

PHILIPPE DE REFFYE

Directeur du Laboratoire de modélisation du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier.

CLAUDE EDELIN

Laboratoire de Botanique tropicale, Montpellier.

MARC JAEGER

Laboratoire de modélisation du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier.



sere certi che il processo di simulazione o il modello è sbagliato o incompleto.

Tuttavia, le scienze della vita, e più in particolare lo studio dei vegetali, rappresentano un dominio nel quale la simulazione numerica si affaccia soltanto ora in modo timido. In quest'ambito infatti il modello matematico è più difficile da realizzare, data la maggiore complessità e la varietà delle situazioni naturali da prendere in considerazione. Consideriamo appunto il caso dei vegetali. Per un osservatore non specializzato una pianta, in modo specifico un albero, spesso appare come un insieme eterogeneo di rami, foglie e fiori, la cui forma, dimensione e disposizione presentano una grande variabilità a seconda degli individui e dell'ambiente. La difficoltà di costruire modelli dipende proprio da questa complessità. È necessario allora trovare leggi che consentano di costruire un modello che riproduca in modo realistico la crescita nel suo aspetto quantitativo: dimensioni dei rami e delle foglie, loro numero, loro disposizione. Ma anche nel suo aspetto qualitativo: quando ci sono foglie, fiori, frutti? Cioè in che modo realizzare un unico modello in grado di simulare la crescita del più gran numero possibile di vegetali, di 'prevedere' lo sviluppo di una pianta in funzione di certi criteri?

Nel laboratorio di modellistica del CIRAD (*Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*) di Montpellier abbiamo messo a punto un modello del genere sfruttando da un lato una teoria botanica ricavata da osservazioni sul terreno e dall'altro gli strumenti matematici nel campo delle probabilità. Questo modello ha dato origine a un programma logico definito AMAP (*Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes*) grazie al quale visualizziamo, sotto forma d'immagini di sintesi (si veda la Tav. I fuori testo), tutte le tappe di accrescimento di una dozzina di piante che abbiamo studiato in funzione di certi fattori, quali densità di popolazione, quantità e natura dei fertilizzanti, ecc.

Le applicazioni, al di là della pura conoscenza scientifica, sono molteplici, a cominciare dall'agronomia e dalla selvicoltura. Se la pianta dà frutti, la sua produzione è correlata direttamente al tasso di

*segue a pag. 208*

## Modelli di crescita delle piante

**Un incontro spettacolare e inedito: la botanica con l'informatica. La realizzazione di un modello matematico di accrescimento vegetale fedele alla realtà botanica e in grado di produrre un programma da utilizzare in calcolatore consente di riprodurre il comportamento e le potenzialità produttive di un gran numero di piante con applicazioni pratiche di vario genere, dall'agronomia all'urbanistica**

Uno o molti tronchi, dei rami, dei fiori, dei frutti ... Che cosa c'è dietro l'apparente disordine che salta all'occhio, a un primo sguardo, in una pianta? Da molti secoli botanici e biologi si dedicano da una parte a descrivere i principi fondamentali della crescita di una pianta e dall'altra quelli che regolano la disposizione e la struttura geometrica degli organi: rami, foglie, ecc., cioè la loro architettura. Così sono stati ricavati concetti che consentono di capire meglio la forma e la posizione di questi organi. Ad esempio il concetto di 'plagiotropia' permette di classificare i diversi organi in funzione dell'azione del peso, secondo la direzione di crescita più o meno obliqua che essi adottano in rapporto alla verticale. L'acrotomia si riferisce alla caratteristica di certi vegetali nei quali i rami più lunghi sono inseriti più lontano dalla base del tronco. Tutti questi concetti si limitano tuttavia a descrivere semplicemente l'aspetto di una pianta da un punto di vista qualitativo. Ma si può andare oltre? In altri termini, in che modo *calcolare* realmente una pianta?

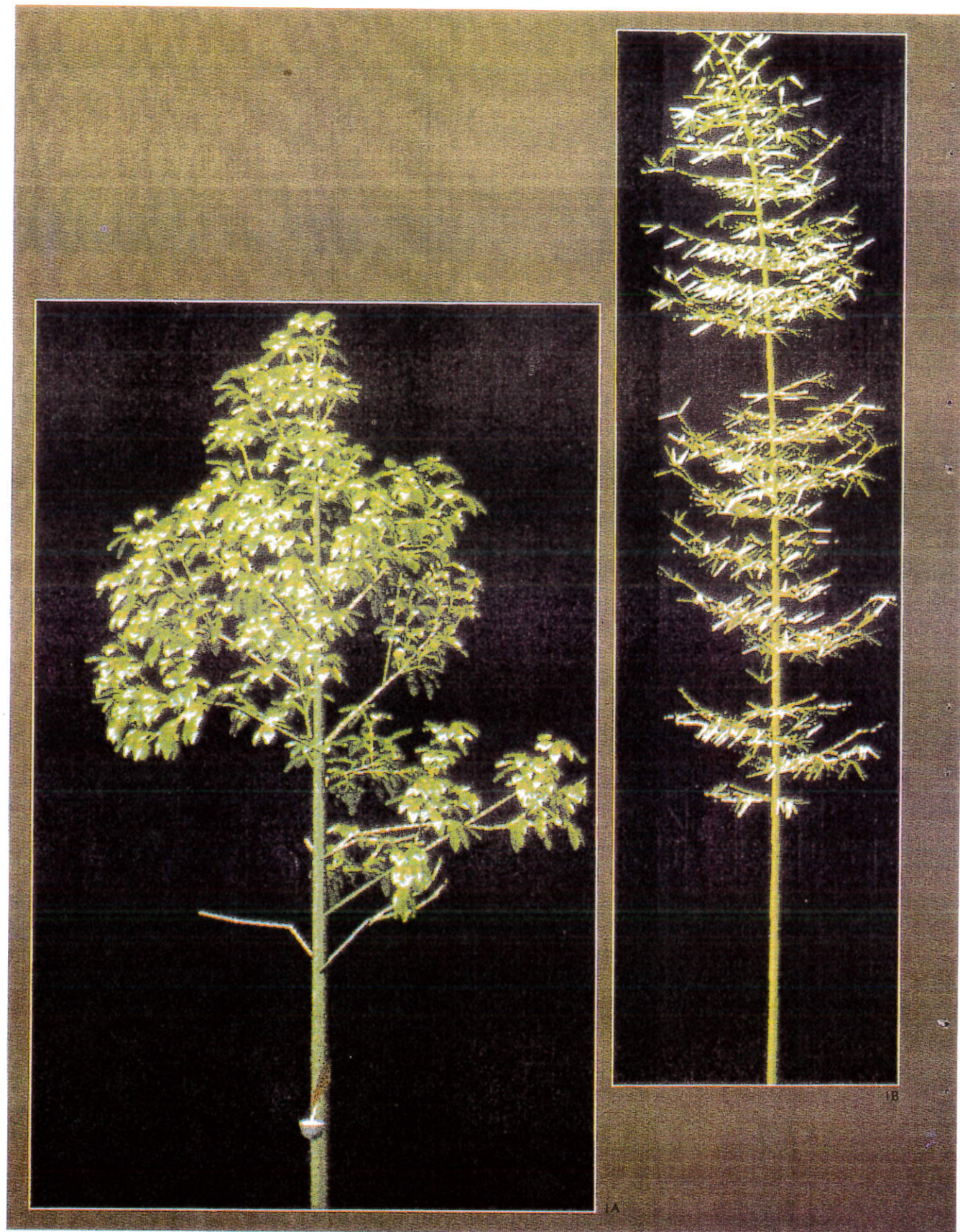
Per rispondere a queste domande oggi, prendendo esempio da molte altre discipline, come la fisica o l'aerodinamica, il calcolatore si occupa anche di vegetali: costruendo un modello matematico del funzionamento di un vegetale, si riproduce il suo comportamento. Se si associa il calcolatore a un programma grafico, si possono ot-

tenere immagini di sintesi di piante in tre dimensioni, animate, 'più vere che in natura' ... Far germogliare una pianta in calcolatore? È possibile.

### Un calcolatore per prevedere il rendimento di una pianta

La sfida lanciata sta tuttavia nell'ordine di grandezza. La costruzione di modelli, che permette di riprodurre mediante il calcolo e in elaboratore fenomeni naturali o il comportamento di sistemi complessi elaborati dall'uomo, è in realtà sempre più sfruttata nella ricerca e nell'industria. Derivata dalla modellistica, la simulazione numerica in certi casi consente una visualizzazione dei risultati sotto forma di immagini di sintesi. In questo modo in campi diversi quali la meccanica, la chimica, la fisica dei materiali, l'aerodinamica, o la stessa farmacologia, la simulazione numerica permette di prevedere il comportamento, in base a numerosi parametri, ad esempio di strutture metalliche, di flussi gassosi o anche di molecole. Il suo principio consiste dunque nello studiare un sistema in base a un modello matematico che si traduce in un insieme di equazioni o di formule ottenute a partire da leggi fisiche, meccaniche o chimiche, il più delle volte ben conosciute. Uno dei suoi scopi è quello di comprendere il comportamento e l'evoluzione di quel sistema. Infatti, se la simulazione non corrisponde al comportamento reale, si può es-





**TAV. I - MODELLI DI CRESCITA DELLE PIANTE AL CALCOLATORE.** La complessità della struttura di una pianta non aveva consentito fino a tempi recenti di realizzare un modello che descrivesse in modo fedele l'accrescimento vegetale. La soluzione poteva venire

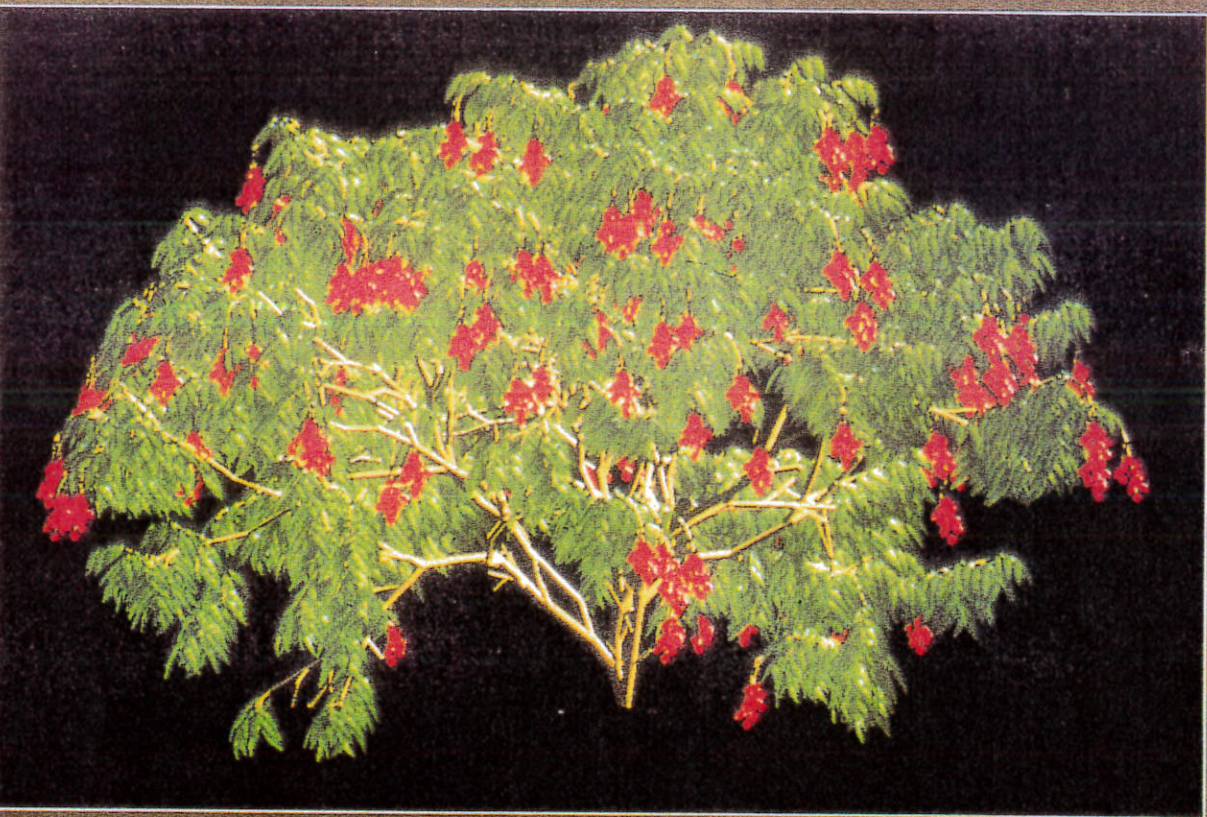
dall'incontro della botanica con l'informatica: ma in che modo si poteva far germogliare una pianta sullo schermo di un calcolatore? In base a una teoria botanica che consente di classificare in modo semplice i vegetali e a misure effettuate sul terreno, il gruppo del CIRAD (*Cen-*

*tre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*) a Montpellier è riuscito a realizzare il primo modello matematico in grado di simulare l'accrescimento di una pianta. La traduzione informatica di questo modello ha dato origine al program-





2A



2B

ma AMAP (*Atelier de Modélisation de Architecture des Plantes*) che rappresenta in immagini di sintesi una dozzina di piante diverse. Gli esempi qui riportati mostrano l'alta qualità grafica che questo programma può raggiungere. La prima immagine a sinistra (1A) nella pagina a

fronte è una rappresentazione di hevea e a fianco (1B) è riprodotta una rappresentazione di un bambù. La grande originalità del modello consiste nella sua capacità di descrivere in modo realistico l'accrescimento, riuscendo in tal modo a rappresentare piante in diverse fasi del loro

sviluppo: le due immagini riprodotte in questa pagina sono un esempio di questo tipo di previsione: infatti nell'immagine 2A è riportata la rappresentazione di un litchi in fiore mentre nell'immagine 2B è visibile la rappresentazione della stessa pianta con i frutti (foto CIRAD).



trasformazione dei fiori in frutti, ma anche al numero di fiori prodotti in un determinato momento e quindi alla sua velocità di crescita e alla sua forma. La possibilità di costruire modelli e quindi di prevedere la crescita di una pianta consente di accedere alla sua capacità produttiva: uno strumento potenziale per definire a priori criteri di selezione in base al rendimento.

Poi l'architettura e la paesaggistica. La costruzione di modelli di crescita delle piante, quale quello ora descritto, può dar luogo alla produzione d'immagini di sintesi di qualità che riproducono piante corrispondenti alla realtà botanica. Le applicazioni sono allora particolarmente interessanti agli occhi dei paesaggisti e degli urbanisti: questi possono simulare realisticamente l'ambiente vegetale delle costruzioni o predire lo spazio occupato da questa o quella composizione di piante. In entrambi i casi si può dunque intravedere uno sfruttamento industriale della modellistica vegetale.

### **Un'avventura all'incrocio di quattro discipline**

Ne consegue che per realizzare tutte queste applicazioni il nostro modello e il programma grafico che l'accompagna devono avere caratteristiche particolari. AMAP è il primo programma grafico in un dominio di attività scientifica in pieno sviluppo - la modellistica dei vegetali - in grado di fornire rappresentazioni realistiche. Oggi infatti esistono numerose modellistiche vegetali con rappresentazioni ottenute mediante infografia, cioè ottenute con immagini di sintesi, ma nessuna è veramente realistica, nel senso che nessuna è effettuata secondo concetti biologici. Queste modellistiche, o questi modelli, possono essere raggruppati in due categorie. I modelli definiti a 'tendenza' botanica da un lato, quali quelli dell'americano J. F. Fisher e del giapponese H. Honda, entrambi botanici che hanno lavorato insieme nel 1977 al Tropical Garden di Miami, i quali si basano su un'osservazione preliminare delle piante. Ma questi modelli sono estremamente rudimentali: infatti vengono utilizzati soltanto alcuni caratteri giudicati essenziali, quali il volume globale, la densità di ramificazione, gli angoli dei rami con il tronco o i flussi di linfa. Pur essendo molto lontano dalla

realtà botanica, proprio questo tipo di modelli ha indotto le prime simulazioni della morfogenesi delle piante, cioè dello sviluppo delle loro forme e delle loro strutture, o della produzione vegetale.

D'altra parte i modelli matematici e informatici, soprattutto per alcune piante, possono imitare perfettamente la realtà, ma non hanno senso dal punto di vista botanico. Essi si basano su regole arbitrarie, accontentandosi di manipolare oggetti matematici, come ad esempio i frattali, equazioni che descrivono oggetti che presentano strutture simili quando vengono osservati a scale di grandezza differenti. Altri modelli utilizzano la nozione di pianta binaria, le piante 'germogliano' producendo a ciascun 'nodo' due rami, oppure utilizzano i grafi, un insieme di regole matematiche invariabili che permettono di produrre una pianta. Esistono poi metodi combinatori. In questo modo negli ultimi anni sono state ottenute immagini eccellenti, soprattutto dagli americani M. Oppenheimer e A. R. Smith della società Pixar o dai giapponesi M. Aono e T. L. Kunii. Si constata tuttavia che questi modelli, siano essi botanici o matematici, non sono del tutto soddisfacenti per un'utilizzazione scientifica o industriale.

Soltanto attraverso un indirizzo pluridisciplinare siamo riusciti a fare una modellistica corrispondente alla realtà con un certo grado di precisione. I nostri lavori, che risalgono alla metà degli anni Settanta, in effetti si situano all'incrocio di quattro discipline: la botanica, l'agronomia, la matematica e l'informatica.

### **Nel cuore del problema: i modelli architettonici**

Alla fine si sono incontrati due indirizzi paralleli, la botanica e la matematica. Da un lato, dall'inizio degli anni Settanta, si ebbero i lavori dei botanici F. Hallé, dell'Università di Montpellier, e R. A. A. Oldeman, dell'Università di Wageningen, i quali hanno definito il concetto chiave di 'modello architettonico', che descriveremo in seguito. Essi hanno dimostrato che tutte le piante esistenti possono essere classificate in base a un numero limitato di modelli, quindi un indirizzo prettamente botanico. Uno di noi, il botanico Claude Edelin, ha allora affinato questo concetto, arricchendolo con osser-

vazioni supplementari. Philippe de Reffye, l'agronomo del nostro gruppo, a sua volta ha messo a punto un modello rigorosamente matematico della crescita delle piante, dimostrando che essa segue leggi probabilistiche. In seguito egli si è ispirato, unendo in una seconda tappa i due indirizzi, ai lavori di F. Halle e R. A. A. Oldeman per stabilire, quantitativamente, sul terreno, queste leggi probabilistiche. Quindi ha realizzato la prima versione del programma AMAP, questa volta sul piano informatico. Infine, Marc Jaeger, un informatico appunto, ha realizzato questo programma e si è dedicato alla visualizzazione di immagini di sintesi per farne un programma concettuale assistito da calcolatore, CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*).

Analizziamone i particolari. Da un lato dunque la modellistica esclusivamente botanica, che consente di classificare i vegetali in funzione della loro architettura. Si definisce qui architettura la disposizione e la struttura geometrica dei rami, delle foglie e dei frutti, come abbiamo già detto, ma anche il risultato, in un determinato momento, della crescita. L'apparente complessità e varietà della struttura spaziale delle piante, soprattutto dei rami per gli alberi, hanno disorientato gli stessi botanici. Infatti essi, per classificare i vegetali, non hanno mai preso in considerazione la struttura del corpo stesso della pianta, ma hanno preferito rivolgere l'attenzione a insiemi di organi meglio circoscritti e stereotipati, quali i fiori. In altri termini, i criteri di classificazione dei vegetali erano, ancora vent'anni or sono, collegati alla descrizione degli organi riproduttori, in particolare dei fiori. Quest'indirizzo si è sviluppato dopo il XVIII secolo, con Linneo e la classificazione delle specie, ed è stato necessario attendere i primi anni Settanta perché venisse proposto un procedimento completamente diverso, che ha portato alla classificazione basata sull'architettura. Si tratta dei lavori di F. Hallé e del botanico olandese R. A. A. Oldeman, condotti presso l'Istituto di Botanica di Montpellier, sull'architettura e la dinamica della crescita delle piante tropicali. Questa ricerca non sarebbe stata possibile senza la ricchezza della foresta tropicale, perché in essa si trovano tutti i modelli, contrariamente a quanto si veri-



fica in Europa o nelle zone temperate.

Malgrado le apparenze le architetture vegetali, nelle loro grandi linee, non presentano notevoli variazioni. Più precisamente, nell'insieme delle piante conosciute in natura non si trova che una ventina di architetture realmente differenti, ciascuna delle quali viene definita modello architettonico. Descriviamo ora i concetti che stanno alla base di questo indirizzo architettonico. Il suo principio consiste 'semplicemente' nel descrivere i rapporti fra i vari organi e le diverse parti del vegetale nel corso della sua vita. La struttura elementare utilizzata per descrivere l'architettura di una pianta è il fusto, chiamato anche asse fogliare, perché porta le foglie. Questo asse è nel suo complesso cilindrico e possiede alla sua estremità un meristema, definito terminale o apicale, formato da tessuti embrionali, che ne assicurano la crescita: si tratta di tessuti indifferenziati che non si sa se daranno origine a foglie o a fiori. Durante la quiescenza invernale il meristema può presentarsi sotto forma di gemma. Durante lo sviluppo il fusto si allunga e s'ispessisce. L'accrescimento in lunghezza è assicurato da un duplice processo, produzione e allungamento delle cellule; la parte che si allunga è definita unità di crescita e potrà dar origine a un tronco o a un qualsiasi ramo. Per la maggior parte del tempo questo fenomeno di accrescimento è caratterizzato da un'alternanza tra fasi attive e fasi di quiescenza che si manifestano con periodi di allungamento e periodi di assenza di allungamento. In questo caso i botanici parlano di crescita ritmica. Questo tipo di crescita è diffuso nelle regioni temperate dove lo sviluppo dei vegetali si verifica soltanto durante una parte dell'anno. Le foglie sono inserite sull'asse fogliare a livello dei 'nodi' e sono prodotte lateralmente dal meristema 'apicale' dato che numerose foglie possono appartenere allo stesso nodo. La porzione di fusto, o di asse fogliare, compresa fra due nodi successivi, cioè fra due insiemi successivi di foglie, viene definita internodo. Questo concetto è fondamentale perché consente di considerare un fusto un insieme lineare di internodi, vera unità di base dell'allungamento. L'unità di accrescimento, il 'mattone elementare' che abbiamo definito prima, corrisponde co-

si all'allungamento di uno o più internodi preesistenti, o preformati, nel meristema terminale.

Continuando la nostra descrizione botanica, che cosa si può dire della ramificazione, altro elemento essenziale della struttura spaziale di una pianta? La maggior parte delle piante sono organismi ramificati, cioè formati da fusti come quelli appena descritti, ma derivati gli uni dagli altri: i meristemi terminali producono meristemi laterali, detti ascellari, che danno origine a fusti laterali, rami che partono dal tronco o da altri rami, naturalmente nelle tre dimensioni. L'accrescimento della pianta dipende quindi evidentemente dall'attività di ciascuna di queste gemme laterali. Se ad esempio tutte sono in grado di formare un asse laterale, la ramificazione sarà continua su tutto il fusto e produrrà un sistema estremamente ramificato. Se per contro entra in attività soltanto qualche gemma, distanziata regolarmente sul fusto, la ramificazione diventerà spazialmente ritmica e i rami saranno raggruppati in piani nettamente caratterizzati.

Nella struttura tridimensionale di un sistema ramificato esiste un altro parametro: la durata di vita relativa dei diversi fusti. La morte dell'asse principale può provocare la comparsa di assi laterali: è la ramificazione simpodiale e in questo caso gli assi laterali hanno la funzione di sostituti di accrescimento. La pianta allora, privata di un fusto dominante, può elaborare un vero tronco attraverso costruzioni successive di assi simpodiali, come ad esempio nei platani. Nel caso inverso, quando l'asse principale è in grado di ramificarsi conservando il suo meristema terminale, cioè la sua capacità di svilupparsi, si parla di ramificazione monopodiale. Simili organismi, come ad esempio alcuni abeti, possono costruire un tronco molto alto e raggiungere senza difficoltà altezze 'forestali'. Infine, per caratterizzare un sistema ramificato è necessario un ultimo parametro: l'orientamento degli assi gli uni in rapporto agli altri. Per esempio nell'abete si può osservare la differenza esistente fra la direzione di crescita verticale del tronco (ortotropia) e quella orizzontale dei rami (plagiotropia).

Tutti questi criteri ora citati, modalità di crescita, di ramificazione, durata della vita degli assi,

orientamento, contribuiscono a determinare l'architettura di un vegetale, e importanti dovrebbero essere le varie combinazioni. Lo studio condotto sul terreno dal gruppo franco-olandese citato prima, a cui in seguito si è unito l'americano P. B. Tomlinson, nel 1978 ha permesso di limitare a 23 i modelli architettonici di tutta la flora. Questi modelli semplici sono l'espressione visibile di un 'programma' che sta alla base dello sviluppo dell'organismo, cioè dell'interazione fra la genetica vegetale e l'ambiente e determina la sua disposizione nello spazio.

### Una realtà un po' più complessa

Per identificare i loro 23 modelli architettonici i tre botanici hanno utilizzato i nomi di altri botanici. Senza entrare troppo nei particolari, citiamo due esempi di modelli per capire a che cosa corrispondono in concreto. Fra tutte le architetture note, la più semplice corrisponde al modello dedicato a E. J. H. Corner, ricercatore inglese dell'Università di Cambridge (FIG. 1). Esso raggruppa le piante che possiedono un solo fusto, cioè prive di ramificazioni, e che hanno infiorescenze, un fiore o un gruppo di fiori, all'ascella delle foglie, porzione di tessuto del fusto riparato dalla foglia. L'esempio più noto è rappresentato dalla palma. Gli altri modelli descrivono piante ramificate. Per esempio quello di Leuvenberg, un ricercatore olandese dell'Università di Wageningen (FIG. 1), è largamente rappresentato in tutto il mondo: alloro, rosa, frangipani, manioca, ecc. Questo modello corrisponde a piante completamente simpodiali. Ogni fusto che costituisce l'organismo è verticale, detto anche ortotropo perché ha la tendenza a raddrizzarsi per scaricare il peso, e tutte le ramificazioni sono identiche. La FIG. 1 mostra i principali modelli architettonici: per esempio il modello di Rauh, ricercatore tedesco di Heidelberg, comprende il pino, il pioppo; quello di Massart, botanico belga, l'abete.

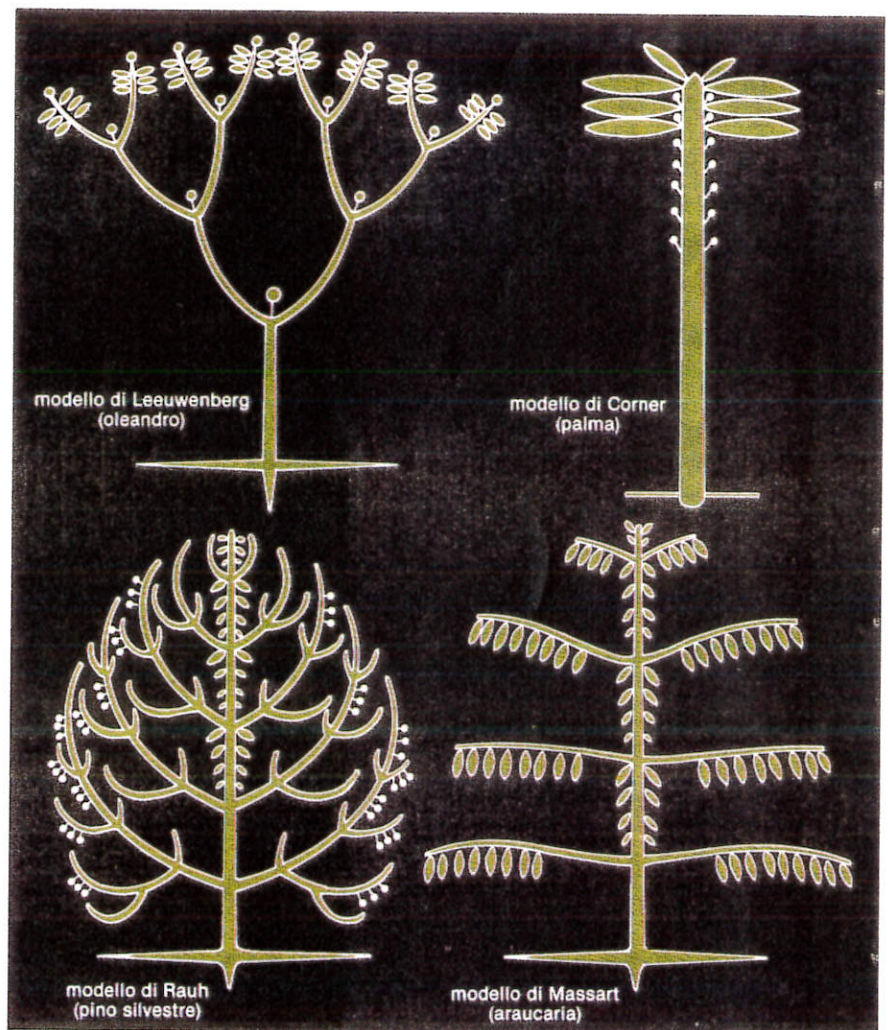
Il concetto di modello architettonico è dunque utile per la descrizione di una pianta, anche se in realtà esso è un po' più complesso di quanto questa breve panoramica lasci intendere, ed è ciò che ha dimostrato C. Edelin. Innanzitutto, questi 23 modelli non costituiscono entità fisse: per esempio, in



alcuni vegetali come l'*Aghatis*, si osserva che gli individui cambiano modello in un momento preciso della loro vita. In altri l'architettura sembra una via di mezzo fra quelle di numerosi modelli. Insomma, si deve dedurre che i modelli corrispondono a forme molto caratteristiche ed estreme. Del resto non è sempre possibile spiegare a fondo l'architettura dei vegetali, almeno degli alberi, considerando soltanto il modello architettonico come l'abbiamo appena descritto, perché a partire da un certo stadio di sviluppo la loro struttura si complica notevolmente. Si tratta del processo di ripetizione o reiterazione. Infatti capita spesso di osservare che nella realtà la cima di certi alberi, come il pioppo, non è che la replica in molti esemplari di ciò che è stato l'albero in uno stadio più giovane. In altre parole, la struttura delle nuove ramificazioni ripete totalmente o in parte l'architettura della pianta nel momento in cui non aveva ancora quelle ramificazioni. Da un individuo unico all'inizio della sua crescita, l'albero adulto diventa una vera 'colonia'. Questo processo interviene sia in occasione di traumi, come tagli, sia durante lo sviluppo normale. In quest'ultimo caso, esso appare automaticamente quando l'organismo supera l'altezza critica. La reiterazione compare, per l'organismo considerato, come un mezzo per aumentare la propria ramificazione e quindi la propria capacità di captare la luce.

### L'incontro fra la matematica applicata e il caffè

Continuiamo la nostra storia. In modo del tutto indipendente dai modelli architettonici, abbiamo elaborato un modello matematico della crescita degli alberi. Storicamente questo indirizzo è nato con uno scopo agronomico. Come abbiamo ricordato all'inizio, in certi alberi, in particolare in una specie di caffè, la produzione di semi dipende dalla crescita e dall'architettura. Proprio questa considerazione ha spinto P. de Reffye, che a metà degli anni Settanta lavorava in Costa d'Avorio sul caffè, ad approfondirne l'architettura. Qual è questo indirizzo matematico? Si tratta di tradurre in termini matematici il funzionamento dei meristemi di una pianta, dato che una pianta è il risultato dell'accrescimento e quindi dell'attività dei



meristemi. È quindi logico che per fare un modello di accrescimento si faccia un modello dell'attività dei meristemi terminali e laterali. Quest'indirizzo, indipendente dai modelli architettonici, si basa tuttavia sul concetto botanico di allungamento, già ricordato, secondo il quale la crescita corrisponde all'allungamento di uno o molti internodi, ma anche su quello di ramificazione e di mortalità del meristema (si veda la TAB. II fuori testo). Per rendere operativo, in un secondo tempo, questo modello matematico, si deve ricorrere alla teoria della probabilità. Infatti le nostre osservazioni ci hanno dimostrato il carattere aleatorio dell'accrescimento: è impossibile, per un insieme di meristemi identici, determinare a priori quali si allungheranno, quali si ramificheranno e quali moriranno.

Innanzitutto, descriviamo come funziona questo modello. I tre fattori citati in precedenza: allungamento, ramificazione, mortalità, dipendono essi stessi da un altro fattore, il tempo. Tuttavia, come l'unità di base nel funzionamento

del meristema è l'internodo, l'unità di tempo, per un determinato meristema, sarà la durata necessaria per formare un internodo supplementare. Quindi si può ritenere che ogni meristema sia dotato in qualche modo di un orologio interno: la pianta fabbrica internodi nei suoi meristemi; questa vera e propria 'fabbrica' di internodi è attiva a intervalli più o meno regolari, che possono dipendere per esempio dalle stagioni. L'orologio, a ogni 'tocco', sottopone un internodo a ciò che si definisce un test di allungamento: la fabbrica gli propone di crescere. Se il risultato di questo test è negativo, non si avranno internodi supplementari. D'altra parte, se è positivo, comparirà un internodo supplementare. Sulla base di questo concetto, si possono costruire modelli matematici dei tre processi, accrescimento, mortalità e ramificazione, e quindi dello sviluppo di un albero: a ogni 'tocco' si determina la probabilità di accrescimento, di ramificazione o di mortalità di un meristema. Il risultato avrà valore 0 oppure 1 (per esempio la gemma





**Fig. 1** La modellistica dei vegetali effettuata al CIRAD si basa in gran parte sui lavori dei botanici F. Hallé, francese, ed R. A. A. Oldeman, olandese; lavorando all'Università di Montpellier essi hanno stabilito, nel 1974, che tutte le piante esistenti possono essere classificate secondo 23 modelli architettonici. Qui vengono presentati i sette modelli architettonici più comuni; il più semplice è il modello di Corner, un tronco alcune foglie e nessun ramo: è il modello della palma. Ogni modello è associato qui a una pianta nota (dis. Institut botanique de Montpellier).

o vive o muore) secondo la legge probabilistica caratteristica del meristema che si determina in un secondo tempo.

La FIG. 2 mostra, con un caso teorico, il funzionamento del modello. Lo schema di FIG. 2a mostra tutte le disposizioni possibili in cui possono comparire gli internodi, in un albero di cui si è stabilito che il numero di tappe di accrescimento è pari a 9, se tutti i risultati dei test sono positivi, cioè se tutti i meristemi funzionano continuamente, le probabilità di allungamento e di ramificazione sono uguali a 1, quelle di morte uguali a 0. Lo schema di FIG. 2b mette in evidenza una realizzazione effettiva di test per un albero reale. Una pausa su un internodo del tronco comporta automaticamente la soppressione di un ramo e la morte di un meristema la soppressione della possibile successione di rami e così di seguito. In questo caso elementare possiamo misurare le probabilità di allungamento medio (si veda la didascalia). Si ritiene che, in base ai risultati dei test, si otterranno piante diverse con elementi combi-

natori molto importanti. L'analisi di un 'miscuglio' di queste piante, a partire da una popolazione di piante della stessa età, fornisce le leggi probabilistiche del funzionamento dei meristemi e quindi quantifica il modello matematico.

Si arriva così alla seconda tappa necessaria per la costituzione del modello matematico: la sua convalida. Infatti, come si è visto, il modello precedente non descrive l'accrescimento di una determinata pianta, esso è del tutto generico. Bisogna allora effettuare misurazioni su piante reali, per consentire che il modello, generale, possa simulare una pianta particolare. Noi qui utilizziamo i modelli architettonici di Hallé e Oldeman. Infatti in un modello architettonico si distinguono gerarchie fra diversi assi presenti: l'asse 1 principale (il tronco) e le reiterazioni di questo asse; quelli chiamati 2, 3, ecc. sono quelli che si articolano sui precedenti (FIG. 2c).

Come regola generale, tutti gli assi della stessa categoria hanno un funzionamento proprio. Perché le misurazioni sul terreno ab-

biano senso devono essere fatte su assi 'equivalenti'. Grazie ai modelli architettonici quali noi li abbiamo presentati, sappiamo quale tipo di asse misuriamo; creiamo dunque un modello conforme alla realtà. Questo stesso principio porta a modelli di piante, ma anche di fiori (si vedano le TAVV. I e II fuori testo).

### Una pianta con rami

Approfondiamo quindi queste misurazioni, per esempio quelle del caffè (TAV. II fuori testo). Selezioniamo cento fusti equivalenti di un clone di caffè, corrispondenti al modello architettonico di Roux a cui appartengono. Questi fusti, dato il loro accrescimento aleatorio, non hanno la stessa lunghezza per quanto riguarda il numero di internodi. Misuriamo allora il numero di internodi per ciascun fusto e osserviamo una distribuzione statistica caratteristica, che è la conseguenza diretta della legge probabilistica del funzionamento in allungamento del meristema terminale - a partire in effetti dalla distribuzione, un calcolo matematico classico, che qui non descriveremo, permette di 'risalire' alla legge probabilistica. Adottiamo lo stesso procedimento per la ramificazione e per la morte. Così la legge statistica di allungamento di un meristema di caffè è una legge binomiale e la probabilità di allungamento è costante. Allo stesso modo abbiamo dimostrato che la legge probabilistica di ramificazione è costante; le leggi statistiche e probabilistiche relative alla mortalità sono molto complesse e non entreremo nei particolari. Precisiamo infine che le leggi probabilistiche libere sono esse stesse funzione di parametri che dipendono dall'interazione fra la pianta e il suo ambiente. Quindi determiniamo questi parametri effettuando un numero elevato di misurazioni in condizioni differenti: potremo allora costruire modelli di accrescimento di un albero in funzione di criteri quali la natura e la quantità di concime utilizzato, l'illuminazione, ecc.

In questo modo siamo riusciti a dimostrare che durante la sua fase di accrescimento lineare - la pianta si allunga in modo continuo e uniforme - il caffè ha un'architettura relativamente semplice. Il meristema del tronco ha un'attività costante. La durata della vita delle foglie va da otto a dieci mesi.

segue a pag. 214





**TAV. II - MODELLI MATEMATICI DI ACCRESCIMENTO VEGETALE.** Accanto all'indirizzo botanico che ha portato al concetto di modello architettonico esiste una modellistica strettamente matematica dell'accrescimento di una pianta. Per

quanto strettamente matematica, questo tipo di modellistica si basa soprattutto sui concetti botanici di accrescimento, ramificazione, mortalità. Le osservazioni sul terreno hanno inoltre dimostrato che è necessario ricorrere a leggi probabilistiche perché

è impossibile stabilire a priori quali meristemi, fra i tanti possibili, si allungheranno, quali si ramificheranno e quali moriranno, come è illustrato nelle immagini 1A, 1B, 1C e 1D, simulazioni di costituzione di una cecropia nelle quali è stata considerata

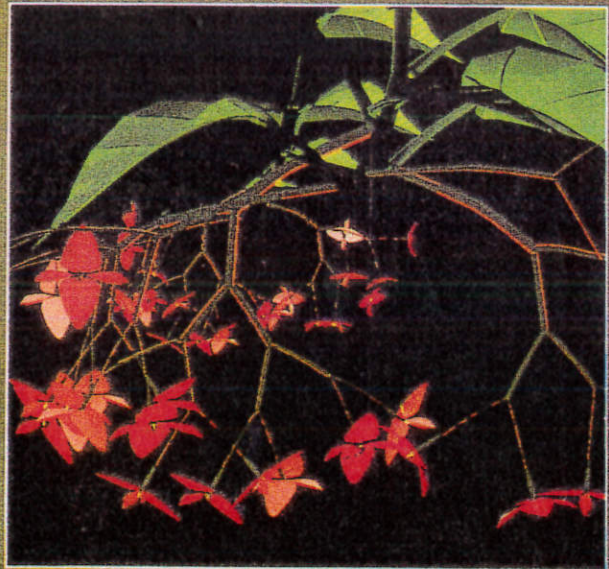




1C



1D



2C

la stessa aleatorietà nella costituzione dei rami che si osserva nella realtà. Una delle prime piante per cui si è simulato l'accrescimento ricorrendo a modelli matematici è il caffè (2A). Nell'immagine di sintesi qui riprodotta viene messo in evidenza un im-

portante concetto botanico, di cui tiene conto il modello, la reiterazione, cioè la comparsa di nuove ramificazioni, nello sviluppo normale o in seguito a un trauma, che ripetono totalmente o in parte l'architettura iniziale della pianta. In questa rappresenta-

zione è ben visibile a destra una simile reiterazione. Con questo stesso modello di accrescimento messo a punto al CIRAD è possibile simulare la crescita di infiorescenze: in 2B e 2C sono riprodotte due simulazioni di infiorescenze di begonie (foto CIRAD).



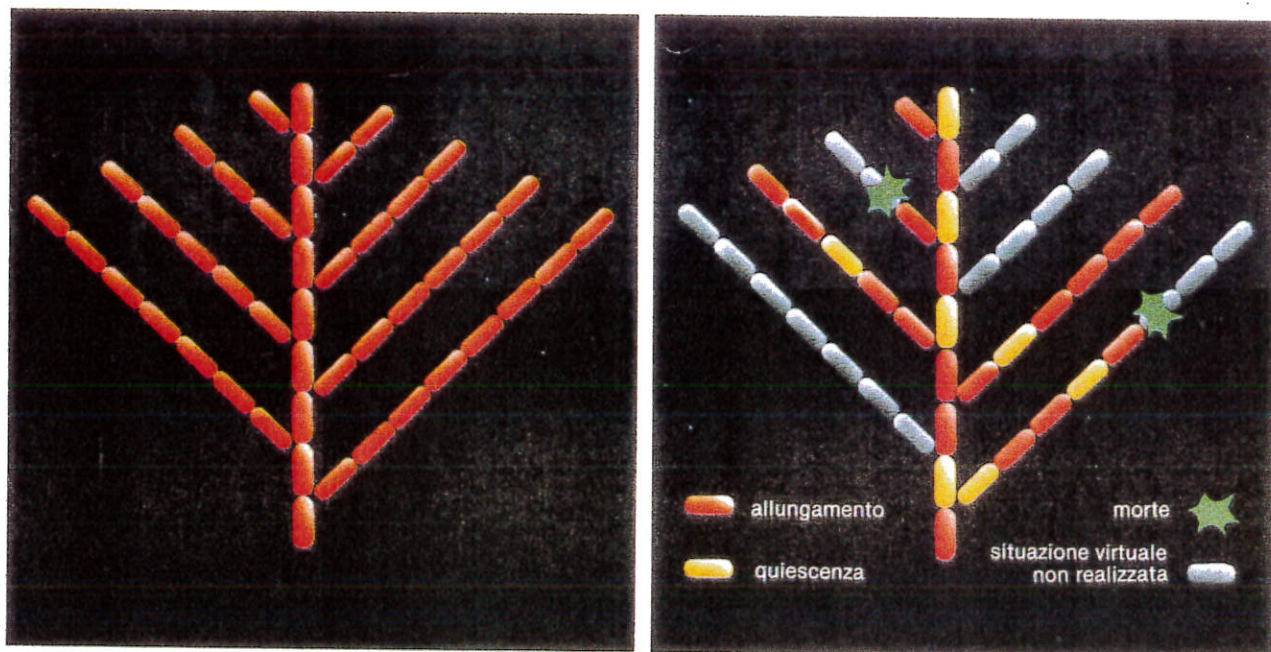


Fig. 2 La costruzione di un modello matematico di accrescimento delle piante si basa sul principio che l'accrescimento è frutto del funzionamento dei meristemi e che l'unità

di base del funzionamento di un meristema è l'internodo. A intervalli più o meno regolari, il meccanismo interno del meristema 'propone' a un internodo di accrescersi, sottopo-

nendolo a quello che si definisce test di allungamento. Se il risultato di questo test è positivo, allora compare un internodo supplementare. In questo modo si possono costruire

I fiori e i frutti possono comparire fra quattro e diciannove mesi in base al numero di gemme fiorali e alla quantità di pioggia.

Determinando i parametri relativi alle precedenti leggi probabilistiche, siamo riusciti a collegare esattamente il rendimento della pianta alla sua architettura e a misurare l'influenza del concime sulla produzione. Il modello è stato applicato anche allo studio dell'allettamento (quando la pianta si ripiega) per cui è possibile prevedere a quale età una pianta si piegherà per un accrescimento e una produzione determinati. Una massa di risultati sfruttabili dagli agronomi.

Infine ricordiamo alcuni altri esempi di piante studiate. Il litchi innanzitutto, appartenente al modello Scarrone (un botanico francese dell'Università di Antananarivo): la probabilità di allungamento dei suoi meristemi è costante (la legge statistica è una legge binomiale); anche le probabilità di ramificazione e di morte sono costanti e le leggi statistiche sono esponenziali. Il numero di internodi per unità di crescita segue una legge di Poisson. Per ultimo il bambù, appartenente al modello di MacLure: tutte le probabilità sono costanti, le leggi statistiche sono binomiali. Come abbiamo appena visto, il modello matematico di funzionamento dell'insieme dei meristemi può rappresentare l'ar-

chitettura di una pianta a qualsiasi stadio del suo sviluppo, nella misura in cui i valori che caratterizzano lo 'stato' dei suoi meristemi sono noti. Si è visto anche che nel modello il funzionamento di un meristema è totalmente determinato e il suo valore è 0 oppure 1.

La rappresentazione grafica del modello è dunque realizzabile se si mette a punto un programma informatico che ritrascrive il modello, come avviene nei vari domini della simulazione. È quanto abbiamo fatto per AMAP. Il primo programma realizzato al CIRAD, nel 1984, ha attirato l'attenzione dell'informatico J. Françon, dell'Università di Strasburgo anch'egli studioso della simulazione delle piante. A Marc Jaeger, allora suo allievo, che si unì al nostro gruppo nel 1985 si deve un netto miglioramento del programma di base, che ha indirizzato verso l'immagine di sintesi.

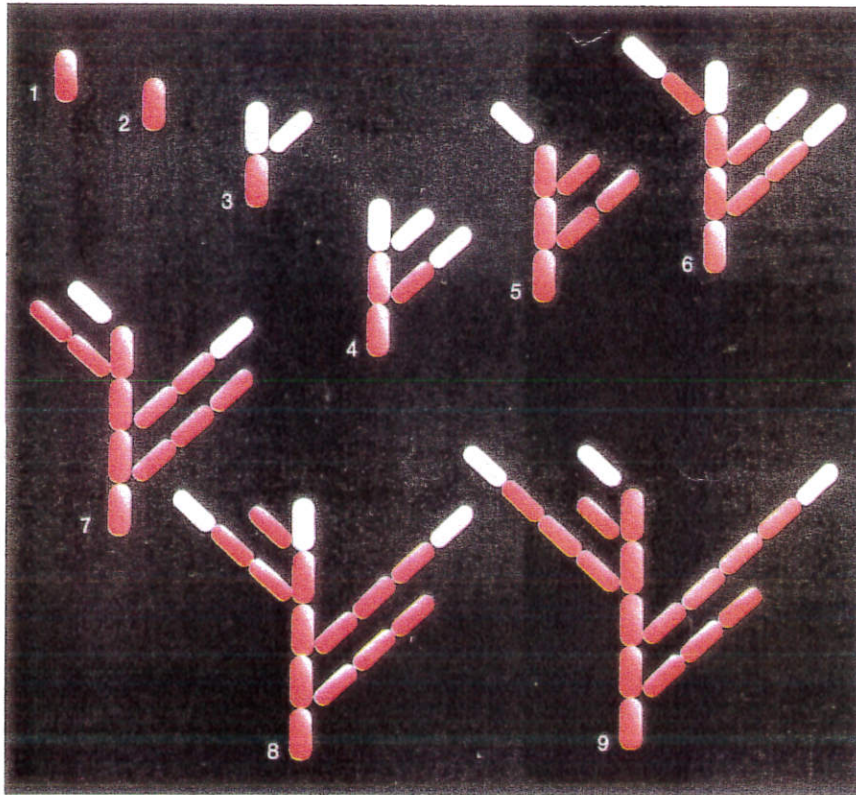
Il programma è basato su un 'motore di accrescimento': si tratta di un algoritmo che permette semplicemente di costruire sistemi ramificati. Indipendente dalla realtà botanica, si limita a gestire la creazione di 'nodi' che corrispondono ai meristemi, i quali compaiono o scompaiono (in base al valore 1 o 0 del segnale che invia il calcolatore). Ma nel nostro caso, questi avvenimenti si verificano secondo le leggi probabilistiche del modello

matematico della pianta considerata. Quindi il programma fabbrica internodi secondo le leggi probabilistiche del modello e non fa altro se non ciò che gli comanda il modello, che il lettore ora conosce bene: dà origine in modo realistico a internodi. Per simulare graficamente la pianta bisogna inserirla nella cornice di un modello architettonico. Determiniamo così in anticipo la natura monopodiale o simpodiale del tronco e dei rami, la loro modalità di ramificazione, la posizione laterale o terminale della fioritura. AMAP è quindi in grado di disegnare una pianta di qualsiasi modello architettonico in qualunque momento del suo accrescimento.

Sul piano strettamente grafico, la pianta è costruita secondo le tecniche tipiche della CAO, utilizzata per esempio in meccanica. Innanzitutto si disegna uno scheletro del tipo 'a fil di ferro', che è la struttura dell'albero calcolata con il metodo ora descritto. In seguito si sistemano su questo scheletro oggetti grafici pescati nelle 'banche' di internodi, di foglie, di fiori e di frutti, disegnati in precedenza. Ecco un esempio relativo al cotone (FIG. 3). Le piante così costruite sono definite da un insieme di coordinate, e si possono allora visualizzare in tre dimensioni da qualunque punto di vista. Per realizzare le superfici vengono utilizzati poli-

segue a pag. 216





modelli matematici dell'accrescimento, della mortalità e della ramificazione. Nella pagina a fronte, a sinistra, sono visibili tutte le localizzazioni che assumerebbero gli internodi se in una pianta, di cui si è stabilito, in modo arbitrario, che le tappe di accrescimento siano nove, i risultati dei test fossero tutti positivi; le probabilità di allungamento e di ramificazione sono uguali a 1 e quella di morte uguale a 0. A destra, un esempio di realizzazione effettiva. Una pausa su un internodo del tronco provoca automaticamente la soppressione di un ramo e la morte di un meristema di un ramo la soppressione della successione del ramo. In un caso teorico si possono misurare le probabilità di allungamento medio, rapporto fra il numero di internodi esistenti e il numero totale possibile.  $P_1 = 5/9$  per il meristema del tronco,  $P_2 = 14/18$  per quelli dei rami. Le probabilità di morte sono  $C_1 = 0$  per il tronco e  $C_2 = 2/18$  per i rami. A fianco l'accrescimento dell'albero man mano che scadono i test.

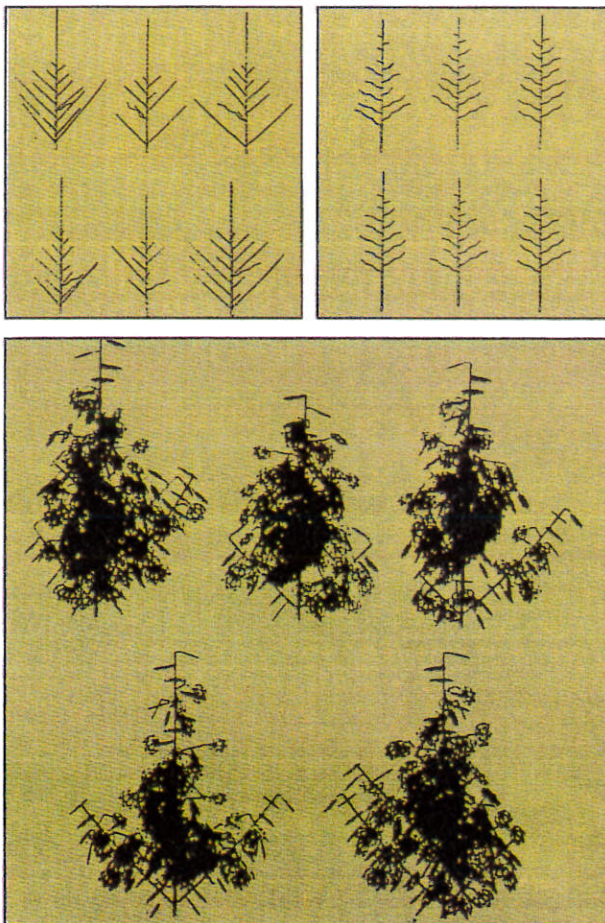


Fig. 3 Il programma grafico AMAP (*Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes*) che si basa sulla modellistica messa al CIRAD, permette di rappresentare una pianta realisticamente, in una serie di tappe.

Sull'esempio del cotone, è stata realizzata la creazione del tronco e dei rami con una tecnica definita 'a fil di ferro' e in due dimensioni (in alto a sinistra), seguita dalla comparsa di reiterazioni, ancora a fil di ferro a

due dimensioni (in alto a destra) e poi la trasformazione a tre dimensioni (qui sopra a sinistra); infine la costruzione di superfici (qui sopra a destra) a partire da poligoni tratti da una biblioteca di forme (*foto CIRAD*).





goni che si possono colorare. L'illuminazione permette in seguito di realizzare l'ombreggiatura e una rappresentazione più realistica.

#### Quale futuro?

Si vede dunque che non sono le caratteristiche informatiche a determinare l'originalità dell'AMAP. Nel dominio dell'immagine di sintesi vengono già utilizzate numerose soluzioni tecniche. L'originalità sta nella modellistica matematica. Questa modellistica dell'architettura vegetale permette di calcolare e rappresentare i diversi stadi dell'accrescimento di una pianta in modo realistico e di simulare il suo futuro nelle più diverse condizioni. Più domini s'inseriscono in questo programma. Oltre all'agricoltura, di cui abbiamo parlato all'inizio dell'articolo, l'insegnamento assistito dal calcolatore

**Fig. 4 Il programma grafico AMAP offre immagini estetiche e spettacolari, che potrebbero essere utilizzate sia nel campo audiovisivo sia nell'urbanistica e nell'insegnamento assistito dal calcolatore. Qui un esempio di possibile realizzazione: un paesaggio composito, costituito da un campo di cotone e di palmizi, con un realismo sorprendente (foto CIRAD).**

(EAO, *Enseignement Assisté par Ordinateur*) ne potrebbe trarre vantaggio, e sicuramente gli audiovisivi e la pubblicità (FIG. 4).

Non esiste soddisfazione maggiore che tentare di comprendere la natura, di rappresentarla, prevederla e quindi rispettarla meglio.

PHILIPPE DE REFFYE  
CLAUDE EDELIN  
MARC JAEGER

Traduzione a cura di Donatella Testa

**Bibliografia:** Costes E., *Analyse architecturale et modélisation du licti. Contribution à l'étude de son irrégularité de production à l'île de la Réunion*, tesi, Università di Montpellier II (1988); de Reffye P. et al., *Plant models faithful to botanical structure and development*, in *Proceed. SIGGRAPH*, Atlanta (1988); Jaeger M., *Représentation et simulation de croissance des végétaux*, tesi, Università di Strasburgo (1987); Oppenheimer Y., in *Computer graphics*, 20, 55 (1986); Eyrolles G., *Synthèse d'images figuratives d'arbres par des méthodes combinatoires*, tesi, Università di Bordeaux (1986); de Reffye P. et al., *Simulation de l'architecture des végétaux*, in *Colloque international "L'arbre"*, Montpellier, settembre 1985, in *Naturalia Monspelienis*, 223 (1986); Edelin C., *L'architecture monopodiale: l'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale*, tesi, Università di Montpellier II (1984); Fisher J. B., Honda H., in *Bot. Caz.*, 138, 337 (1984); Smith A. R., in *Computer Graphics*, 18, 1 (1984); Aono M., Kunii T. L., in *IEEE comp. graph. and appl.*, 5, 10 (1984); Honda H., Tominson P. B., Fisher J. B., in *Ann. Bot.*, 49, 1 (1982); de Reffye P., *Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur*, tesi di esame di Stato, Università d'Orsay (1979); Hallé F., Oldeman R. A. A., Tomlinson P. B., *Tropical tree and forests. An architectural analysis*, Springer Verlag, Berlino, Heidelberg, New York (1974); Hallé F., Oldeman R. A. A., *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*, Masson, Parigi (1974).