



L'ARCHITECTURE DES ARBRES

Élaboré au début des années 70, le "modèle architectural", jette un pont entre la botanique et l'informatique. D'abord outil de description, il permet aujourd'hui de simuler sur ordinateur, avec un réalisme saisissant, la croissance d'un arbre.

Il suffit d'observer les végétaux pour s'assurer qu'ils ont une architecture, au même titre que les insectes, les coraux ou les champignons. À l'âge adulte, nous rappelle le *Larousse des arbres et arbustes*, chaque espèce en général et chaque arbre en particulier a un "port", c'est-à-dire une silhouette caractéristique qui permet souvent de le reconnaître de loin. C'est ce port qui dénonce rapidement au profane un palmier, un pin parasol (ou pin pignon), un hêtre longiligne, un saule pleureur ou un figuier de Barbarie aux rameaux en "raquettes" charnues et épineuses. Mais une discipline récente de la botanique, l'architecture végétale, substitue peu à peu, à ce concept statique de port, une notion plus dynamique, celle de "modèle architectural". Bonnet blanc et blanc bonnet ? Pas tout à fait, puisque "le port résulte du mode de croissance des rameaux (qui est un caractère génétique propre à chaque espèce) et des conditions dans lesquelles cette croissance s'effectue".

Le modèle architectural est un port idéal, épuré de toutes les contraintes externes, car il ne reflète que la stratégie interne de développement de la plante : son mode de croissance, de ramification, la direction de ses axes, la position des fleurs... L'étude de l'architecture végétale est devenue une discipline à part entière après 1950, certains modèles ayant cependant été décrits au début du siècle ou dessinés bien avant. Un des modèles les plus simples, celui de Massart, a ainsi été vu et décrit en 1923 par Jean Massart sur un spécimen de *Virola surinamensis*, cultivé au jardin botanique de Rio de Janeiro. Ce modèle nous est familier, car il correspond à de nombreux conifères de nos régions tempérées : le sapin, l'épicéa ou l'araucaria...

Contre toute attente, les combinaisons retenues ne sont pas innombrables : 23 modèles ont été différenciés par les auteurs de cette nouvelle classification établie, en 1970, par Francis Hallé, directeur du laboratoire

Photo G. KalivzeFA

de botanique à l'Institut de botanique de Montpellier, et Roelof Oldeman, professeur de sylviculture à Wageningen, en Hollande (1). L'échantillon analysé porte pourtant sur plusieurs milliers d'espèces, principalement tropicales.

L'espèce est, rappelons-le, le niveau fondamental de la classification des végétaux, la "systématique". Cette notion moderne fut élaborée au XVIII^e siècle par le savant suédois Carl von Linné (1707-1778), qui a décrit et nommé plus de 8 000 espèces différentes et à qui l'on doit la nomenclature binaire : l'espèce est désignée en latin par deux appellations, équivalant à nos nom et prénom ; le deuxième caractérise l'espèce, le premier — commençant par une majuscule — désigne le genre (déjà défini par Tournefort à la fin du XVII^e siècle) auquel appartient l'espèce. Ainsi, après Linné, on ne dit plus l'herbe-à-la-femme battue mais *Tamus communis*. La systématique "linnéenne", progressivement perfectionnée et universellement admise par tous les botanistes, est fondée sur l'architecture du système reproducteur (fleurs et fruits qui en dérivent).

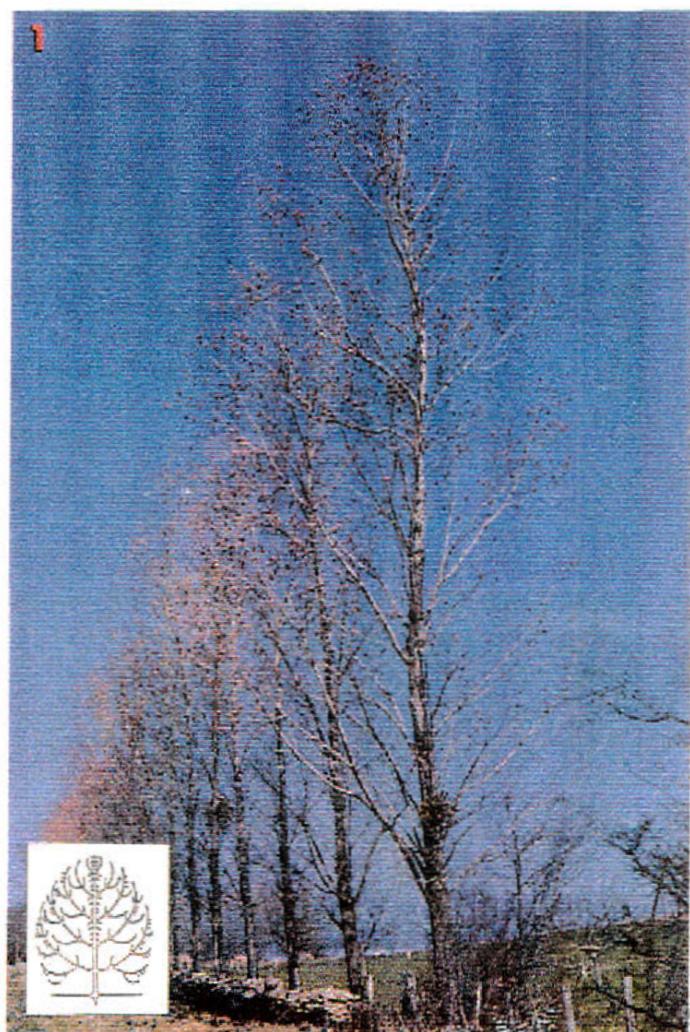
Après Antoine-Laurent de Jussieu (1748-1816), les genres furent regroupés en famille, les familles en ordre, les ordres en classe, et les classes en embranchement. Les plantes supérieures ou spermatophytes (qui se reproduisent par graine) se divisent ainsi en deux embranchements, les gymnospermes dont les graines sont nues (on y trouve les conifères), et les angiospermes dont les graines se forment dans les fruits. Au total, on dénombre 250 à 300 000 espèces spermatophytes. Réduire ces quelque 300 000 espèces à 23 modèles architecturaux peut donc sembler une gageure. Et pourtant, selon Francis Hallé, cette nomenclature est suffisante pour accueillir les espèces décrites.

Chaque modèle regroupe donc un très grand nombre d'espèces, parfois très éloignées : ainsi une petite euphorbe, *Phyllanthus niruri*, de taille inférieure à 10 cm lorsqu'elle fleurit, appartient au même modèle (celui de Roux) que les caféiers (*Coffea arabica* ou *C. robusta*) ou *Goupia glabra*, un arbre forestier géant atteignant, à l'âge adulte, des hauteurs de 50 m. A l'inverse, deux espèces d'un même genre peuvent appartenir à deux modèles différents (ainsi, *Coffea macrocarpa* appartient au modèle de Corner) et même deux sexes d'une même espèce (chez *Cycas circinalis*, par exemple).

En fait, le petit nombre de modèles s'exprime par la rareté et la simplicité des critères pour les différencier. Le principal critère est la durée d'activité des centres cellulaires spécialisés dans la croissance en longueur des axes, les méristèmes végé-

tatifs, situés à la pointe des tiges (ou des racines) et dans les bourgeons. Leur activité se traduit par une période d'élongation qui met en place une portion de tige, appelée dans le langage des architectes végétaux "unité de croissance". En général, l'élongation a lieu après la mise en place des organes à l'état d'ébauches (croissance rythmique) ; ainsi, la frontière entre deux unités de croissance chez les arbres tempérés est une zone à entrenœuds très courts, correspondant aux écailles qui protégeaient le bourgeon pendant l'hiver (voir dessin page 50).

La différenciation et l'activité des méristèmes sont, notamment, à la base du mode de ramification, clef du modèle architectural. Certaines plantes ne sont pas ramifiées (plantes monocaules) : elles possèdent un seul axe feuillé. Si les fleurs sont à l'extrémité de cet axe, elles en stoppent définitivement la croissance. Ces deux traits (plantes non ramifiées, floraison terminale) suffisent à caractériser le modèle de Holttum auquel appartiennent de nombreuses monocotylédones (le palmier à sucre, par exemple). Lorsque les fleurs sont latérales, elles ne gênent pas la croissance du tronc ; ces plantes non ramifiées à la floraison latérale appartiennent au modèle de Corner (le palmier à huile, par exemple).



(1) Chaque modèle porte le nom du botaniste qui a décrit précisément et pour la première fois l'architecture spécifique d'une espèce s'y rapportant.

2



L'ARCHITECTURE NATURELLE...

1. Modèle de Rauh : *Populus nigra*, peuplier noir.
2. Modèle de Troll : *Mimosaceae*, mimosacée guyanaise.
3. Modèle de Roux : *Goupia glabra*, goupi.
4. Modèle de Leeuwenberg : *Senecio kleinia*, sénécion.
5. Modèle de Massart : *Araucaria excelsa*, pin de Norfolk.
6. Modèle de Corner : *Carica papaya*, papayer.



Mais la plupart des plantes sont ramifiées (polycaules). Plusieurs caractéristiques entrent alors en ligne de compte pour déterminer leur modèle architectural : l'ordre de ramification (par convention, le premier axe formé issu de la graine est d'ordre 1, les rameaux qui en dérivent d'ordre 2, etc.) ; la rythmicité de cette ramification ; le moment de son initiation (retardée à l'abri d'un bourgeon ou bien immédiate, ce qui donne des rameaux formant un angle très ouvert avec leur axe porteur) ; le mode d'occupation de l'espace déterminé par la direction des rameaux, qui peut être dressée, verticale (axes orthotropes) ou horizontale, oblique et souvent dans un plan (axes plagiotropes) ; enfin, la position des structures reproductrices, car la transformation d'un méristème végétatif en méristème floral est irréversible (cf. modèle de Holtum).

Le mode de ramification est très dépendant des rapports de dominance qui s'exercent entre les différents méristèmes de croissance. Par des mécanismes physiologiques, le méristème terminal, centre organisateur du développement de la plante, inhibe les méristèmes latéraux sous-jacents, l'arbre prenant une allure de sapin de Noël dans un dessin d'enfant. Cette dominance apicale maintient un axe central continu avec une série de rameaux latéraux. Ce mode de développement, dit "monopodial", aboutit à une structure qualifiée de "monopode".

Parfois le méristème apical meurt, soit à la suite d'un traumatisme (taille, élagage, sécheresse ou morsure d'insecte), soit parce qu'il se transforme en méristème floral. L'axe central ne peut alors plus croître en longueur et les rameaux latéraux sous-jacents assurent le relais. Cette ramification dite "sympodiale" donne naissance à une structure appelée "sympode" (voir dessin page 50). Sur certains sympodes, tous les axes, ou modules, sont équivalents, dressés, à floraison terminale, et ramifiés à l'aisselle des dernières feuilles situées sous l'inflorescence. Le modèle de Leeuwenberg (frangipanier, par exemple) est un des plus "purs" témoins de cette architecture, et a été illustré par Léonard de Vinci dans son *Traité de la peinture*, en 1651 ! Quatre autres modèles — Chamberlain (philodendron, par exemple), Shoute (palmier doum), Tomlinson (palmier dattier) et Mac Clure (bambou) — décrivent aussi de telles structures.

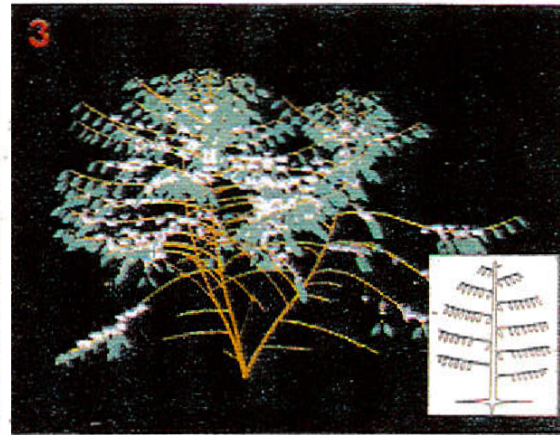
Quel que soit le mode de croissance, les axes ne sont le plus souvent pas équivalents : l'axe central, tronc ou tige, maintient la cohésion de l'ensemble, tandis que les axes latéraux se spécialisent pour assurer la photosynthèse et la reproduction. Hallé a dénombré treize stratégies de croissance pour parvenir à cette construction, qui constituent autant de modèles. Cinq modèles, bien représentés sous nos climats tempérés, sont à croissance monopodiale : celui de Rauh, caractérisé par les branches à croissance dressée (peuplier, pin, chêne, frêne, arbres

fruitiers, hévéa, etc.) ; celui de Massart, dont les rameaux, plus horizontaux, ont tendance à venir se placer dans un plan (épicéa, sapin ou teck) ; celui d'Attims (comme le palétuvier) ; celui de Cook (de nombreuses euphorbes) ; et le modèle de Roux (le caféier). Deux modèles sont à croissance sympodiale : ceux de Koriba et de Prévost (riches en plantes de la famille des euphorbes). Enfin, six modèles combinent les deux modes de croissance (sympodiale et monopodiale) pour arriver à une allure "d'arbre classique" : ce sont les modèles de Nozeran (cacaoyer), de Fagerlind (magnolia), d'Aubréville (amandier de Cayenne), de Stone (pandanus, un genre d'Asie tropicale), de Scarrone (manguier) et de Petit (cotonnier).

Chez certains modèles, la croissance en hauteur est assurée par l'empilement d'une succession d'axes dont l'orientation diffère au cours de la croissance. Verticaux à leur origine, ils deviennent horizontaux et un rameau prend le relais verticalement ; parfois, au contraire, l'axe issu de la graine pousse à l'horizontale, puis se redresse progressivement ; tels sont les modèles de Champagnat (égantier, bougainvillier...), Mangenot (vomiquier...) et Troll. La définition peu précise de ce dernier modèle permet d'y inclure presque le tiers des espèces arborescentes, tels les mimosas, ormes, micocouliers, acacias des savanes africaines (dont le port caractéristique en entonnoir les fait nommer "arbres à pluies").

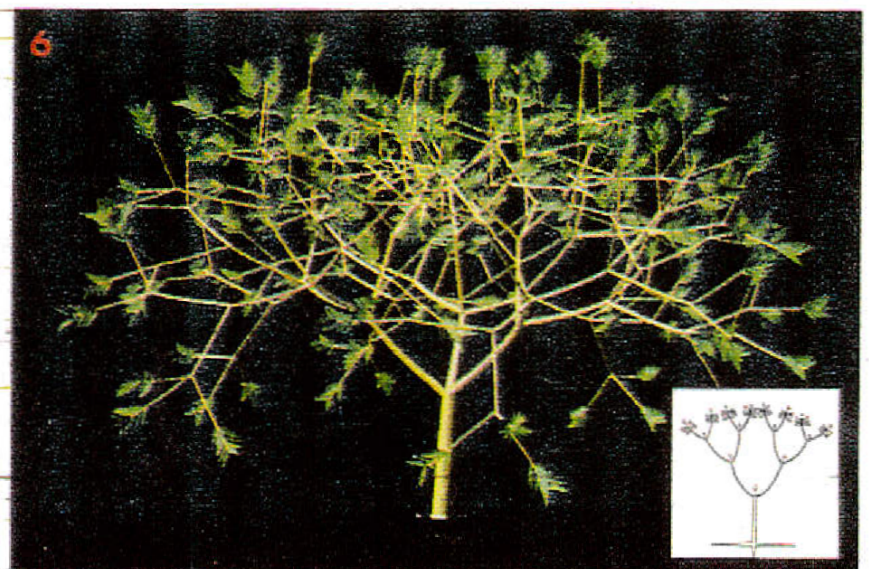
L'analyse architecturale a complètement révolutionné l'approche des arbres en en permettant une





... ET L'ARCHITECTURE DE SYNTHÈSE

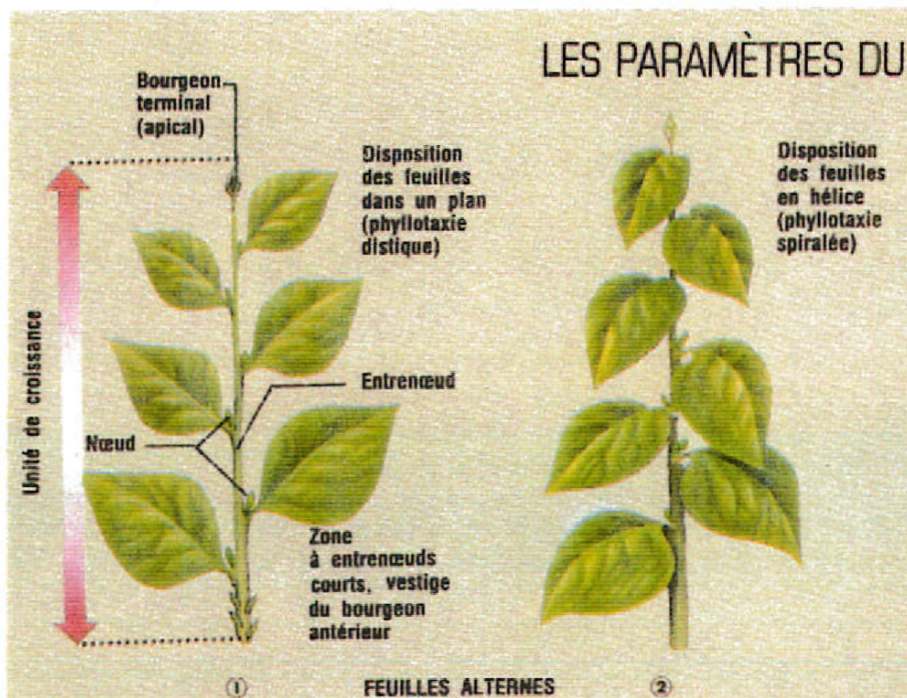
- 1. Modèle de Corner : *Elaeis guineensis*, palmier à huile.
- 2. Modèle de Rauh : *Populus nigra*, peuplier noir.
- 3. Modèle de Roux : *Coffea robusta*, caféier.
- 4. Modèle de Massart : *Picea abies*, épicéa commun.
- 5. Modèle de Petit : *Gossypium hirsutum*, cotonnier.
- 6. Modèle de Leeuwenberg : *Plumeria alba*, frangipanier.



description globale. Avant elle, point de logique dans le "port" d'un arbre. Résultat: une absence notoire de dessins d'arbre, vus dans leur ensemble, dans les livres de botanique. Claude Edelin, botaniste de l'Institut de Montpellier et grand habitué des forêts tropicales, résume la grande innovation de cette méthode d'observation: « Grâce à quelques règles de construction et d'organisation simples, au-delà de sa complexité apparente, l'arbre possède une architecture élémentaire facile à comprendre. » Parole de botaniste invétéré, mais très encourageante pour ceux, si nombreux, qui aiment les arbres sans pouvoir les nommer. Certains processus de croissance sautent au yeux, comme la "réitération", un processus par lequel l'arbre duplique partiellement ou totalement sa propre architecture.

Qui n'a jamais cru distinguer, dans la branche ramifiée d'un arbre, l'exacte réplique de l'arbre tout entier? Une telle vision n'a rien d'une illusion. C'est une conséquence du processus de réitération, reconnu et identifié de manière scientifique par R. Oldeman, en 1972. De même qu'une cellule se divise lorsque sa surface devient trop petite pour le volume qu'elle contient, de même l'arbre encombré par sa ramure peut se démultiplier. Cela peut être programmé génétiquement et arriver spontanément, à un certain âge. Cela peut aussi survenir à la faveur d'un environnement plus favorable, lorsque l'arbre atteint la voûte forestière et passe d'un milieu ombragé à un milieu fortement éclairé, par exemple. Quelques bourgeons, qui étaient restés dormants jusque-là, vont alors constituer, non pas une branche ordinaire, mais un vrai petit arbre, identique à celui qui le porte.

Cette réitération "adaptative" permet à la cime de l'arbre de s'étendre plus rapidement que le mode de ramification du modèle



L'axe feuillé est la structure élémentaire de l'architecture aérienne d'une plante. Lorsque la croissance est rythmique, la portion d'axe feuillé mise en place pendant la période d'activité est l'unité de croissance.

La tige porte, à son extrémité, une partie embryonnaire: le méristème primaire, qui, au repos, est généralement protégé par des écailles (l'ensemble = le bourgeon apical). En activité, il forme la tige et initie des feuilles (nœuds), selon une disposition propre à l'espèce. Entre les nœuds, la tige peut s'allonger (entrenœud). A l'aisselle des feuilles, un ou plusieurs méristèmes

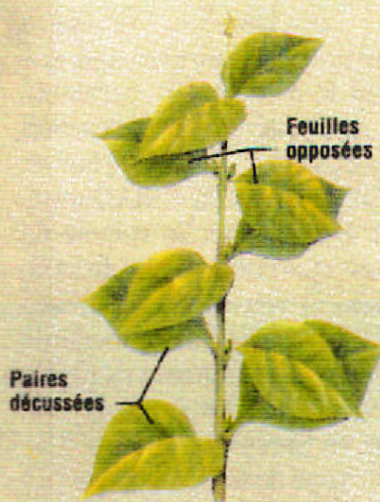
secondaires, différenciés en bourgeon, initient soit des rameaux, soit des fleurs.

Le mode de fonctionnement du méristème apical détermine la disposition des feuilles (phyllotaxie) et par suite, celle des rameaux. Il peut mettre en place une feuille par nœud (feuilles alternes). Lorsque deux feuilles successives font entre elles un angle de 180°, les feuilles sont disposées dans un même plan (1). Cette phyllotaxie "distique" est représentée chez l'orme.

Souvent, les feuilles semblent être initiées sur une hélice virtuelle unique,

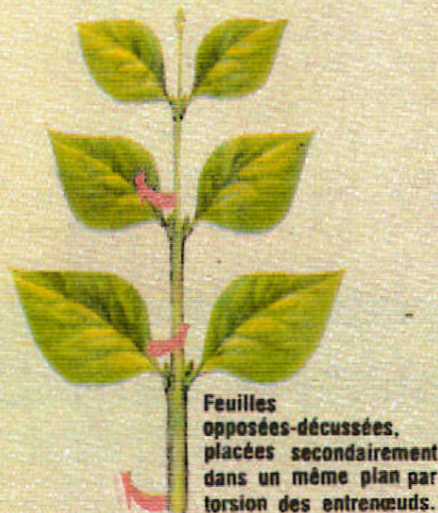


MOTEUR DE LA CROISSANCE



③

FEUILLES VERTICILLÉES



④

chacune étant séparée de la suivante par un angle constant (2). Cette situation, qui entraîne une disposition radiale des rameaux, est très fréquente sur les axes à croissance verticale.

Le méristème peut initier plusieurs feuilles en même temps (feuilles verticillées), qui ménagent alors entre elles un angle constant (60° dans le cas de 6 feuilles, etc.)... Lorsque les feuilles sont par paire (feuilles opposées), le méristème dispose souvent les paires successives dans des plans perpendiculaires (paires décussées) (3). Cette phyllotaxie est typique du caféier.

Mais les feuilles peuvent être

redistribuées dans l'espace, pour un meilleur accès à la lumière par exemple ; des feuilles opposées-décussées peuvent ainsi se retrouver dans un même plan (4). Cette disposition secondaire "adaptative" est fréquente sur les axes de croissance horizontale (branches "plagiotropes").

Le mode de ramification du système, sympodial (5) ou monopodial (6) est un autre élément-clé du modèle architectural. Cette ramification peut être continue (un rameau à chaque aisselle foliaire), diffuse (apparemment aléatoire), ou bien encore rythmique (à intervalles réguliers).



⑥ MONOPODE

ne le permettrait. Les branches maitresses de l'arbre adulte constituent ainsi peu à peu une colonie de jeunes arbres autonomes et en compétition au sein de la cime, se réservant entre eux un certain espace libre à la manière des pièces d'un puzzle. La réitération survient aussi en réponse à un traumatisme (taille, élagage, etc.) pour prolonger ou régénérer les axes lésés ; rejets, drageons, gourmands ne sont également que d'autres aspects de ces "complexes réitérés".

Avec ces notions de modèle architectural, de réitération, de métamorphose (voir photos page 52), la complexité du réel se réduit ainsi à quelques lois de croissance simples. Philippe de Reffye, un agronome généticien de l'IRCC (Institut de recherches du café, du cacao et autres plantes stimulantes), à Bingerville (Côte-d'Ivoire), l'avait senti en étudiant la croissance de différentes variétés de caféiers. Dès 1976, il écrivait que « prévoir la récolte passe par l'élaboration d'un modèle mathématique continu de la croissance du caféier ». Il ne lui restait plus qu'à « préciser le modèle architectural au point d'envisager le traçage automatique du caféier, à chaque instant de sa vie, à l'aide d'un ordinateur qui aurait reçu et intégré les données de la croissance et du développement de l'arbre ». Des mesures mensuelles, effectuées sur les tiges et sur les rameaux de caféiers de deux clones cultivés de *Robusta* pendant six ans après leur plantation, avaient permis d'enregistrer leur croissance en longueur et en nœuds, les circonstances de leur floraison, donc de leur fructification.

Grâce à ces mesures prises sur le terrain, Philippe de Reffye put établir, en 1978, un modèle mathématique du caféier, qui permettait d'évaluer le rendement à partir de l'architecture de la plante. La plante est assimilée



LA MÉTAMORPHOSE ARCHITECTURALE

Passé un certain âge, de nombreux arbres à croissance monopodiale voient leurs branches se redresser, devenir plus vastes, plus ramifiées : ici, à gauche, *Agathis dammara*, le dammar. Cette métamorphose reflète la perte progressive du pouvoir organi-

sateur des méristèmes apicaux, au fur et à mesure que l'arbre s'étoffe. Certaines branches se mettent à reproduire l'architecture primaire du jeune arbre et le vieil arbre devient une colonie d'arbres : ici, à droite, *Symphonia globulifera*, une clusiacée.

à une structure modulaire : troncs, tiges, branches et rameaux résultent d'un même nombre d'occasions d'accroissement, de ramification ou de mort, qui se réalisent avec une certaine probabilité. Le caféier est ainsi ramené à une trajectoire de bourgeons ; chaque bourgeon a une horloge interne et subit une batterie de tests : avortement ou non, démarrage ou dormance, croissance ou repos. Selon la réponse à ces tests, l'arbuste acquiert un profil type. On peut modifier de façon aléatoire cette réponse, tout en tenant compte de la position des bourgeons dans l'arbre (l'horloge du tronc peut être différente de l'horloge des branches). Selon Philippe de Reffye, aujourd'hui directeur du laboratoire de biomodélisation du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), implanté au cœur du site d'Agropolis à Montpellier, quatre variables suffisent à déterminer la cime d'un arbre : l'activité du méristème terminal, celle des méristèmes des axes secondaires, le rapport des rythmes de croissance entre le tronc et les branches (fonction de l'horloge propre à chaque axe) et, inévitablement, le temps...

Le cotonnier (modèle de Petit) est l'une des dernières vedettes dont la mise en équation est complète (celles du litchi et de l'hévéa sont en cours). Philippe de Reffye et Michel Cognié, un chercheur de l'IRCT (Institut de recherches du coton et des textiles exotiques), en ont calculé la probabilité d'élongation du bourgeon terminal à chaque "top d'horloge" : elle est de 0,8 sur les tiges (croissance monopodiale) et de 0,9 sur les rameaux (croissance sympodiale). Les premiers rameaux sympodiaux

démarrant au 6^e nœud de la tige et ils croissent en France trois fois moins vite que la tige (seulement deux fois moins vite sous les tropiques). Certaines branches, plus horizontales, réitérent le modèle. La probabilité de cette réitération est fonction de la distance entre deux plantes. Les chercheurs du CIRAD espèrent ainsi simuler le volume de fleurs (préalable à la fructification) et voir quels paramètres (densité de plantation, mode de taille, engrais, traitements phytosanitaires, etc.) maximisent la récolte en fibres et en fruits.

Philippe de Reffye ne s'est pas contenté de montrer comment l'architecture de l'arbre peut devenir une composante du rendement. En appliquant le calcul d'un paramètre d'élasticité (le module de Young) au bois du caféier, il a mis en évidence le

caractère spécifique de l'élasticité du bois. Cette constante génétique (différente selon que le bois est vert ou lignifié) offre un nouveau critère de sélection dans la lutte contre la "verse", un affaissement causé par une charge en fruits trop élevée, fréquent chez le caféier. Il est facile de classer à l'œil nu les arbres "durs" et les arbres "mous". Mais il faut pour cela attendre qu'ils aient fructifié. En intégrant le module de Young dans les paramètres de croissance du caféier, on visualise la résistance à la verse d'un nouvel hybride en quelques heures. Simuler les effets du vent sur les branches peut être un autre aspect, utile ou esthétique, de cette application des théories de la résistance des matériaux à la modélisation de l'architecture végétale.

Cette modélisation se poursuit à vive allure au CIRAD. Philippe de Reffye n'est plus seul à s'y être engagé. Dès 1980, Claude Edelin et lui associaient leurs démarches, les moteurs de croissance d'une plante étudiés par l'un devenant les paramètres du logiciel établi par l'autre. Les premiers modèles mathématiques représentaient les arbres en deux dimensions, mais, dès 1983, ils simulèrent le développement tridimensionnel de la plante. Les synthèses graphiques de leurs résultats attirèrent rapidement l'attention de Jean Françon, responsable d'une équipe de pointe sur la synthèse d'images, au département Informatique de l'université de Strasbourg. Un étudiant de cette équipe, Marc Jæger, fut délégué à l'amélioration du rendu de ces synthèses graphiques.

Il transforma le programme initial — qu'il fallait modifier pour chaque type de modèle — en un

programme polyvalent, capable de traiter tous les modèles architecturaux. Et il adapta ce programme sur un matériel apte à fournir des graphismes colorés, avec plages d'ombres et de lumières. Quand la puissance des ordinateurs du CIRAD s'avère insuffisante pour élaborer rapidement les images de synthèse (ils traitent 4 millions d'instructions à la seconde), les chercheurs utilisent les ordinateurs du CNUSC (Centre national universitaire sud de calcul), capables, eux, de traiter 30 millions d'instructions à la seconde !

En 1985, le champ des applications en informatique, botanique, agronomie, sylviculture, aménagement, communication audio-visuelle était tel que les laboratoires précités s'associaient pour créer l'AMAP (Atelier de modélisation de l'architecture des plantes), auquel se joignit l'équipe de synthèse d'images du Pr Claude Puech de l'université d'Orsay et deux laboratoires de la station d'Avignon de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), celui d'agronomie et celui de biométrie.

Ce dernier a réalisé des maquettes par image de synthèse d'une plante de maïs, puis d'une culture, afin de mesurer l'intensité lumineuse captée par les feuilles à une certaine hauteur, en fonction de l'orientation des rangs, de la densité de plantation, etc. Car la modélisation mathématique de l'objet en trois dimensions (3D) permet à l'ordinateur de mémoriser et de restituer des vues réalistes de cet objet sous n'importe quel angle — une promenade qui ne serait pas très facile à faire dans la cime d'un arbre ou sous le feuillage d'un champ de maïs !

L'intérêt commercial du logiciel n'a pas échappé à la SESA (Société d'études des systèmes d'automation), une société de service informatique qui démarre une activité "synthèse d'images". Depuis le 1^{er} mars 1987, la SESA vend le logiciel de l'AMAP sous ce même nom : Amap. Le produit de base (100 000 F HT) comporte le programme, ou "modeleur", qui crée la forme de la plante en 3D conformément aux "moteurs" de croissance de son modèle. Elle apparaît bien sûr sur la surface plane de l'écran en deux dimensions, mais l'utilisateur peut déterminer l'angle sous lequel il veut la voir et l'effet de perspective est automatique.

Seule l'architecture de la plante est calculée par le programme, qui est vendu avec trois fichiers "Variétés". Pour chacune d'entre elles, l'utilisateur définit ou modifie une série de paramètres : âge, environnement immédiat, vent, charge en fruits, module de Young, saison, etc. Si l'utilisateur taille son arbre à tel âge, le logiciel lui renvoie une forme probable d'évolution, avec la marque des cicatrices, les cals, etc. Feuilles, fleurs ou fruits sont actuellement "piochés" par le logiciel dans une bibliothèque d'accessoires (un programme de modélisation des feuilles est en cours de réalisation dans l'équipe de Jean Françon).

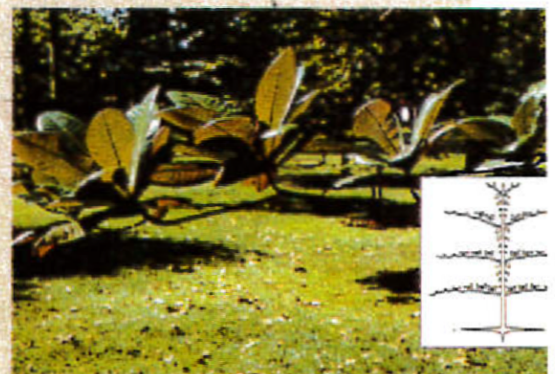
En juin 1987, 40 variétés étaient disponibles, de la tulipe à l'hévéa, en passant par le fenouil et le cocotier. Les clients potentiels de ce logiciel sont très divers : architectes, paysagistes, aménageurs, botanistes, enseignants, agronomes, chercheurs... Mais une station de travail graphique, pour utiliser un logiciel de synthèse d'images comme Amap, coûte encore 300 000 F au strict minimum, sans compter les outils "périphériques" toujours très chers (table traçante, recopie d'écran, génération

(Suite page 156)

TROIS MODÈLES DE CROISSANCE ORIGINALS

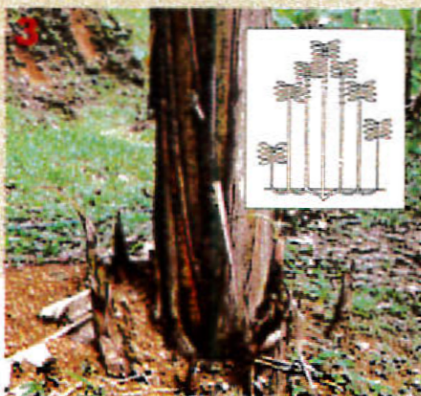
1. La plagiotropie par apposition

Les branches de l'arbre, qui paraissent pousser à l'horizontale (plagiotropie), sont constituées, en fait, d'une succession de petits modules : chacun d'entre eux possède une partie basale horizontale et une partie terminale dressée, la ramification s'effectuant entre les deux parties. C'est une caractéristique du modèle d'Aubréville (ici : *Terminalia catappa*, l'amandier de Cayenne).



2. Les troncs sympodiaux

L'axe du tronc est le résultat de l'empilement des parties basales dressées (ou orthotropes) d'axes successifs. Ainsi, dans la zone de courbure de l'un de ces axes, un rameau orthotrope peut-il prendre le relais. En vieillissant, le tronc ira en grossissant et le bois recouvrira cette structure originale, caractéristique des modèles en "entonnoir" de Mangnot (ici : une espèce tropicale indéterminée), de Troll et de Champagnat.



3. Les rejets souterrains

Le tronc initial se ramifiant sous terre, les jeunes rejets vont peu à peu émerger en cercle tout autour de l'axe qui leur a donné naissance. Ce type de croissance est une caractéristique du modèle de Tomlinson (ici : *Musa paradisiaca*, un bananier).

de diapositives, transfert sur bandes vidéo), et le temps d'apprentissage pour la manipulation de ce type d'outil (estimé à un mois d'exercice quotidien). L'élagage assisté par ordinateur n'est pas encore à la portée financière des municipalités, fût-elle la Ville de Paris !

Les premiers acheteurs du logiciel Amap sont donc tout naturellement des sociétés productrices d'images de synthèse. Ce marché, né au début des années 60, a atteint 7 milliards de dollars en 1986, le coût de production des images de synthèse variant de 1 000 à 25 000 F/seconde pour les images 3D animées ! A ce prix, on peut exiger que l'arbre de synthèse respecte un minimum les lois biologiques de la nature. S'appuyant sur des mesures de terrain, Amap peut prétendre à cette performance, contrairement aux modèles purement mathématiques comme les fractales⁽²⁾, qui donnent des images superbes mais ne correspondent à aucune réalité. Le réalisme saisissant et original des arbres d'Amap a d'ailleurs été remarqué au sixième forum des nouvelles images de Monte-Carlo, Imagina 87, organisé en février dernier par l'INA (Institut national de l'audiovisuel), ainsi qu'à Los Angeles, en juillet, au congrès international sur les images de synthèse, Siggraph 87.

D'un point de vue plus scientifique, l'outil informatique, indispensable pour traiter la masse de données nécessaires à l'établissement des moteurs de croissance d'une plante, va permettre de préciser les modèles architecturaux. Car, si certains sont très "purs" — comme le modèle de Rauh —, d'autres restent insuffisamment définis — comme l'assez vague modèle de Troll — pour accueillir une quinzaine de sous-modèles différents. Déjà, Claude Edelin propose le concept de "diagramme architectural", qui serait aux parties de l'arbre ce que le modèle est à l'arbre entier. Ainsi, le noisetier est un mélange du modèle de Tomlinson, parce qu'il fait des rejets à sa base, et du modèle de Troll, par sa forme en entonnoir.

A en croire les botanistes-informaticiens modernes, l'architecture végétale pourrait devenir aussi efficace que la biologie cellulaire et moléculaire, pour établir des prévisions de croissance, de rendement, ou seulement simplifier la complexité du réel. L'avenir le dira. Cette discipline apporte en tout cas un sang neuf à la botanique, qui manquait d'une approche vivante et synthétique du monde végétal.

Marie-Laure Moinet

(2) Voir, dans *Science & Vie* n° 790 de juillet 1983, "Les fractales ou la géométrie du paysage"