

MODÉLISATION DE L'ARCHITECTURE DES ARBRES. APPLICATIONS FORESTIÈRES ET PAYSAGÈRES

Ph. de REFFYE - F. BLAISE

Les simulations numériques des modèles mathématiques se sont beaucoup développées dans les secteurs de la recherche et de l'industrie au cours des dernières décennies, grâce à la puissance sans cesse accrue des ordinateurs. Tester le comportement en vol d'un avion ou la résistance au choc d'une voiture avant de les avoir construits est maintenant possible. Cela permet non seulement de gagner du temps, mais aussi de faire des économies de moyens. Ces techniques avancées sont avant tout utilisées dans les domaines où les modèles mathématiques sont particulièrement efficaces, c'est-à-dire là où la physique joue un grand rôle (mécanique, thermodynamique ...). Les hypothèses de base et l'identification des paramètres de ces modèles sont en général très simples, même si les développements mathématiques issus de ces théories sont complexes.

La biologie marque un retard certain sur la physique. Les domaines où les simulations sur ordinateur sont utilisées restent rares ; on peut citer la dynamique des populations ou la génétique quantitative. La raison provient principalement de la difficulté d'identifier des modèles avec des paramètres consistants. Il est cependant une nouvelle application qui semble émerger et qui est prometteuse en ce qui concerne le calcul numérique : c'est celle de la croissance et de l'architecture des plantes. Réaliser des simulations dans les domaines de l'agronomie et du paysage permettrait en effet de faire des économies considérables sur les surfaces au sol occupées par les expérimentations et également sur le temps, si l'on songe que certaines expériences, pour être validées en foresterie, nécessitent plus de cinquante années.

Il est raisonnable de penser, comme nous allons essayer de le montrer, qu'un nombre croissant d'applications numériques va être mis en place dans un futur proche, grâce aux avancées obtenues en architecture des plantes.

ÉTAT DE L'ART EN MATIÈRE DE MODÉLISATION DE LA CROISSANCE ET DE LA PRODUCTION VÉGÉTALES

Les principaux types de modèle

Il existe plusieurs types d'approche classique en modélisation de croissance et de production végétales (Houllier *et al.*, 1991 ; Françon, 1990 ; Kurth, 1992) :

1. **Les modèles de type statistique**, basés sur les techniques de régression. Ils concernent l'évaluation du comportement de peuplement. L'arbre individuel n'est évidemment pas concerné.

2. **Les modèles de production végétale** en milieu contrôlé intègrent les paramètres physiques (température, lumière, ressources) et des connaissances en physiologie. Ils sont surtout utilisés

sur des plantes annuelles (tomates, cotonnier). La morphologie de la plante y est ignorée, bien que la biomasse produite soit calculée.

3. **Les modèles de compétition.** Chez ces derniers, des paramètres morphologiques rudimentaires sont pris en compte. Des modèles simples de houppier (cône, ellipsoïde) sont mis en œuvre et permettent l'estimation de production de bois en fonction de la densité. Les interactions entre arbres sont gérées par les contacts entre volumes simples engendrés (Mitchell *et al.*, 1983 ; Ottorini, 1978).

4. **Les modèles morphologiques** qui construisent des maquettes tridimensionnelles par simulation informatique. Ils sont basés sur les connaissances botaniques en architecture végétale, et sont avant tout descriptifs. L'architecture végétale possède en effet ses propres règles d'organisation interne, bien que le résultat d'une croissance soit lié aux paramètres physiques du milieu dans un environnement donné. Une même structure végétale peut avoir été réalisée plus ou moins rapidement. La plupart des modèles morphologiques existants proviennent de l'informatique et mettent en œuvre des algorithmes spécialisés dans la construction d'arborescences. Les connaissances qualitatives intégrées de ces modèles sont assez sommaires et leur utilisation se situe essentiellement dans le domaine de l'image de synthèse (Prusinkiewicz *et al.*, 1988 ; de Reffye *et al.*, 1988).

5. **D'autres types de modèle spécialisé** sont utilisés en mécanique ou en transfert de matière.

En définitive, tous ces modèles se complètent les uns les autres et, de toute évidence, un modèle général qui engloberait à la fois les problèmes de morphologie et d'interaction avec le milieu aurait une polyvalence remarquable dans ses applications agronomiques.

Rôle central du modèle morphologique

L'architecture d'une plante est le résultat de l'activité des bourgeons. Les branches sont de véritables trajectoires. Les paramètres physiques de l'environnement agissent directement sur l'activité des bourgeons, qui croissent, meurent et ramifient selon des lois probabilistes commandées par le milieu ambiant.

Ceci nous montre que les modèles morphologiques (type 4) doivent être logiquement interfacés avec les modèles de production végétale (type 2). Leur association réussie devrait alors à moyen terme remplacer dans leur propre domaine les modèles statistiques et de compétition (types 1, 3 et 5).

Les modèles morphologiques jouent un rôle central, car on peut les rattacher aux domaines d'application où la production végétale est liée à la croissance et à l'architecture.

Un végétal contient des informations de type qualitatif et de type quantitatif, à deux niveaux différents :

- élémentaire (entre-nœuds, feuilles...),
- global (stratégie de croissance, de floraison...).

Ces caractéristiques doivent être obligatoirement intégrées dans le modèle morphologique pour qu'il puisse rendre compte fidèlement de la structure végétale.

LE MODÈLE DE CROISSANCE ET D'ARCHITECTURE DES PLANTES DU CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche agronomique pour le Développement)

Le modèle conçu au CIRAD est original car il a été développé à partir des connaissances qualitatives de la botanique, auxquelles se sont ajoutées des connaissances quantitatives acquises au cours des expériences agronomiques. Son approche est donc de nature expérimentale et non algorithmique (de Reffye *et al.*, 1993).

Les connaissances qualitatives en architecture végétale intégrées dans ce modèle sont issues des recherches des botanistes Hallé et Oldeman. Ceux-ci ont défini, à partir de concepts simples (mode de croissance, de ramification, de floraison, d'orientation d'axes), les notions de modèle architectural et de réitération. Ces notions sont essentielles pour tout travail de modélisation concernant l'architecture des plantes. Elles ont été exposées dans le numéro spécial « Arbre en ville » de cette même revue et le lecteur peut s'y reporter (Edelin et al., 1989).

Les connaissances quantitatives proviennent essentiellement des expériences agronomiques effectuées au CIRAD outre-mer ou dans des centres agronomiques français (INRA, CTIFL ...). Le but recherché est principalement de quantifier une production végétale, soit au niveau de l'individu, soit au niveau d'une plantation, à partir d'une simulation tridimensionnelle de la plante aussi exacte que possible.

La modélisation de la croissance de l'arbre se fait au niveau du fonctionnement des bourgeons. Le fonctionnement élémentaire d'un bourgeon repose sur trois processus distincts qui sont de nature stochastique (de Reffye et al., 1991) : le processus de croissance, le processus d'arrêt (mortalité, pause), le processus de ramification (branches, feuilles, fleurs). Les bourgeons contiennent un méristème terminal fabriquant une réserve d'ébauches (croissance apicale) qui se déploient au cours de la poussée végétative (croissance internodale). Chez les arbres tempérés, la première pousse de printemps est appelée préformée car son ébauche a été fabriquée l'année précédente. Une deuxième poussée végétative peut avoir lieu ensuite si l'axe est vigoureux ; on parle alors de néoformation. Dans ce cas, de nouvelles ébauches ont été fabriquées et se sont immédiatement allongées. Ce mécanisme fabrique l'unité de croissance (UC) qui est la portion d'axe fabriquée lors de la poussée végétative. Les axes végétatifs sont ainsi fractionnés en unités de croissance morphologiquement distinctes. Le temps variable qui sépare l'allongement de deux nouveaux entre-nœuds fait que, pour un ordre de ramification donné, les UC sont constituées d'un nombre d'entre-nœuds variable et forment une distribution statistique qui caractérise l'interaction entre le fonctionnement endogène des méristèmes et le milieu. Les processus d'arrêt peuvent être de plusieurs natures : pause de longue durée, mortalité accidentelle, métamorphose terminale en stade floral. À partir des données relevées sur un arbre, des probabilités précises peuvent être associées expérimentalement au fonctionnement des bourgeons. L'aspect aléatoire des processus de croissance et de mort des axes végétatifs est très bien modélisé, expérimentalement parlant, par les théories du renouvellement et de la fiabilité.

À titre d'illustration, la photo 1 (p. 132) nous montre la simulation de deux années consécutives du fonctionnement aléatoire des branches maîtresses d'un Abricotier.

Au niveau de l'axe végétatif, il existe un gradient interne de différenciation physiologique. Le bourgeon « vieillit » au fur et à mesure de l'édification de l'axe. On parle d'**âge physiologique**. Ce vieillissement entraîne une diminution de la vigueur des UC et une augmentation des potentialités florifères, c'est la **métamorphose végétale**.

Le processus de ramification possède une double particularité, quantitative et qualitative. Sur le plan quantitatif, la ramification peut se modéliser comme une succession de séries d'entre-nœuds branchés et d'entre-nœuds non branchés. La connaissance de la distribution de ces séries donne tout le processus de ramification (probabilité d'avoir une branche, nombre de branches par UC, etc.). Son caractère aléatoire est bien modélisé par la théorie des chaînes de Markov. Sur le plan qualitatif, les axes secondaires portés par une UC peuvent être de nature différente, c'est-à-dire d'âge physiologique variable. Il est courant d'observer une acrotonie qui décrit la diminution de vigueur des axes secondaires du sommet de l'UC vers sa base. Les axes courts sont âgés physiologiquement et assurent l'exploitation de la lumière et la reproduction, tandis que les axes longs ont un rôle d'exploration de l'espace. Au sein d'une même architecture, il existe donc deux âges : l'âge réel et l'âge physiologique. Un bourgeon peut ainsi naître vieux ! Le contrôle de l'évolution de ces deux âges au sein d'une architecture végétale assure celui de son développement.

La photo 2 (p. 132) nous montre, sur un cas d'école, l'évolution progressive de l'âge physiologique le long des axes et l'évolution brutale pour la ramification, ainsi que la disparition progressive de l'acrotonie lors du vieillissement des unités de croissance.

EXEMPLE DE SIMULATION DE LA CROISSANCE D'UN ARBRE : LE MERISIER

Les prises de données sur le terrain permettent de construire un fichier hiérarchisé selon les ordres de ramification où sont consignés les renseignements topologiques (agencement des entités élémentaires qui constituent la plante, nombre d'entre-nœuds, d'axillaires) et géométriques (longueur, angle, diamètre) des unités de croissance d'un arbre.

L'exploitation statistique de cette base de données constituée à partir de mesures expérimentales permet de transformer ces informations statiques en informations dynamiques qui contrôlent les trois types de fonctionnement des bourgeons (croissance, mort, ramification) selon la méthode développée au CIRAD. L'estimation des paramètres stochastiques du modèle s'effectue à l'aide du logiciel **AMAPMOD** conçu par les chercheurs du laboratoire. Un fichier paramètre associé à la plante est alors créé. Après lecture de ce fichier, le logiciel de simulation de croissance **AMAPSIM**, encore appelé **moteur de croissance**, construit une maquette tridimensionnelle de l'arbre aussi exacte que possible sur les plans topologiques et géométriques.

La modélisation des données prises sur le terrain, puis la simulation de la croissance de l'arbre nécessitent un outil informatique adéquat. Ainsi, l'utilisation de stations de travail spécialisées, dotées d'une mémoire et d'une puissance de calcul importantes, et disposant de fonctionnalités graphiques performantes, apparaît indispensable. Par ailleurs, les techniques algorithmiques employées, notamment dans la simulation, sont diverses et d'une complexité qui se retrouve dans l'arbre lui-même.

De l'observation de terrain à la simulation des plantes, il existe donc une chaîne de traitements numériques où l'informatique joue un rôle essentiel.

La photo 3 (p. 132) montre un exemple de simulation tridimensionnelle de Merisier étudié par D. Fournier (Fournier, 1989).

DOMAINES D'APPLICATION DE LA SIMULATION DE L'ARCHITECTURE DES ARBRES FORESTIERS

Le CIRAD et l'INRA collaborent étroitement pour développer les champs d'application de cette nouvelle méthodologie et nous ne parlerons ici que des perspectives dans le domaine forestier.

Connaissance quantitative de l'arbre

L'application du modèle mathématique nécessite une qualité exceptionnelle de l'observation botanique. Il en résulte une meilleure connaissance de l'arbre en ce qui concerne son fonctionnement, la mise en place de son architecture (fourchaison, volume du houppier, etc.) et sa fructification. En plus des arbres tropicaux (Caféier, Cacaoyer, Hévée, Litchi...), les arbres tempérés étudiés sont l'Épicéa, le Mélèze, le Cèdre, le Douglas et le Cyprès pour les conifères, et le Hêtre, le Merisier, le Noyer et le Châtaignier pour les feuillus.

Les traitements des mesures permettent d'établir des maquettes en trois dimensions de grande qualité pour divers types d'application.

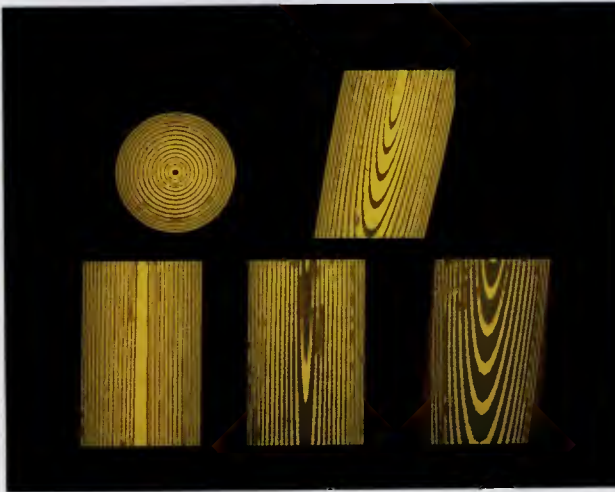
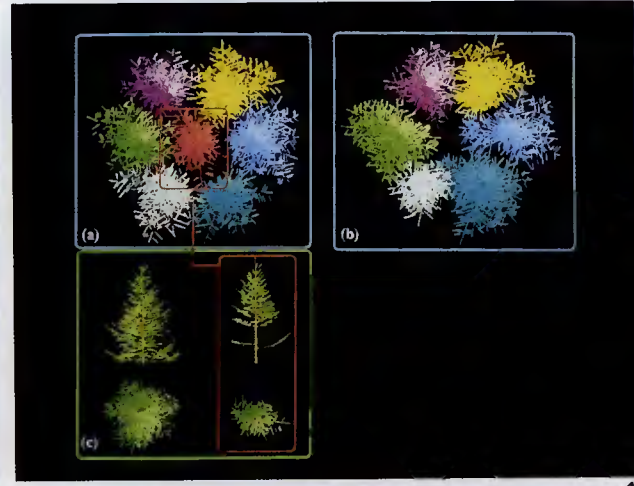
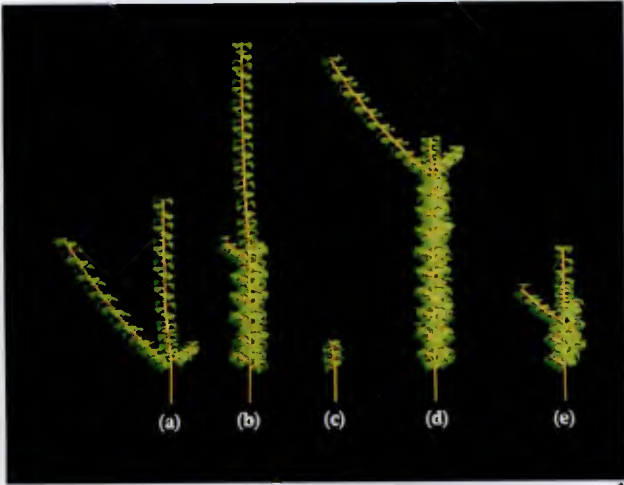


Photo 1

Variabilité d'une poussée végétative de branches d'Abricotier sur 2 ans (sans polycyclisme ni anticipé). La branche (c) n'a fait que de la préformation, alors que la branche (b) a fait deux fois une importante néoformation. Les branches (a), (d) et (e) ont eu des réalisations aléatoires diverses. A noter les manchons d'axes courts sur les parties néoformées de l'année précédente et leur absence sur l'année courante.



Photo 2

Évolution de l'âge physiologique dans l'architecture d'un arbre. La couleur verte symbolise un âge physiologique jeune et la rouge un âge vieux. A noter la disparition de l'acrotonie au cours du vieillissement.



Photo 3

Simulation de l'architecture et de la croissance d'un Merisier (7, 10, 14, 17 et 21 ans)

Photo 4

Influence des arbres voisins sur le développement d'un individu. Interactions inter-arbres faible et forte (a et b). A noter la disparition de l'arbre au centre du bosquet dans (b). (c) Architecture d'un arbre isolé et de l'arbre au centre du bosquet dans (a).



Photo 5

Visualisation de sections transversale et longitudinale d'une grume (INRA-CIRAD)

Photo 6

Croissance et flexion d'un arbre sous son propre poids (LRBB-CIRAD)

Photo 7

Simulation d'une palmeraie et calcul du taux de lumière arrivant au sol

Photo 8

Paysage canadien

Photo 9

Forêt de Chichibu au Japon (Université forestière de Chichibu-Université de Tokyo-CIRAD)

7

8

9

Photos CIRAD-Unité de Modélisation des Plantes

Simulation de plantations

La croissance en diamètre des troncs d'arbre est liée à la taille du houppier qui est d'autant moins grande que la densité du peuplement est forte. Le logiciel de simulation mis au point au CIRAD permet de faire pousser des arbres simultanément et de gérer leur interaction (gêne entre arbres) (photo 4, p. 132) (Blaise, 1991). Il semble raisonnable de penser qu'en se calant sur des données réelles il sera possible de modéliser cette interaction, et donc de faire de véritables simulations de plantation sur ordinateur, permettant d'associer à une densité donnée une architecture de l'arbre et une qualité du bois précises.

Par ailleurs, des équipes de l'INRA et de l'ENGREF ont justement développé les logiciels **CEP** et **SIMQUA** qui modélisent la croissance en diamètre et la qualité attendue d'un billon donné en fonction de la densité du peuplement et des éclaircies (Leban *et al.*, 1991). Une interface avec AMAPSIM (photo 5, p. 132) devrait permettre de réaliser un outil logiciel adapté à l'optimisation de la production de bois et de remplacer en partie des essais agronomiques encombrants, longs et coûteux par de véritables simulations. Notons que, à moyen terme, cette méthode devrait être extensible à des mélanges d'espèces et à des populations non nécessairement équiennes.

Qualité du bois et équilibre mécanique

La rectitude des fûts est liée d'une part à l'absence de fourchaison, mais d'autre part aussi à l'équilibre statique de la structure de l'arbre sous son propre poids. La flexion et la torsion des troncs engendrent des défauts externes de rectitude avec, en plus, des modifications internes de la qualité du bois par la création de bois de réaction (Castera et Morlier, 1991).

Il est donc important d'avoir un module de mécanique couplé au logiciel AMAPSIM pour calculer les contraintes internes dans l'architecture de l'arbre liées aux processus de croissance. De plus, de nombreuses plantes, notamment les buissons, les arbres fruitiers, ont une stratégie de croissance liée aux courbures des branches. Le Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (LRBB) met au point un logiciel de mécanique dans ce sens interfacé à AMAPSIM (photo 6, p. 132) (Fourcaud et Lac, 1993).

Transfert radiatif dans le couvert végétal

Pour des applications de bioclimatologie, une modélisation du couvert végétal est utile car elle fournit un modèle expérimental d'interception de la lumière supérieur aux modèles théoriques qui sont des approximations souvent invérifiables. Dans le cas du Palmier à huile, la constitution de maquettes 3D a permis de tester sur un cas réel l'équivalence entre les éclaircissements au sol observés et calculés (photo 7, p. 133). Cela permet de simuler les transferts radiatifs pour des densités de peuplement variables, sans avoir à effectuer les plantations, et d'optimiser les écartements entre arbres dans le cas de cultures associées au Palmier (Dauzat, 1990).

Autres types d'application forestière

Certains sujets spécifiques liés à l'architecture ont été abordés au CIRAD. Ainsi, une étude sur la résistance à la casse au vent chez l'Hévéa (Fournier *et al.*, 1993) a été menée avec le LRBB. Une autre étude sur l'influence des mélanges de plantes et de leur densité sur la propagation des incendies de forêts est en cours de réalisation. Il est clair qu'un grand nombre d'applications est possible dans le domaine de l'architecture des plantes dès lors que les espèces concernées ont été correctement modélisées.

Application paysagère

Une application professionnelle importante est la visualisation de projets d'urbanisme ou des grands travaux d'aménagement de l'espace rural ou forestier. En effet, l'intégration des plantes

et des bâtiments dans un paysage et leur évolution dans le temps jouent un rôle important dans les décisions des collectivités locales qui doivent tenir compte des contraintes liées à la préservation de la qualité de l'environnement.

L'Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD a développé un programme de conception tridimensionnelle du paysage qui est un véritable logiciel de synthèse d'images. Ce logiciel, baptisé **AMAP**, cité à l'état de prototype dans cette revue (Edelin *et al.*, 1989), a été maintenant largement diffusé (Europe, Amérique, Japon) chez les collectivités locales (Ville de Nantes) et dans des écoles du paysage (Versailles, Lullier). Toutes les illustrations de cet article ont été réalisées à l'aide d'AMAP.

Ce logiciel comprend les modules suivants :

- une base de données de plus de 200 plantes provenant de différents continents (arbres, arbustes, buissons, plantes d'intérieur),
- le moteur de croissance qui permet de générer à partir d'un fichier de la base de données une maquette tridimensionnelle de la plante à l'âge voulu en intégrant des effets de saison, de taille ...,
- un générateur de terrain à partir de données topographiques,
- une interface qui permet de lire les objets, les ouvrages, les reliefs conçus sur d'autres logiciels (ex. AUTOCAD),
- un module de rendu rapide permettant de colorer les objets, de calculer les ombres, les reflets et de plaquer de la texture,
- un module d'animation.

Par ailleurs, le moteur de croissance et sa base de données de végétaux ont été également intégrés dans les grands logiciels d'images de synthèse : TDI, SOFTIMAGE, WAVEFRONT.

Le logiciel AMAP permet donc de décrire des paysages complexes et de les visualiser aisément sous des points de vue différents.

Sur la photo 8 (p. 133), l'observateur se trouve à l'intérieur d'un parc aménagé. La qualité du détail est donc importante. Une fois l'âge et l'emplacement des espèces définis, la qualité du rendu est obtenue grâce à la précision des maquettes végétales et grâce aux techniques de synthèse d'images employées.

L'approche de la photo 9 (p. 133) est différente. Ici, l'observateur visualise un massif forestier dans son ensemble. Seule compte alors la vue globale et la précision des maquettes végétales est négligeable. Par contre, la difficulté réside dans la plantation d'un grand nombre d'arbres sur un site géographique précis. Les données nécessaires ont été fournies par un Système d'Information géographique qui détermine l'emplacement et les contours des plantations, ainsi que les densités et les mélanges des espèces.

CONCLUSIONS

Les progrès accomplis durant la dernière décennie dans la connaissance de l'arbre, tant sur un plan qualitatif que quantitatif, l'augmentation des performances des ordinateurs, permettent de penser que les techniques de simulation de plantation pourraient jouer un rôle nouveau dans le domaine de la foresterie.

Le but visé est de diminuer notablement la surface des essais implantés, et de gagner également en temps sur leur durée d'exploitation grâce aux capacités prévisionnelles de la simulation.

S'il reste un travail de recherche agronomique important à accomplir par les chercheurs impliqués dans cette modélisation, il existe d'ores et déjà une application opérationnelle en matière de conception et d'aménagement du paysage.

Ph. de REFFYE - F. BLAISE
Unité de Modélisation des Plantes
CENTRE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE
EN RECHERCHE AGRONOMIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
BP 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX 1

BIBLIOGRAPHIE

- BLAISE (F.). — Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et application. — Strasbourg : Université Louis-Pasteur, 1991 (Thèse n° 1071, spécialité Informatique).
- CASTERA (P.), MORLIER (V.). — Growth patterns and bending mechanics of branches. — *Trees*, n° 5, 1991, pp. 232-238.
- DAUZAT (J.). — Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques d'*Elaeis guineensis*. — Montpellier : Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD, 1990 (Rapport interne, ATP n° 222/IRHO).
- EDELIN (C.), REFFYE (Ph. de), JAEGER (M.), DINOUARD (P.). — La Simulation de l'architecture des arbres et son rôle potentiel dans la conception et la gestion des arbres urbains. — *Revue forestière française*, vol. XLI, n° spécial « L'arbre en ville », 1989, pp. 143-153.
- FOURCAUD (Th.), LAC (P.). — Modélisation mécanique de la croissance des végétaux. In : Colloque national en calcul des structures, Giens, 11-14 mai 1993. — INRIA (à paraître).
- FOURNIER (D.). — Modélisation de la croissance et de l'architecture du Merisier (*Prunus avium* L.). — Montpellier : École nationale supérieure agronomique, 1989 (Diplôme d'Agronomie approfondie).
- FOURNIER (M.) *et al.* — Modélisation mécanique des vibrations propres d'un arbre soumis aux vents, en fonction de sa morphologie. — *Annales des Sciences forestières* (à paraître).
- FRANÇON (J.). — Sur la modélisation informatique de l'architecture et du développement des végétaux. In : 2^e colloque international « L'Arbre ». — Montpellier : Institut de Botanique, 1990.
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- KURTH (W.). — Morphological models of plant growth : possibilities and ecological relevance. In : ISEM's 8th International Conference on the State-of-the-Art in Ecological Modelling, September 28-October 2, 1992, Kiel, 1992 (Germany).
- LEBAN (J.-M.), HOULLIER (F.), COLIN (F.). — La Qualité du bois d'Épicéa commun en liaison avec les conditions de croissance. — *Forêt Entreprise*, n° 80, 1991, pp. 11-27.
- MITCHELL (K.J.), OSWALD (H.), OTTORINI (J.-M.). — Modelling the growth of Douglas fir in France. — *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien*, 147, 1983, pp. 25-39 (Réunion IUFRO, Vienne, 1982).
- OTTORINI (J.-M.). — Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, n° 4, 1978, pp. 299-320.
- PRUSINKIEWICZ (P.) *et al.* — Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes. — *Computer Graphics*, vol. 22, n° 4, 1988, pp. 141-150.
- REFFYE (Ph. de) *et al.* — Plant models faithful to botanical structure and development. — *Computer Graphics*, vol. 22, n° 4, 1988, pp. 151-158.
- REFFYE (Ph. de), BLAISE (F.), GUEDON (Y.). — Modélisation et simulation de l'architecture et de la croissance des plantes. — *Revue du Palais de la Découverte*, vol. 21, n° 209, juin 1993, pp. 22-48.
- REFFYE (Ph. de), ELGUERO (P.), COSTES (E.). — Growth units construction in trees : a stochastic approach. — *Acta Biotheoretica*, vol. 39, 1991, pp. 325-342.