la simulation demande environ une minute pour un palmier à huile, et une dizaine de minutes pour un peuplier ; bien sûr, le temps de calcul dépend de la complexité du végétal et du degré de précision demandé.

De l'arbre à la feuille

AMAP a évolué non seulement en s'appliquant à des variétés de plus en plus nombreuses, mais aussi en étant capable de calculer et dessiner des détails toujours plus précis. Les feuilles, par exemple, au départ simples taches vertes, révèlent maintenant toutes leurs caractéristiques de forme et de texture, lesquelles évoluent à mesure que l'arbre croît.

La construction d'un organe se fait suivant les mêmes principes que ceux de l'arbre entier. Le moteur de croissance de ces organes a en effet la même structure que celui de l'arbre, mais avec un nombre de paramètres restreint. C'est pourquoi le modèle est aussi bien utilisable pour la forme générale de la plante que pour des vues détaillées par agrandissement d'une partie de la plante (c'est d'ailleurs ce qui a conduit à appliquer le modèle fractal aux plantes, comme nous l'avons vu précédemment).

C'est ainsi que P. Lienhardt et J. Françon se sont appliqués à modéliser les feuilles et l'évolution de celles-ci : croissance, déformations, nécrose et autres métamorphoses, par exemple les variations de coloration d'une feuille au cours des saisons, le dépliement de celle-ci au printemps ou son froissement en automne, variations qui correspondent à des modifications de la composition même de la feuille.

La méthode proposée par ces chercheurs s'appuie sur les notions botaniques relatives à la croissance et à l'évolution d'un système de nervures, ainsi qu'à celle du limbe, c'est-à-dire la surface s'appuyant sur ces nervures qui forment, en première approximation, un système analogue à un arbre bidimensionnel.

Ainsi, l'évolution dans le temps de la feuille peut être suivie sur ordinateur : initialement ($t=0$), la feuille est réduite à un point. A chaque instant ultérieur ($t>0$), le modèle instantané de la feuille est déduit de son modèle à l'instant précédent ($t-1$). Un certain nombre d'opérations sont possibles entre les instants t et $t+1$. Ce sont : la ramification (création d'une nouvelle arête de croissance), la fusion, la disjonction (création ou suppression de faces frontières, permettant une modification du contour de la feuille).

Cette simulation a été réalisée sur mini-ordinateur SM90. Le nombre de faces triangulaires composant les feuilles varie entre 300 et 3 000. Le temps de calcul nécessaire à la génération de ces images est compris entre 3 secondes et 4 minutes, sans tenir compte du temps de remplissage des facettes. La méthode s'est avérée applicable aussi bien aux images de fleurs, fruits et autres surfaces.

Représenter un champ de maïs

Le même P. de Reffye, associé à des chercheurs de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), a développé un modèle géométrique pour le maïs, afin de caractériser correctement la structure complète du couvert végétal (5). Partant du modèle mis en œuvre par AMAP, cette équipe s'est attachée à décrire très exactement le maïs, plante particulièrement simple, décomposée en une tige, 12 à 15 feuilles alternées, un épi, une panicule (fleur mâle) à l'extrémité de la tige. La représentation d'un pied met en jeu une centaine de paramètres. Pour passer de l'individu au peuplement, il suffit de calculer, puis de juxtaposer le nombre de pieds voulus. Cette implantation se fait en fonction des caractéristiques du peuplement désirées.

La simulation sur ordinateur permet de résoudre deux sortes de problèmes :

- biologique, d'une part : il s'agit de la compétition entre pieds pour le partage des ressources ; ce phénomène peut être modé-

lisé au travers de fonctions d'autocorrélations intra-rang, la compétition inter-rang étant négligée ;

- géométrique, d'autre part : c'est le problème, particulièrement complexe, de l'interpénétration du feuillage, où le déplacement d'une feuille peut engendrer de nouvelles collisions.

Une telle maquette est déjà disponible pour un petit peuplement, de quelques dizaines à quelques centaines de pieds. Il est envisagé d'intégrer ce modèle dans de nombreuses études, tels le calcul des ombres portées à l'intérieur du couvert végétal, la caractérisation des échanges radiatifs au sein de la végétation, et ultérieurement la modélisation spatiale de la propagation d'épidémies (déplacements d'insectes, diffusion sur un support complexe) ou la modélisation du microclimat au travers d'une meilleure prise en compte des échanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique entre le couvert végétal et l'atmosphère.

Les fractales ou la logique des plantes

« En imitant la logique de la nature, les logiciels de simulations informatiques permettent de cerner l'essence des objets naturels », explique Peter Oppenheimer (6). L'originalité des travaux de ce chercheur du New York Institute of Technology, disciple de B. Mandelbrot, est de concilier, dans un programme de modélisation, la géométrie fractale avec les lois naturelles. « Au-delà de la simple modélisation visuelle, ce programme simule le processus de croissance de ces formes en imitant la logique génétique de ces organismes », ajoute-t-il.

Les paramètres du programme de modélisation d'arbre à l'aide des fractales (fig. 1 et 2) joueraient, selon ce chercheur, un rôle analogue au code ADN (acide désoxyribonucléique) qui décrit les caractéristiques des branches d'un arbre. De même que l'ADN contient des informations sur tout l'organisme sous une forme très économique, ces paramètres, peu nombreux, suffisent à déterminer entièrement la forme et l'allure de l'arbre. « Les ordinateurs, comme les organismes, appliquent des règles simples pour créer des structures complexes », constate P. Oppenheimer.

L'analogie avec l'ADN est encore plus flagrante, lorsque l'on sait que la forme de cette molécule géante est celle d'une spirale, qui serait, selon P. Oppenheimer, « en quelque sorte un ensemble autosimilaire dégénéré. C'est l'unité atomique qui constitue les arbres fractals ».

En fait, l'utilisation des fractales permet plutôt de créer des formes nouvelles, une botanique fantastique, une végétation surréaliste, que de modéliser des plantes existant dans la nature. Il est possible de partir

d'une plante réaliste et, en modifiant un à un les paramètres, d'assister à une métamorphose complète de celle-ci. P. Oppenheimer a ainsi réalisé une animation où, par interpolation de ces paramètres d'une espèce d'arbre réel à une autre, il effectue des transformations étonnantes comme, par exemple, la métamorphose d'un sapin en cerisier.

L'avantage de l'expérimentation sur ordinateur

La modélisation sur ordinateur ne remplace pas l'expérimentation en laboratoire, mais lui est complémentaire : « L'intérêt de la numérisation est d'ouvrir de nouveaux champs d'expérimentation », explique Jean-François Colonna, qui dirige le GSV-Lactamme (Groupe Synthèse Vidéo) à l'Ecole Polytechnique. La simulation permet, en particulier, d'accélérer le cours du temps : visualiser un jardin ou une forêt cinq ou dix ans après la plantation des arbres offre un avantage incomparable à un architecte paysagiste comme à un sylviculteur, et savoir, comme le fait remarquer P. de Reffye, « si la branche du cèdre planté dans votre jardin traversera un jour la salle de bains » n'est pas négligeable...

La modélisation ouvre encore bien d'autres perspectives, dont voici quelques exemples.

- Sélection : mise en œuvre de facteurs limitant la production de caféiers, liés à l'architecture des plants ; élimination précoce, par extrapolation, de nouveaux croisements d'hévéas susceptibles de casser au vent.

- Etude de nouvelles pratiques de plantation (gêne entre plantes), de taille ou de bouturage ; l'INRA espère ainsi pouvoir optimiser la conduite d'exploitations forestières pour accroître le volume utile de bois.

- Optimisation de l'utilisation des insecticides et des engrais, par mise en corrélation de la croissance de la population avec l'évolution de la surface foliaire.

- Création de plantes « mutantes » et autres végétaux fantastiques n'existant pas dans la nature, mais ayant une apparence de réalité.

Le laboratoire de modélisation du CIRAD à Montpellier assure les développements liés à la création de nouvelles variétés de modèles, le calcul d'éléments végétatifs (feuilles, fleurs, fruits), le développement de la banque de formes pour ces éléments... et poursuit des recherches sur l'utilisation scientifique du modèle.

En outre, précise P. Oppenheimer, « l'avantage économique d'un programme est qu'une structure hautement complexe est générée à partir d'un ensemble très concis de données qu'il est facile de produire. C'est d'ail-



Cersier généré par le logiciel AMAP à partir des paramètres de croissance.

leurs ainsi, suggère-t-il aussi, que la nature a résolu le problème de l'évolution et du conflit entre complexité et simplicité. »

L'intelligence vient aux plantes

L'apport de l'intelligence artificielle est particulièrement important dans les phénomènes relatifs à la végétation, étant donné leur complexité. Elle intervient notamment dans la synthèse d'images végétales, où beaucoup de paramètres entrent en jeu, comme la taille d'une plante, la proximité avec d'autres végétaux, la pente du terrain, la nature du sol, etc.

Les techniques d'intelligence artificielle font passer à l'arrière-plan la question de la géométrie visuelle des objets et de la modélisation de leur allure physique dans l'espace, pour s'attacher d'abord à leur représentation symbolique. Les connaissances introduites dans la machine sont des « notions symboliques » de ce qu'elle devra ensuite dessiner, et non les paramètres définissant les éléments de dessin (lignes, surfaces), par exemple « la gravité », « l'équilibre », « éviter une autre forme »... Le programme du peintre Harold Cohen,

de l'université de Californie San Diego, génère des dessins en fonction de ces notions symboliques, ignorant toute interaction graphique directe. Une telle démarche simplifie les processus de composition et d'animation des images.

Nadia et Daniel Thalman (Miralab, université de Montréal, Québec) développent un système interactif de création et animation d'images tridimensionnelles, dont chaque séquence est décrite par un script caractérisant les divers objets de la scène, appliquant ainsi à l'imagerie électronique les techniques les plus évoluées de représentation des connaissances (cf. *Micro-Systèmes* n° 75, p. 108, mai 1987).

Des experts de la végétation

Mais l'apport de l'intelligence artificielle va bien au-delà de l'aide au graphisme. Les premiers systèmes experts opérationnels concernaient le diagnostic de maladies de végétaux, comme le fameux « Tom », conçu par Alain Bonnet à l'initiative de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) en collaboration avec la société Cognitech, appliqué aux plants de tomates et actuellement en cours de test.

L'INRA développe par ailleurs une vingtaine d'outils du même genre pour des végétaux différents. Après la réalisation d'un prototype sur grosse informatique, ces systèmes sont portés sur micro-ordinateurs. L'étape suivante consiste à exploiter un vidéodisque pour illustrer les questions posées au système à l'aide de photographies représentant des variétés de plantes, des systèmes typiques de maladies, etc. Afin de les mettre à la portée de tous, certains de ces systèmes seront mis sur minitel, ce qui permettra aux cultivateurs de prendre immédiatement les bonnes décisions, sans avoir besoin de recourir à un spécialiste, souvent éloigné du lieu de culture.

Quelques programmes, tel « Zea » pour la conduite de la culture du maïs, sont issus des projets agricoles du feu Centre mondial informatique, regroupés sous le nom d'AR-PEGE (Aide à la résolution de problèmes pour l'élevage et la gestion des exploitations). Développé pour partie en Lisp avec le moteur d'inférence OPS5, Zea est censé remplacer plusieurs experts avec ses quatre modules spécialisés en travail du sol, irrigation, pathologie et variétés de maïs. Un tel système peut faire passer le rendement à l'hectare du simple au triple. A terme, Zea pourra être interrogé par terminal digital VT 100 via Transpac, par les centres d'en-

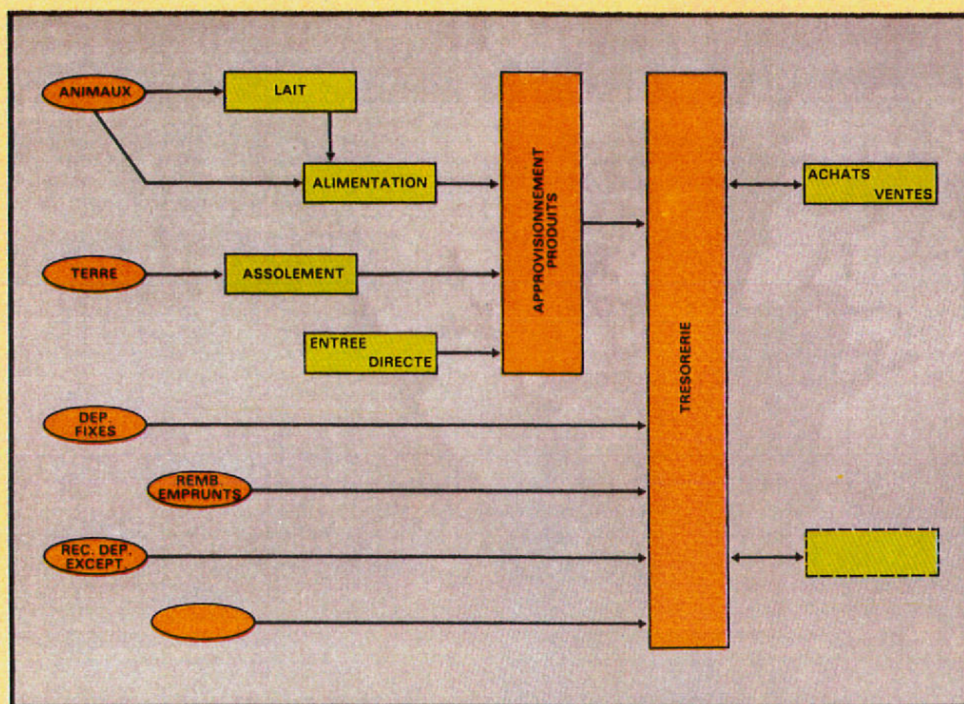


Fig. 5. - Le logiciel d'aide à la décision sur micro-ordinateur, produit par le Laboratoire d'économie rurale de Grignon (INRA) a pour objectif d'effectuer une prévision des recettes et des dépenses sur une période de 18 mois au maximum, pour des exploitations de polyculture-élevage. Ce programme comporte un module de choix d'assolement et calcul des produits et charges végétales.

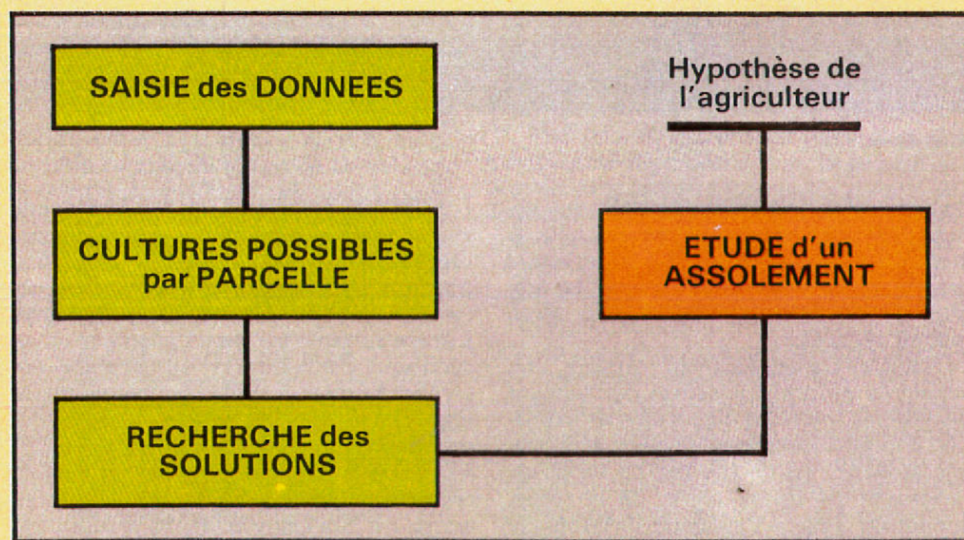


Fig. 6. - Organisation du logiciel de recherche d'assolements par parcelle (Laboratoire d'économie rurale INRA.) :

- Une fois l'ensemble des données saisies, le programme détermine, dans un premier temps, pour chaque parcelle, les cultures possibles et leurs marges ; cette phase tient compte de l'histoire de la parcelle, des successions autorisées et interdites, et des règles de répétitions.
- Ensuite, il recherche, sur l'ensemble des parcelles, les assolements qui vérifient les limites maximales de surface et qui apportent les marges totales les plus grandes.
- Enfin, il est possible de visualiser et de modifier ces solutions ou de les comparer avec les propres hypothèses d'assolements de l'utilisateur.

seignement et les instituts agricoles. Un accès par minitel est prévu afin de le mettre à la portée de tous les agriculteurs.

D'ores et déjà, le minitel met à la disposition de tous, les services offerts par Edimatic (par le 36 15, code EDIMK). Grâce à la « télématique agricole », l'utilisateur est aidé dans le choix de produits phytosanitaires,

désherbants et autres fongicides. Un système interactif, baptisé « Ivraie », est capable d'identifier les mauvaises herbes, compte tenu d'une certaine incertitude (choix multiples) : le cultivateur décrit la plantule et le système lui fournit son nom.

Le Laboratoire d'économie rurale de l'INRA a développé un moteur d'inférence

pour micro-ordinateurs (Mimi) dont la caractéristique principale est d'être suffisamment simple pour ne pas devoir faire appel à des ingénieurs de la connaissance et autres spécialistes, afin que les conseillers agricoles et les agriculteurs puissent créer eux-mêmes, au niveau de la région, un système expert bon marché, facilement diffusible et tenant compte des particularités régionales : influence du terroir, de la région, des traditions... Lors d'une première expérience de formation de conseillers, ceux-ci ont réussi à réaliser en quelques jours un système expert appliqué au diagnostic et à l'aide à l'organisation du travail en agriculture.

Le même moteur d'inférence, associé au graphisme, a permis de réaliser un programme d'identification des arbres à partir des particularités de leurs formes, organes, couleurs... Chaque question posée est illustrée d'un dessin aidant l'utilisateur à y répondre. La conclusion - c'est-à-dire l'arbre identifié - est également assortie d'une image de cet arbre.

L'ordinateur aux champs

Sans parler des nombreux progiciels destinés à la gestion des exploitations agricoles (gestion des parcelles, aide à la décision...), il existe encore beaucoup de produits appliqués à l'agriculture et l'arboriculture. Citons, aux États-Unis, « Wheat Councillor » (ICI) pour la prévention des maladies du blé, « Pomme » (Virginia Polytechnic Inst.) pour la gestion des champs de pommiers, « Comax » pour la récolte du coton. Ce dernier, installé dans une ferme du Mississippi, a déjà fait ses preuves : en suivant ses propositions, notamment en commençant à récolter le coton à la date préconisée, la production totale peut être sensiblement augmentée, réalisant un gain de 60 dollars par acre de terrain. Aux Pays-Bas et au Danemark, des microprocesseurs équipent les serres et en contrôlent les divers paramètres (température, hygrométrie, luminosité...).

Bien que la plupart des logiciels actuellement disponibles et concernant les végétaux s'adressent aux agriculteurs, ces systèmes pourraient probablement être adaptés à la culture de n'importe quel arbre ou plante. L'un des pionniers de la micro-informatique agricole en France, Jean-Marie Attonaty, directeur de recherche au Laboratoire d'économie rurale de Grignon (INRA), a fait deux paris simultanés : créer des systèmes experts utilisables sur micro-ordinateur et donner les moyens aux techniciens de terrain de créer eux-mêmes les systèmes experts dont ils ont besoin.

Soulignant l'intérêt du traitement « sur place, en temps réel et en mode conversationnel », ce chercheur est, de son propre

aveu, l'un des « premiers à mettre un ordinateur dans la voiture pour l'amener à la campagne » (7). Mais cette utilisation pose de grosses difficultés : un grand nombre de données concernant la végétation, et l'écologie en générale, sont essentiellement qualitatives ; des indicateurs comme la couleur de la surface du terrain, la réaction au coup de botte de l'agriculteur, lui permettent, d'instinct, d'apprécier l'humidité ou la consistance du sol. De plus, si l'on peut faire des prévisions de récolte de fourrage, « rien ne permet de savoir si le printemps sera précoce ou tardif, sec ou pluvieux, cette année », remarque J.-M. Attonaty. Aussi les programmes d'aide à la culture devront tenir compte de l'incertitude de l'avenir, du caractère flou de certaines données.

Les logiciels de végétation assistée par ordinateur peuvent être utilisés en amont de programmes de gestion ou d'organisation de l'exploitation agricole (fig. 5). Les travaux de J.-M. Attonaty portent en particulier sur de telles applications. Cette gestion se fait en trois phases, correspondant à des échelles de temps différentes : « Certaines décisions se prennent au jour le jour. Vous choisissez un produit phytosanitaire (décision) puisque vous vous êtes aperçu que vous aviez des pucerons (diagnostic), et puis vous regardez ce qui va se passer après (suivi). »

Il existe aujourd'hui beaucoup de produits consacrés au suivi. L'aide à la décision fait le plus souvent appel à des programmes complexes de recherche opérationnelle, implantés sur gros systèmes. Quant au diagnostic, nous avons vu qu'il pouvait mettre en œuvre des systèmes experts, afin de tirer parti de toutes les données en présence.

Ainsi le logiciel d'aide au choix des cultures, conçu au Laboratoire d'économie rurale de Grignon et commercialisé sous le nom de « Plainlac » par Telciel, a pour objectif de fournir à un agriculteur une série d'assolements possibles dans son exploitation pour une année donnée en fournissant une culture pour chaque parcelle, et de rechercher la configuration qui maximise la marge brute totale.

Ce programme, très convivial et facile d'emploi, demande à l'agriculteur de saisir lui-même les données relatives aux parcelles (nom, surface, type de terre, historique des cultures), aux cultures (espèce, prix de vente, rendement, règles de succession et de répétition...), ainsi que les contraintes globales de l'exploitation (maxima de surface pour une culture donnée). A partir de là, le logiciel fournit par parcelle les cultures possibles en les classant par marge brute décroissante, leur rendement, leur marge à l'hectare, et la production et la marge totale de la parcelle.

Un certain nombre de solutions sont proposées à l'utilisateur pour la totalité de ses parcelles. Il peut aussi modifier ou définir lui-même un assolement et obtenir la marge brute correspondante (fig. 6).

Robots et végétaux

Forts des bons conseils qui leur auront été fournis par les ordinateurs, les agriculteurs, sylviculteurs et autres jardiniers doivent aussi les mettre en pratique au moment opportun, c'est-à-dire semer, repiquer, arroser, irriguer, tailler, récolter, cueillir...

Si l'idée des robots cueilleurs de fruits n'est pas une nouveauté (elle remonte à plus de vingt ans), elle n'a pris forme qu'au début des années quatre-vingts, simultanément au Japon, en Floride et en France. C'est ainsi que la machine développée au Centre d'étude du machinisme agricole, du génie rural et des eaux et forêts (CEMAGREF), la première du genre, répondant au doux nom de « Magali », a été testée dans les vergers de pommes du Centre expérimental de Marsillagues à partir de septembre 1986. Automotrice et téléguidée, Magali est capable de récolter environ 50 % de la production des arbres, à raison d'un fruit toutes les quatre secondes, ce qui correspond au rythme de deux cueilleurs manuels.

La machine est équipée d'une double commande, manuelle et automatique, ainsi que d'un module de vision (caméra et analyseur d'image) permettant le repérage des fruits d'après leur couleur. Un projecteur lui permet, en outre, de travailler de nuit. Pour rendre commercialisable un tel robot, il faut encore améliorer ses performances afin d'assurer une récolte à 80 %, précise Alain Bourély, du Cemagref.

Cet organisme a d'autres projets dans ce domaine ; il étudie notamment la robotisation de la cueillette de fruits fragiles tels que la tomate et la fraise, et a prévu de réaliser des robots pour l'irrigation, ainsi qu'un bras robotisé capable d'arracher des arbres en milieu forestier. Des prototypes de matériels de débroussaillage ont déjà été réalisés, et les études actuelles portent sur la robotisation de l'exploitation des taillis et des premières éclaircies forestières.

D'autres machines, munies de systèmes de vision, sont capables d'effectuer le tri qualitatif des fruits, la récolte sélective des plantes mûres (asperges et tomates, par exemple). Des opérations délicates comme la tonte du gazon ou la taille des vignes s'effectueront également par des engins robotisés.

D'ores et déjà, un prototype de robot pour la transplantation de plantules cultivées *in vitro* a été développé par le professeur Yoshiyuki Miwa (université de Waseda, Japon). Pour cette opération extrêmement délicate, ce chercheur a réalisé un robot actionné par alliage à mémoire de forme (cf. *Micro-Systèmes* n° 70, p. 94, décembre 1986). Il permet une pré-hension douce et une plantation de semis

de 0,5 mm de diamètre et de 20 mm de longueur sur le milieu de culture, sans endommager les plantules. Un système de détection utilisant la plante comme une antenne a été conçu et développé ; la plantule est ainsi capable d'indiquer directement sa position, ce qui permet une détection précise dans le cas où l'espacement entre les plantules est supérieur à 5 mm. Y. Miwa a également mis au point un prototype reconnaissant l'état de croissance des semis, grâce à des détecteurs de couleur, lesquels peuvent, dans certaines limites, distinguer les plantules d'après leur taille en intervalles de 5 mm.

Un système entièrement automatisé de transplantation de plantules, intégrant tous ces éléments, a été réalisé avec succès. Il faut actuellement 60 secondes pour transplanter une plantule, mais l'auteur pense réduire ce temps à 30 secondes. Cette réalisation a été récompensée par un prix attribué par le groupe Moët-Hennessy, lors des journées « L'électronique et le pilotage des plantes », qui rassemblaient 300 scientifiques de 40 nationalités différentes, à Monaco, du 14 au 16 septembre 1987.

Ce colloque a, par ailleurs, permis à de nombreux biologistes, physiologistes des plantes, électroniciens et physiciens d'explorer ensemble les voies d'une coopération dans les techniques suivantes : programmation-régulation, automation-robotique, système experts, simulation sur écran, etc.

Le minitel arroseur

Depuis plusieurs années déjà, on sait maîtriser l'automatisation et la télésurveillance de l'irrigation. Des capteurs placés sur les branches ou les fruits peuvent être reliés à un système déclencheur de l'irrigation. Une PME provençale, Automatic Pilote Systèmes (APS), a mis au point un tel dispositif : le « Pepista ». Une centrale informatique dotée d'un logiciel enregistreur et intègre les mesures, effectuées toutes les minutes pour la culture maraîchère ou toutes les demi-heures pour les vergers. La centrale commande de manière optimale l'ouverture des électrovannes du système d'irrigation, en fonction de la courbe journalière cumulée des micro-variations.

La même société a développé un système complémentaire, « Transagri Puls'ApS », qui offre l'intérêt d'utiliser un minitel comme terminal d'accès. Il suffit donc de disposer d'un minitel et, pour le prix d'une conversation téléphonique, il est possible d'interroger ou de modifier le programme permettant de déclencher à distance l'arrosage d'un jardin, d'un champ ou d'une pelouse. Le pilotage s'effectue par l'intermédiaire d'un système à microprocesseur muni d'un modem. Cette connexion fait aussi office d'alarme à dis-

tance : en cas d'anomalie du système d'irrigation (blocage de l'électrovanne, par exemple), Transagri Puls'Aps appelle automatiquement l'un des quatre numéros de téléphone qu'il est capable de mémoriser. Toutes les informations sont visualisables sur l'écran du minitel, et la programmation s'effectue à partir du clavier, l'accès au système étant protégé par un mot de passe.

S'il est possible de télécommander l'arrosage du jardin, on peut également télécommander une tondeuse à gazon, comme s'il s'agissait d'un jouet d'enfant. C'est le cas du robot PX 2100 de la firme japonaise Kubota. Quant au LARFRA, à Bordeaux, il étudie un robot tondeur de gazon automatique qui fonctionnera par mémorisation préalable du trajet à parcourir, avec l'aide d'un capteur ultrasonore.

La végétation vue de satellite

Au début de cet article, nous avons vu comment on peut visualiser la végétation et son évolution sur l'écran d'un ordinateur. Mais il est aussi essentiel de l'observer en réalité, afin de détecter certaines caractéristiques : variations de la croissance en fonction du terrain, influence de la pollution, évolution de maladies des arbres...

L'apport de l'électronique et de l'informatique ne sont pas négligeables dans ce domaine. Ainsi le groupe de Télédéttection du Centre national d'études des télécommunications (CNET), qui cherche à développer l'utilisation des techniques hyperfréquences embarquées sur avion ou satellite pour l'observation des ressources terrestres, a lancé une campagne, en liaison avec l'INRA et le Cemagref, pour observer la végétation. Le radar ERASME (Etude radar des sols et de la mer), mis au point par la division RPE, était destiné à observer la forêt tropicale en Guyane française du 21 septembre au 10 octobre 1986, afin de déterminer ses caractéristiques et sa variabilité (variation diurne, effet de la pluie...). Ces études expérimentales ne sont pas encore exploitées, mais elles indiquent que l'onde radar, capable de pénétrer la forêt jusqu'au niveau du sol, peut fournir une information sur la structure verticale de la végétation à l'intérieur de la forêt.

L'une des applications de SPOT (Satellite pour l'observation de la terre) vise également la végétation. Les spécialistes considèrent, en effet, comme très positif l'apport du cliché spatial pour avertir de phénomènes non visibles depuis le sol, évaluer la qualité des récoltes, dresser un inventaire des ressources ligneuses, procéder à des comparaisons entre espace cultivable et espace cultivé...

Des logiciels sont développés pour interpréter ces images de télé-déttection. C'est le cas de Multiscopie (Cap Gemini Sogeti) qui,



Fleur générée par AMAP et visualisée à l'aide du logiciel Wavefront Technologies.

doté de fonctions de gestion des données images, de visualisation, d'analyse, de traitement et de classification d'images, peut être appliqué aux recensements et suivi de l'évolution et de la santé des cultures, prévision de récolte, analyse de catastrophes naturelles (inondation, sécheresse, maladie des végétaux), au suivi de l'évolution d'une forêt, de la santé des arbres, de leur recensement... A l'heure actuelle, aucune application de ce type n'a encore été développée pour Multiscopie.

Halte aux feux de forêts

L'informatique constitue également une arme contre les feux de forêts. Au début de l'été 1987, les services de lutte contre les incendies des Alpes-Maritimes ont installé un des tout premiers systèmes experts permettant une analyse plus rapide et plus sûre des risques.

Développé par le groupe Intelligence artificielle et systèmes experts de l'École des Mines de Paris, à Sophia Antipolis, Expert-graph simule, en effet, le risque potentiel de propagation du feu si celui-ci devait se déclarer, et le présente sur écran à l'aide de cartes du département comportant des zones de couleurs différentes selon les degrés de danger. Les pompiers peuvent alors intervenir plus efficacement. Ecrit en Pascal et tournant sur ordinateur MicroVax de Digital, il prend en compte la végétation, la topographie, les risques particuliers tels que les habitations et sites industriels, le vent, l'humidité, la température, etc. Pour ces dernières connaissances, le système est relié par le réseau téléphonique à des banques de données de la météorologie nationale.

Afin de lutter plus efficacement contre les incendies de forêt, un étonnant système anti-incendie a été mis au point par Protect Forest, une PME varoise, avec l'aide de

l'Anvar. Pégase, tel est son nom, est un réservoir d'eau sous pression, enterré et prêt à jaillir à la première alerte fournie par un réseau de capteurs de température fixés aux arbres voisins et gérés par une centrale d'alarme à microprocesseurs. Quatre de ces installations fonctionnent actuellement au voisinage de l'autoroute du Sud, et deux autres sont à l'étude pour le parc industriel de Sophia-Antipolis.

Des plantes, des jeux et des hommes

Pour conclure sur une note moins grave, signalons que de nouveaux jeux sur ordinateur mettent en scène des végétaux. C'est le cas de « Canadair », logiciel commercialisé par France Image Logiciel, qui simule le rôle et les fonctions d'un « pompier du ciel ». Dans « Garden Party », un jeu d'arcade de Free Game Blot, le joueur doit aider le jardinier dans ses différentes tâches : plantation, arrosage, récolte, lutte contre les insectes et contre les caprices de la météorologie.

Enfin, nous pouvons, avec J.-M. Attonaty, nous poser la question : « Pourquoi les informaticiens sont-ils arrivés plus tard en agriculture que dans certains autres secteurs ? » Probablement parce que les données sont beaucoup plus complexes, qualitatives, changeantes, incertaines, et qu'il a fallu attendre l'avènement de l'intelligence artificielle et des systèmes fondés sur la logique floue (cf. *Micro-Systèmes* n° 64, p. 93, mai 1986) pour voir apparaître des bouleversements dans les rapports entre les agriculteurs, botanistes, instituts de recherche fondamentale et appliquée, techniciens agricoles, bref, l'ensemble des professions gravitant autour des végétaux.

Claire Rémy

Bibliographie

- (1) « L'image de synthèse en quête de réalisme », par Michel Fantin, *La Recherche*, n° 167, p. 830, juin 1987.
- (2) « Simulation de l'architecture des arbres », par P. de Reffye, C. Edelin, M. Jaeger, C. Cabart, Colloque international *L'arbre*, Montpellier, 9-14 septembre 1985.
- (3) « Synthèse d'images de feuilles végétales », par P. Lienhardt et J. Françon, *Mari* 87, 18-22 mai 1987.
- (4) « Modélisation de l'architecture des arbres par des procédés stochastiques », thèse de doctorat d'Etat, par P. de Reffye, Université de Paris-Sud, Orsay, 1979.
- (5) « Modélisation de la géométrie d'un couvert végétal : cas du maïs », par F. Aries, P. Monestiez, P. de Reffye et L. Prevot, *Mari* 87, 18-22 mai 1987.
- (6) « Les fractales, les ordinateurs et l'ADN », par P. Oppenheimer, *Mari* 87, 18-22 mai 1987.
- (7) « Pourquoi les systèmes experts ? » par J.-M. Attonaty, *Purpan* 438, 1986, p. 1-4.