

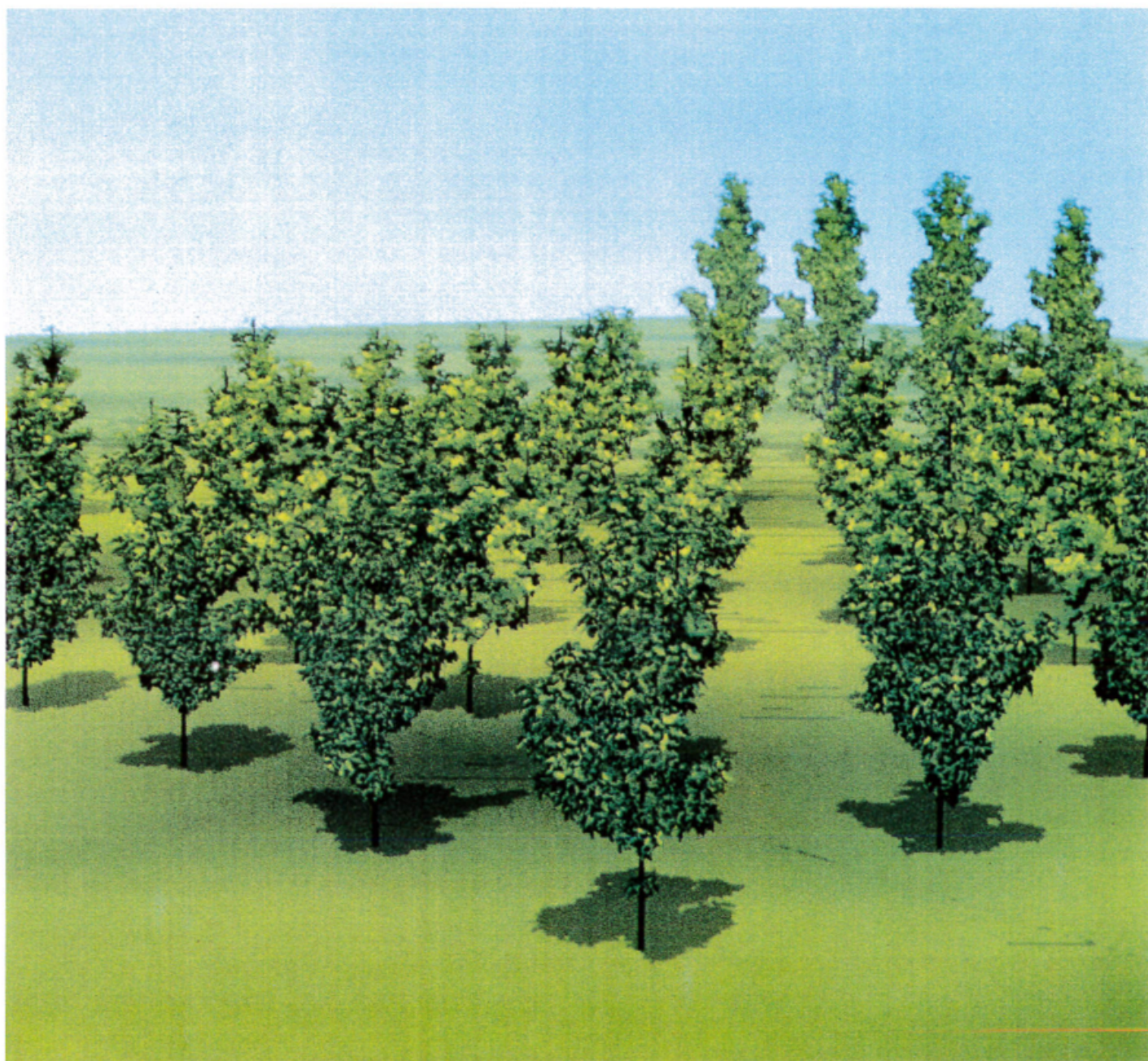
bulletin  
de la  
vulgarisation  
forestière

# forêt

entreprise



N° 73 - 1/1991  
Prix public : 45 F  
ISSN 0150-6404



- Modélisation et simulation de l'architecture des arbres
- Peuplier : "Alcinde mérite-t-il d'être inscrit au catalogue?"
- Libres propos : "Réflexions sur l'équilibre forêt-gibier"

# MODÉLISATION ET SIMULATION

Quelles que soient les préoccupations de chacun (forestier, arboriculteur, élagueur, paysagiste...), la gestion de l'arbre passe nécessairement par une bonne connaissance de son développement.

Jusqu'à une époque récente, cette connaissance était essentiellement empirique ou trop partielle. Ainsi, la plupart des études morphologiques ou physiologiques ne concernait qu'une partie du végétal (bourgeon, rameau...) ou une fonction particulière de ce dernier (floraison, fructification, ramification...). Face à la complexité de la structure arborescente, ce savoir fragmentaire s'est très souvent révélé insuffisant et a montré la nécessité d'une approche globale et dynamique de l'arbre. La difficulté d'une telle démarche est qu'il faut intégrer à la fois des variables quantitatives et qualitatives pour rendre compte de la nature et de la position relative des différentes parties d'une plante puis de leurs variations au cours du développement et en fonction de l'environnement. Ce mode d'analyse du végétal impliquait nécessairement le regroupement de diverses disciplines.

Une première étude sur le caféier en Côte-d'Ivoire avait permis à Philippe de Reffye, actuellement directeur du Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement - Gestion, recherche, développement et appui technique) de Montpellier, de modéliser mathématiquement le développement de cette plante afin d'en prévoir la production en fruits. L'application des concepts d'architecture développés en botanique par les Professeurs F. Halle (1) et R.A.A. Oldeman (2) devait permettre par la suite d'élargir cette méthode à l'ensemble du règne végétal. Enfin l'application de nouvelles techniques informatiques a permis de développer un logiciel actuellement capable de simuler sur ordinateur le développement de tous les végétaux étudiés.

Le Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat compte aujourd'hui une quinzaine de chercheurs (botanistes, mathématiciens, agronomes, informaticiens) dont le but est de mieux comprendre le végétal afin de mieux le gérer. Grâce à une collaboration active avec divers organismes tels que l'Institut pour le développement forestier (Idf), l'Institut national de la recherche agronomique (Inra), le Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes (Ctifl),... de nombreuses espèces arborescentes, forestières et fruitières, sont actuellement à l'étude en France. Ces travaux ont permis la mise au point d'une méthode d'analyse fine des arbres dont la démarche générale est présentée dans les lignes qui suivent.

## L'analyse architecturale

La plupart des espèces sont directement identifiables par leur silhouette ou leur port. Ces notions physiologiques sont certes très utiles pour la reconnaissance des arbres, mais ne permettent en aucun cas d'en comprendre le fonctionnement. La forme adulte d'un individu repose en fait sur une structure élaborée au fil des ans et qui reflète une organisation interne très précise du végétal.

L'architecture d'une plante dépend de la nature et de la position relative de ses différentes parties. Elle est à tout instant le résultat d'un équilibre entre le mode de croissance propre à l'espèce et l'influence de son environnement. L'analyse architecturale a pour but d'interpréter la structure de l'arbre et de comprendre les mécanismes qui lui ont donné naissance. L'arbre est abordé dans sa totalité et l'ensemble des organes qui le constituent est considéré. Pour un stade donné, les caractéristiques morphologiques et la disposition relative de tous les axes sont décrites et représentées sous forme d'un schéma. L'analyse d'individus d'âge croissant permet alors de définir l'évolution architecturale d'une espèce. On aboutit ainsi à une série de schémas qui représentent la succession des étapes ayant conduit l'arbre de la germination au stade adulte.

(1) Actuellement Professeur de botanique au laboratoire de botanique de l'Université Montpellier III.

(2) Actuellement Professeur à l'Université de Wageningen en Hollande.

# DE L'ARCHITECTURE DES ARBRES

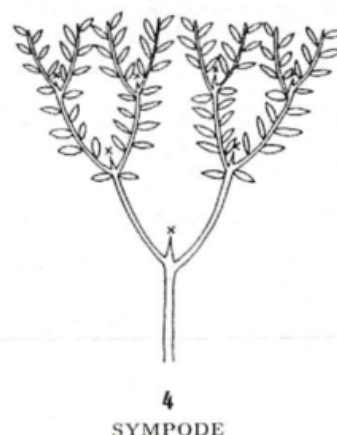
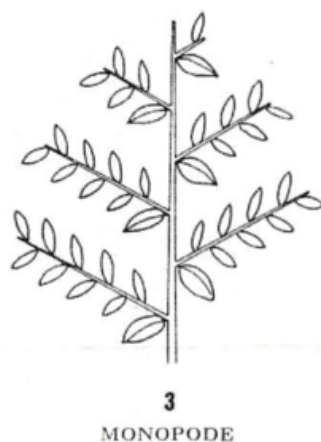
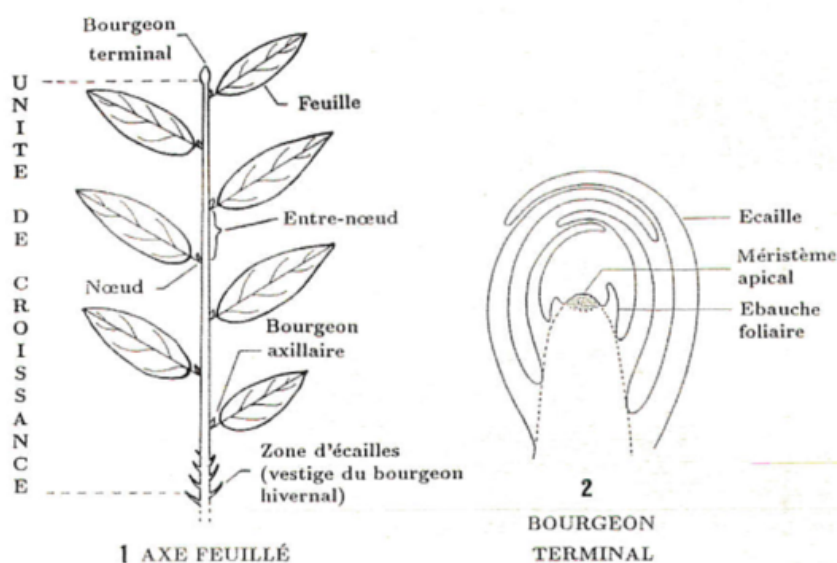
## Les critères morphologiques de l'analyse structurale

Les feuilles d'une plante s'insèrent sur la tige au niveau des nœuds dont chacun est séparé du précédent et du suivant par une portion que l'on appelle l'entre-nœud. La succession de ces éléments constitue l'axe feuillé (1) qui représente la structure élémentaire de l'architecture d'une plante. Lorsque la croissance est rythmique (ce qui est le cas de la plupart des plantes), la portion d'axe mise en place au cours d'une poussée végétative est appelée une unité de croissance (U.C.).

Toute tige porte à son extrémité une partie embryonnaire : le méristème apical (2) qui, en phase de repos, est généralement protégé par des écailles (l'ensemble forme alors le bourgeon terminal). En phase active, ce méristème forme les tiges et initie le développement des feuilles et des méristèmes axillaires qui se logent à la base de ces dernières. Le mode de développement de ces structures embryonnaires détermine la disposition spatiale des feuilles (phyllotaxie) et par suite celle des rameaux.

Le mode de ramification est un autre élément clef de l'architecture des plantes. Dans le cas d'un sapin, l'axe principal (tronc ou branche) poursuit sa croissance indéfiniment et donne régulièrement naissance à des rameaux : ce mode de développement est dit monopodial et aboutit à un système ramifié qualifié de « monopode » (3). Un méristème peut aussi construire une portion de tige puis mourir (abricotier, orme, platane...) ou se transformer en épine (aubépine...), en vrille (vigne) ou en inflorescence (laurier rose). L'axe principal ne peut alors plus s'allonger et la poursuite de la croissance s'effectue par le développement d'un axe latéral qui prend le relais. Cette ramification est alors dite sympodiale et donne naissance à un « sympode » (4).

Ces différentes caractéristiques morphologiques permettent de classer les plantes en fonction de leur stratégie de croissance dénommée modèle architectural, dont chacun se définit par une combinaison particulière des caractères cités ci-dessus.



La série d'architectures prises par une plante au cours de son développement est appelée son «**modèle architectural**». Il correspond à la stratégie de croissance globale d'une

plante et se définit par une combinaison particulière de caractères morphologiques directement observables sur le terrain. Pour l'ensemble des végétaux étudiés à ce jour, il a été montré

que le nombre de ces modèles est restreint, chacune de ces modalités particulières de croissance pouvant être adoptée par de nombreuses espèces.



**Un exemple de modèle architectural non ramifié**

**Le modèle de Corner.**

*La plante est formée d'un axe unique et droit qui porte des inflorescences latérales (ex. : le palmier dattier).*

(Photo Cirad/Gerdat)

**Deux modèles architecturaux monopodiaux**

**A gauche, le modèle de Rauh.**

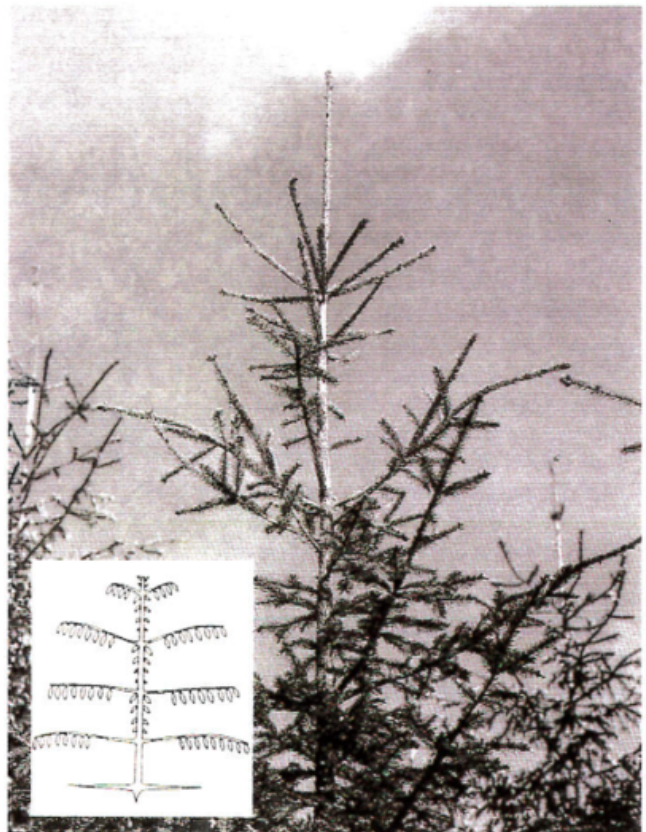
*Le tronc vertical porte des étages de branches également redressées (ex. : le pin noir).*

(Photo Cirad/Gerdat, D. Barthélémy)

**A droite, le modèle de Massart.**

*Le tronc vertical porte des étages de branches horizontales (ex. : le sapin).*

(Photo Cirad/Gerdat, D. Barthélémy)



## Deux modes de croissance originaux



### *Le modèle architectural de Troll.*

*L'arbre se construit par un empilement d'axes horizontaux ou obliques (ex. : le robinier).*

(Photo Cirad/Gerdat, D. Barthélémy)



### *Le modèle architectural de Fagerlind.*

*Le tronc porte des étages de branches «plagiotropes par substitution». Globalement horizontales, ces branches se construisent par la juxtaposition sympodiale de petits articles à floraison terminale (ex. : le magnolia à grandes fleurs).*

(Photo Cirad/Gerdat, D. Barthélémy)

## Le développement de l'arbre

L'analyse architecturale des végétaux montre que toute plante passe par un certain nombre de phases au cours de sa croissance. A partir de la germination le jeune arbre édifie un tronc. C'est la phase d'installation. Durant cette période, de durée variable selon l'espèce et les conditions de l'environ-

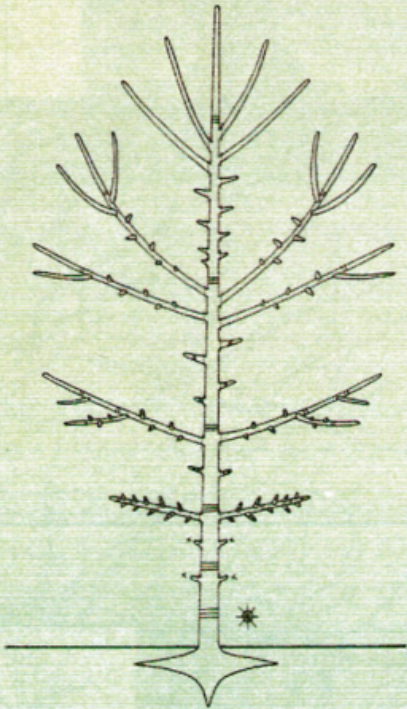
nement, la plante montre une architecture progressivement de plus en plus complexe. Sur le tronc, les premières branches apparaissent. Elles sont de plus en plus volumineuses et commencent elles-mêmes à se ramifier. Petit à petit une hiérarchie s'installe entre les différents axes de la plante, qui peuvent être regroupés en catégories (tronc, branches, rameaux...) dont chacune est identifiable par des caractéristiques propres. Pour chaque espèce

le nombre de catégories d'axes est fini et généralement petit. La description des caractéristiques de toutes les catégories d'axes, et de la façon dont elles dérivent les unes des autres constitue l'«*unité architecturale*» d'une espèce». A ce stade, l'arbre exprime son architecture élémentaire, véritable carte d'identité d'une espèce. Il croît essentiellement en hauteur et présente le plus souvent un tronc unique et droit.

## L'unité architecturale

*La description du mode de croissance (modèle architectural) et la caractérisation de tous les types d'axes d'une plante définissent son unité architecturale. Celle-ci peut être figurée sous la forme d'un tableau qui, accompagnée d'un schéma architectural, représente la structure fondamentale de l'espèce.*

### L'exemple du merisier : *Prunus avium* L. (famille des Rosaceae).



**Schéma architectural**

Tronc	Branche	Rameau court
Ramifié Ne s'élague pas	Ramifié Elagage entre 15 et 30 ans	Non ramifié Elagage entre 1 et 10 ans Porte la sexualité

**Caractéristiques des différentes catégories d'axes**

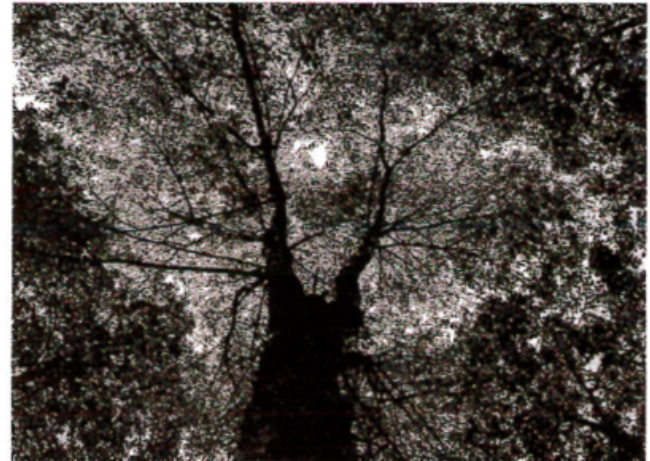


*Jeune merisier exprimant son unité architecturale.*  
(Photo Cirad/Gerdat, D. Barthélémy)

Chez certaines espèces le développement ultérieur de l'arbre peut se poursuivre sans grande modification de sa forme générale. Ainsi, chez le pin laricio, en l'absence de traumatisme, l'arbre reste conforme à son unité architecturale (il conserve un tronc unique) jusqu'à sa mort. Le plus souvent, néanmoins, la mise en place de la cime se traduit par une modification profonde de l'architecture de base. Chez la plupart des arbres forestiers, on observe en effet qu'au fur et à

mesure que la base du tronc se dénude, la cime de l'arbre a tendance à s'arrondir et s'élargir. Une analyse plus fine montre alors que divers axes entrent en compétition avec le tronc, ce phénomène pouvant aller jusqu'à la formation de fourches. Certaines branches peuvent même se redresser et acquérir une architecture identique à celle du tronc initial. **Au cours de cette «métamorphose architecturale», il y a donc répétition, duplication de l'architecture élémentaire de**

**l'arbre. C'est le phénomène de «réitération» par lequel s'édifient les branches maîtresses de l'arbre âgé.** La cime d'un tel individu prend alors l'aspect d'une véritable «colonie de petits arbres individuels». C'est la phase de «production» de l'arbre durant laquelle va s'effectuer un fort grossissement en diamètre du tronc tandis que la cime continuera à s'élargir en amplifiant ce phénomène de réitération.



#### La réitération chez le merisier : *Prunus avium* L.

• 1 : l'arbre non réitéré présente un tronc unique.

(Photo Cirad/Gerdar, Y. Caraglio)

• 2 : un exemple d'arbre réitéré : le tronc présente une fourche dont chaque élément reproduit l'architecture élémentaire (l'unité architecturale) de l'arbre jeune.

(Photo Cirad/Gerdar, D. Barthélémy)



#### Un exemple de cime établie par réitération

Chez un individu âgé de pin d'alep, le houppier semble constitué de plusieurs petits «arbres élémentaires» dérivant les uns des autres. Ces ensembles ramifiés sont le résultat de la duplication de l'architecture fondamentale : la réitération.

(Photo Cirad/Gerdar, D. Barthélémy)

Le développement d'un arbre s'inscrit donc dans une séquence précise et ordonnée d'événements marquée par une lente évolution de son architecture. L'analyse architecturale permet de

mettre en évidence la succession d'étapes qui jalonnent la vie d'un arbre. Toutefois, si cette approche est nécessaire pour connaître les mécanismes et les potentialités internes de

croissance d'une espèce, elle s'avère insuffisante pour estimer les variations quantitatives de l'architecture au sein d'une population ou dans des environnements différents.

### La métamorphose architecturale chez le peuplier

• **1 (à droite) :** l'arbre jeune exprime toutes ses catégories d'axes. Il est au stade de l'unité architecturale. Il présente un tronc unique et sa forme est pyramidale.

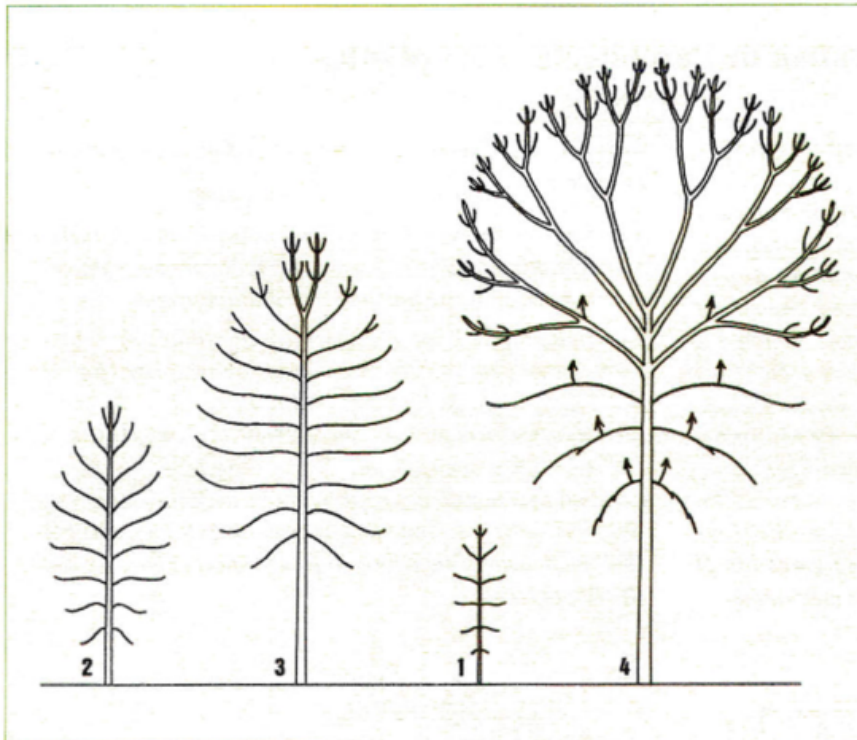
• **2 (en bas, à gauche) :** le sommet de l'arbre est constitué par des branches très redressées et vigoureuses dont le développement concurrence le tronc. Le redressement des branches s'accompagne de la formation de fourches et de décrochements qui commencent à apparaître sur le tronc. La cime est éclatée. L'architecture se modifie.

• **3 (en bas, à droite) :** la cime de l'arbre adulte est réalisée ; elle est régulière et arrondie. Une fourche apparaît très nettement. Le tronc s'est divisé en plusieurs branches maîtresses dont chacune duplique l'architecture élémentaire du peuplier ; c'est le résultat de la réitération.

(Photos Cirad/Gerdat, Y. Caraglio)







**Représentation schématique du mode de développement du frêne commun** (les axes ultimes ne sont pas représentés)

- 1 et 2 : l'arbre jeune exprime son unité architecturale. Le tronc vertical porte des étages de branches horizontales qui peuvent elles-mêmes se ramifier.
- 3 : l'augmentation du degré de ramification des branches s'accompagne de leur redressement. Elles commencent à concurrencer le tronc dont l'apex peut mourir. Il y a alors formation d'une fourche. C'est le début de la réitération et de la mise en place de la cime.
- 4 : lors du vieillissement de l'arbre, le phénomène de réitération se poursuit et s'amplifie vers la périphérie de la couronne dont la forme générale s'arrondit.

## L'analyse quantitative : la modélisation mathématique

L'architecture d'une plante est le résultat du fonctionnement de l'ensemble de ses méristèmes. Toute tentative de modélisation de l'arbre passe donc nécessairement par une analyse et une compréhension du mode de croissance de ces organes. Une première méthode consiste à effectuer des «suivis de croissance». Dans ce cas, on analyse à intervalles de temps réguliers tout ce qui est produit par le méristème d'un axe. Ce moyen d'étude est toutefois laborieux et ne permet d'analyser qu'un nombre restreint de rameaux. Pour éviter cette contrainte, le Laboratoire de modélisation du Cirad a mis au point une méthode d'analyse qui permet, à partir de données statiques relevées sur l'arbre, de calculer les paramètres dynamiques qui caractérisent le fonctionnement des méristèmes. Ce dernier peut être entièrement représenté par trois types de phénomènes :

- les processus de croissance que l'on apprécie en étudiant le nombre de feuilles ou d'entre-nœuds émis par un axe pendant une période définie (une année par exemple),
- les processus d'arrêt qui peuvent correspondre au repos hivernal de croissance mais aussi à la mort du méristème

ou encore à sa transformation en fleur-

- les processus de ramification qui correspondent à l'émission des branches et des rameaux.

Les arbres mesurés doivent provenir de populations homogènes en ce qui concerne l'âge des individus, leur origine génétique (on préférera des clones), leur lieu de culture (sol, climat, densité...). Une fois ces conditions réunies, l'analyse architecturale permet de regrouper dans l'arbre les axes qui sont homologues et qui constituent l'échantillon à étudier. Des comptages sont alors effectués sur un grand nombre d'individus. Pour un âge et des conditions données on notera par exemple le nombre d'entre-nœuds formés chaque année par tous les axes en fonction de la catégorie à laquelle ils appartiennent. Ceci permet de définir le processus de croissance. De même on notera le nombre d'entre-nœuds et la position relative de tous les rameaux sur la pousse annuelle d'une branche porteuse, ce qui rendra compte du processus de ramification.

Le regroupement des données aboutit à des histogrammes qui sont ajustés par des courbes théoriques exprimant la variabilité d'expression de chaque phénomène étudié. L'analyse mathématique permet ainsi de modéliser les distributions observées sur le terrain

par une «loi de croissance » dont les paramètres caractérisent le fonctionnement de l'arbre à un instant donné. Par cette méthode, il est ainsi possible de rendre compte de la variabilité observée dans la nature ou en plantation.

Ce type de modélisation est dit probabiliste car à chaque événement on attribue une probabilité de réalisation. Ses aspects quantitatifs en font un outil particulièrement utile en agronomie et en sylviculture.

- Ce mode d'analyse permet de caractériser et donc de mieux comprendre les différences de comportement entre espèces, clones ou variétés.

- La plante mesurée s'exprime localement par des distributions statistiques qui se décrivent par des fonctions aléatoires de la réalisation de tel ou tel événement (formation des entre-nœuds, des branches, des fleurs, des fruits...). Ces fonctions aléatoires expriment l'interaction entre la plante et l'environnement. Si on change par exemple ce dernier (dans des essais agronomiques contrôlés de densité, d'irrigation, d'élagage,...), on peut apprécier directement son influence sur la croissance de la plante. Il devient donc possible théoriquement d'optimiser une situation agronomique en recherchant l'optimum par

## La modélisation de l'architecture des plantes

Le nombre de feuilles (d'entre-nœuds) formées par un méristème est le reflet de sa vigueur.

Dans une population d'arbres de même âge et poussant dans les mêmes conditions, les unités de croissance (U.C.) sont regroupées en fonction de leur année de formation et de leur position sur la plante. Pour chaque lot d'unités de croissance comparables on note le nombre d'entre-nœuds qu'elles ont formés. Le regroupement des données permet d'établir un histogramme dans lequel les abscisses représentent le nombre d'entre-nœuds tandis que les ordonnées correspondent au nombre d'U.C. possédant un même nombre d'entre-nœuds.

L'analyse mathématique permet d'ajuster ces distributions à des courbes théoriques (courbes des figures 1 et 2) qui rendent compte du fonctionnement des méristèmes.

Les résultats obtenus montrent que ce fonctionnement se modifie :

- en fonction du type d'axes (fig. 1). Ainsi, chez un merisier, chaque catégorie d'axes (tronc, branche, rameau court) se caractérise par une distribution propre.
- en fonction de l'âge d'apparition des unités de croissance ce qui est illustré dans le cas de peuplier (fig. 2) par l'évolution de la distribution du nombre d'entre-nœuds formés par les U.C. successives (U.C. n 2, U.C. n 1, U.C. n) d'un même rameau.

La connaissance de ces modifications du fonctionnement des méristèmes au cours du temps permet de modéliser le fonctionnement d'un arbre en tout point au cours de son développement.

Figure 1

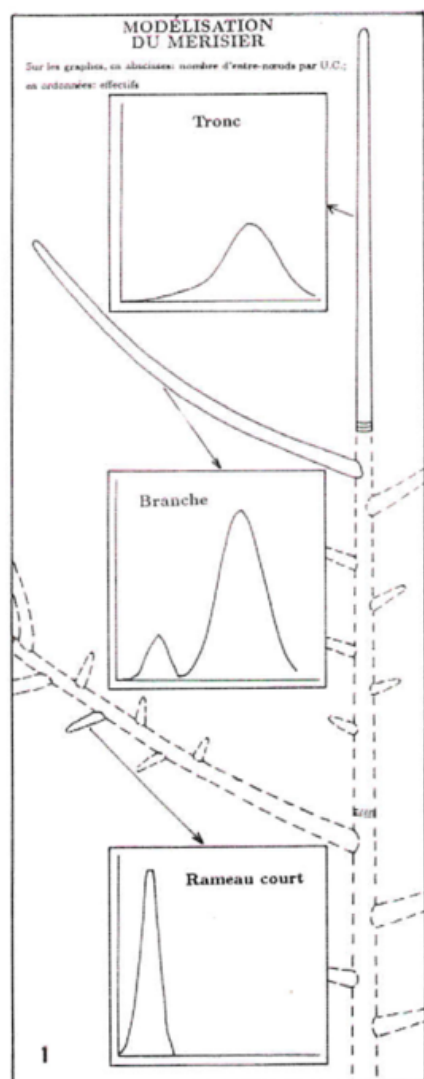
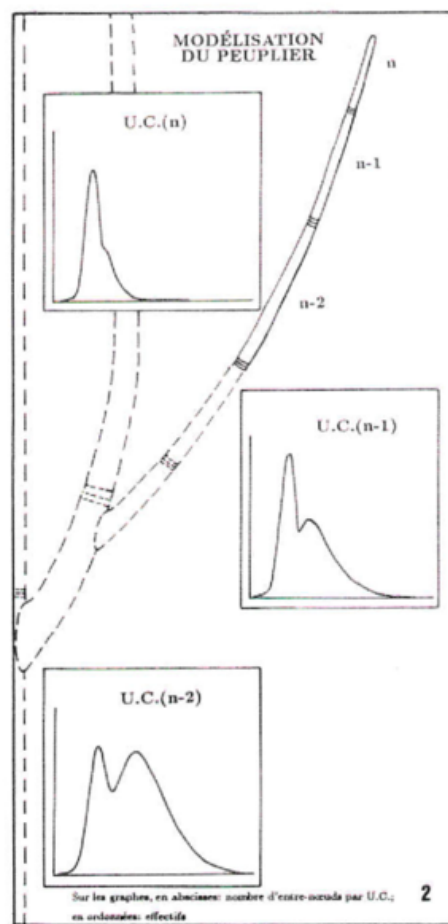
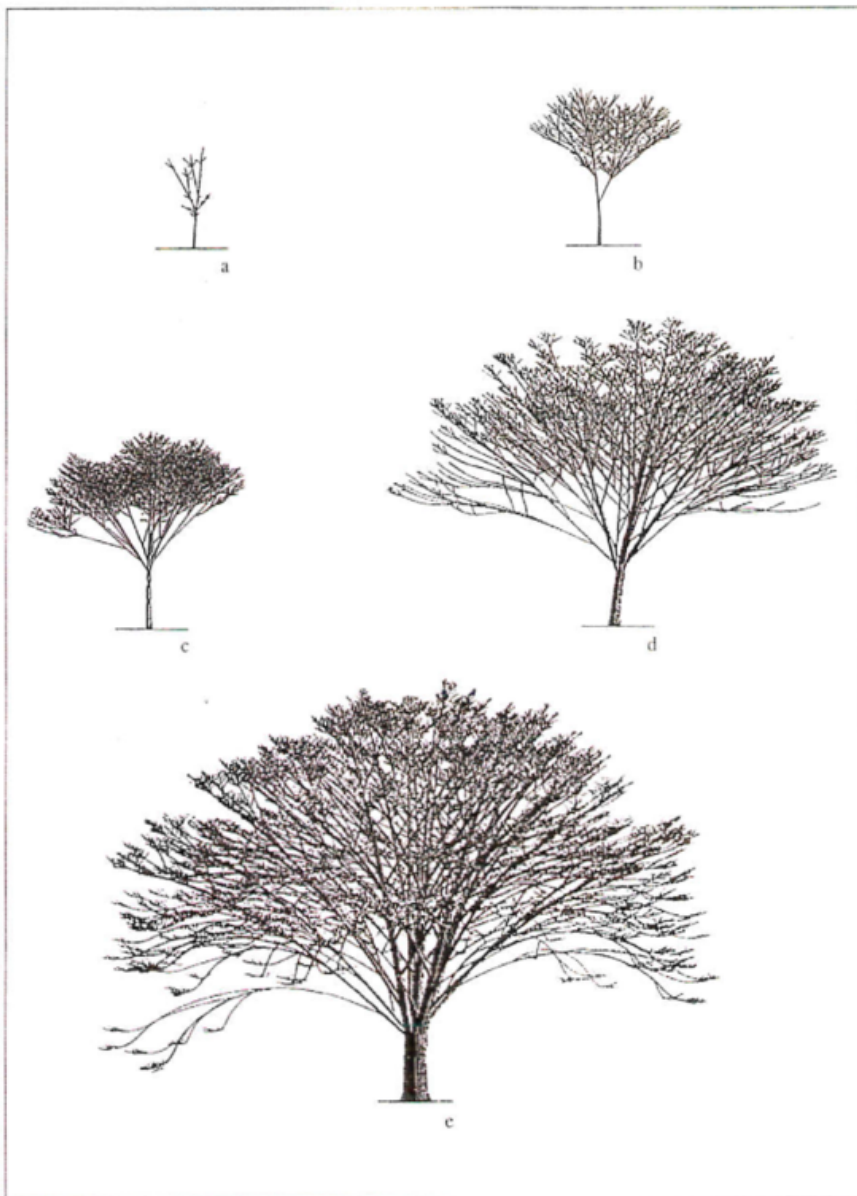


Figure 2



Pour bâtir ces courbes, on prend un échantillon de 200 branches. Dans ces 200 branches, on prend 200 unités de croissance équivalentes. Pour chaque unité de croissance, on compte le nombre d'entre-nœuds que l'on met en abscisse. On aura en ordonnée le nombre d'unités de croissance par classe de nombre d'entre-nœuds.



*Simulation informatique de l'orme du Japon à différents âges*

*a : 2 ans ; b : 5 ans ; c : 15 ans ; d : 30 ans ; e : 60 ans*

(Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat, images calculées)

interpolation entre les diverses situations analysées.

• D'autres applications sont également envisageables dans l'identification des facteurs de rendement (nombre de fleurs ou de fruits produits, surfaces foliaires, volume de bois...), dans l'étude de la variabilité génétique de l'architecture d'une espèce ou encore dans l'analyse de l'interception de la lumière par le feuillage. La prise de données sur les caractères morphologiques de la croissance pouvant être complétée par des relevés géométriques, ce type de modélisation offre également de larges perspectives en ce qui concerne l'étude de l'occupation de l'espace par une plante ou des fac-

teurs qui interviennent dans la casse au vent du tronc ou des branches maîtresses.

A ce jour, le Laboratoire de modélisation a ainsi travaillé sur plusieurs espèces d'origine tropicale (caféier, hévéa, cacaoyer, litchi, manioc, mil) et tempérée (peuplier, abricotier, pêcher, merisier, orme du Japon, bégonia, lin). D'autres études sont en cours sur le frêne, les noyers, les tilleuls, les érables, la vanille...

L'analyse de ces plantes montre que pour chaque espèce la loi de croissance ne change pas au cours du temps ni en fonction du milieu : seule la valeur de ses paramètres se modifie et caractérise alors un état particulier de

l'arbre. Par l'étude de plantes à divers âges et dans différentes conditions, il est ainsi théoriquement possible de modéliser toutes les variations de ces paramètres et donc de prévoir le développement de l'arbre à tout instant et en tout lieu.

## La simulation et la visualisation de l'architecture des arbres

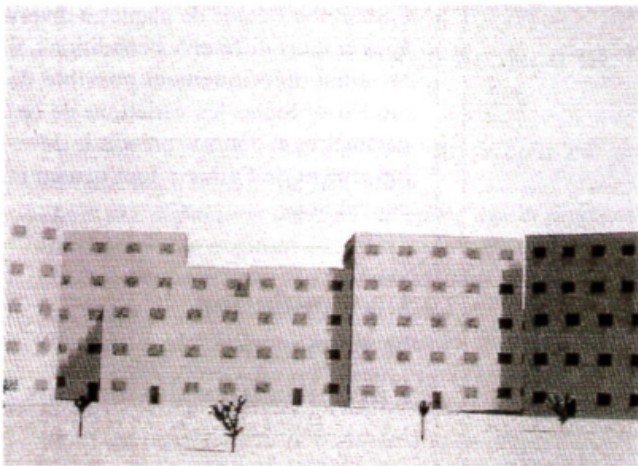
La simulation du développement d'un arbre et sa visualisation sur un écran d'ordinateur sont une conséquence directe des études de modélisation. Elles représentent en outre un excellent moyen de validation de l'analyse mathématique. En effet, si celle-ci est correcte, les images obtenues doivent ressembler de façon saisissante aux arbres étudiés.

La description complète du fonctionnement de chaque essence est incorporée dans un logiciel qui regroupe et gère toutes les données recueillies sur le terrain. On dispose alors d'un « fichier paramètre » qui reproduit fidèlement le fonctionnement de l'arbre analysé à divers stades de son développement dans l'environnement qui était le sien.

Un premier mode de visualisation donne une représentation en « traits » de l'arbre étudié. Cette image est réalisée en trois dimensions ce qui laisse apprécier la disposition et la répartition de l'ensemble des branches et des rameaux. Il est également possible de se « déplacer » sur l'écran autour de cette structure tout en lui affectant diverses échelles de dimension.

Par la suite, un autre logiciel « habille » cette structure par des symboles (feuille, entre-nœud, fleur, fruit...) qui donnent plus de réalisme à l'image.

Basée sur une connaissance intime de la plante, cette méthode fournit un moyen efficace de visualiser le développement et les réactions de l'arbre dans une situation donnée. Offrant la possibilité de visualiser l'occupation de l'espace par un arbre, cette méthode permet également d'aborder sous



*Evolution du paysage (Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat images de synthèse)*



*Plantation de peupliers (Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat, image de synthèse)*

un jour nouveau les problèmes de gêne entre individus.

D'autres développements informatiques réalisés au Laboratoire permettent d'aboutir à des réalisations supplémentaires. L'association avec des logiciels capables de simuler l'ombre, la brume, le relief, les bâtiments, le mobilier... permettent par exemple la création de scènes ou de paysages. De plus, le couplage informatique de l'ordinateur avec un système vidéo fournit un outil irremplaçable pour la réalisation de films d'animation.

Les possibilités offertes par l'association de tous ces logiciels en font un produit utilisable dans divers domaines d'application.

- Sur le plan pédagogique elles permettent la réalisation de films d'animation de la croissance de tel ou tel arbre qui montrent, en accéléré, sa stratégie d'occupation de l'espace. De tels films ont déjà été réalisés au Laboratoire sur le caféier, le litchi, l'orme du Japon, le merisier,...

- Dans le domaine de l'architecture paysagère elles offrent une technique entièrement nouvelle de représentation d'un paysage et de son évolution au fil des ans ou des saisons.



Les études effectuées au Laboratoire de modélisation ont conduit à l'élaboration d'une méthode d'analyse quantitative de l'architecture des plantes applicable à l'ensemble des végétaux. Compte tenu du très grand nombre d'observations à effectuer dans ce type de recherches, le nombre d'espèces étudiées est, à ce jour, relativement faible. Ces études préliminaires ont toutefois permis d'entrevoir la diversité des champs d'application qui s'offrent à ce type d'études.

Dans le domaine de la connaissance des arbres, ces recherches devraient permettre d'aboutir à une meilleure compréhension du mode de développement des principales essences forestières françaises.

En ce qui concerne la sylviculture il est envisagé d'étendre la méthode à des domaines non encore explorés au Laboratoire, comme l'étude de

l'influence de la taille, de l'élagage, ou encore la prévision de la production de bois en fonction des essences, des modes de plantations, des types de stations...

Tous ces aspects font actuellement l'objet de recherches dans le cadre

d'une convention passée entre le Laboratoire de modélisation du Cirad/Gerdat et l'Idf.

**Daniel Barthélémy, Yves Caraglio,**  
**Laboratoire de modélisation du**  
**Cirad/Gerdat**

## Bibliographie

- **Barthélémy, D. 1988** - Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales : le concept de floraison automatique. Th. Doct. Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

- **Dauzat, J. 1985** - Modélisation des transferts radiatifs au sein des couverts végétaux sur la base de données obtenues par un système opto-électrique de points quadrats. Application au calcul de l'absorptance et de la réflectance directionnelle d'un couvert de soja. Th. de doctorat, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 181 p.

- **Edelin, C. 1984** - L'architecture monopodiale : l'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale. Th. Doct. Etat, Univ. Montpellier II, 258 p.

- **Edelin, C., de Reffye, Ph., Jaeger M. et Dinouard, P. 1989** - La simulation de l'architecture des arbres et son rôle potentiel dans la conception et la gestion des paysages urbains. Rev. For. Franc., vol. 41, numéro spécial «L'Arbre en Ville» pp 143-153.

- **Halle, F. et Oldeman, R.A.A. 1970** - Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris, 178 p.

- **Halle, F. et Oldeman, R.A.A. et Tomlinson, P.B. 1978** - Tropical trees and forests. Springer Verlag, Berlin, 441 p.

- **Jaeger, M. 1987** - Représentation et simulation de la croissance des végétaux. Th. de doctorat, U.L.P., Strasbourg.

- **Reffye (de), Ph. 1981** - Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. I. Etude du fonc-

tionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs. Café Cacao Thé (Paris), vol. XXV, n° 2, pp. 83-104.

- **Reffye (de), Ph. 1981** - Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. II. Etude de la mortalité des méristèmes plagiotropes. Café Cacao Thé (Paris), vol. XXV, n° 4, pp. 219-230.

- **Reffye (de), Ph. 1982** - Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. III. Etude de la ramification sylleptique des rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires. Café Cacao Thé (Paris), vol. XXVI, n° 2, pp. 77-96.

- **Reffye (de), Ph. 1983** - Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. IV. Programmation sur micro-ordinateur du tracé en trois dimensions de l'architecture d'un arbre. Application au caféier. Café Cacao Thé (Paris), vol. XXVII, n° 1, pp. 3-19.

- **Reffye (de), Ph., Snoeck. 1976** - Modèle mathématique de base pour l'étude et la simulation de la croissance et de l'architecture du *Coffea robusta*. Café Cacao Thé (Paris), vol. XX, n° 1, pp. 11-32.

- **Reffye (de) Ph., Edelin, C., Jaeger, M. 1989** - Modélisation de la croissance des plantes. La Recherche, vol. 20, pp. 158-168.

- **Snoeck, Reffye (de), Ph. 1980** - Influence des engrais sur l'architecture et la croissance du caféier Robusta. Café Cacao Thé (Paris), vol. XXIV, n° 4, pp. 259-266.