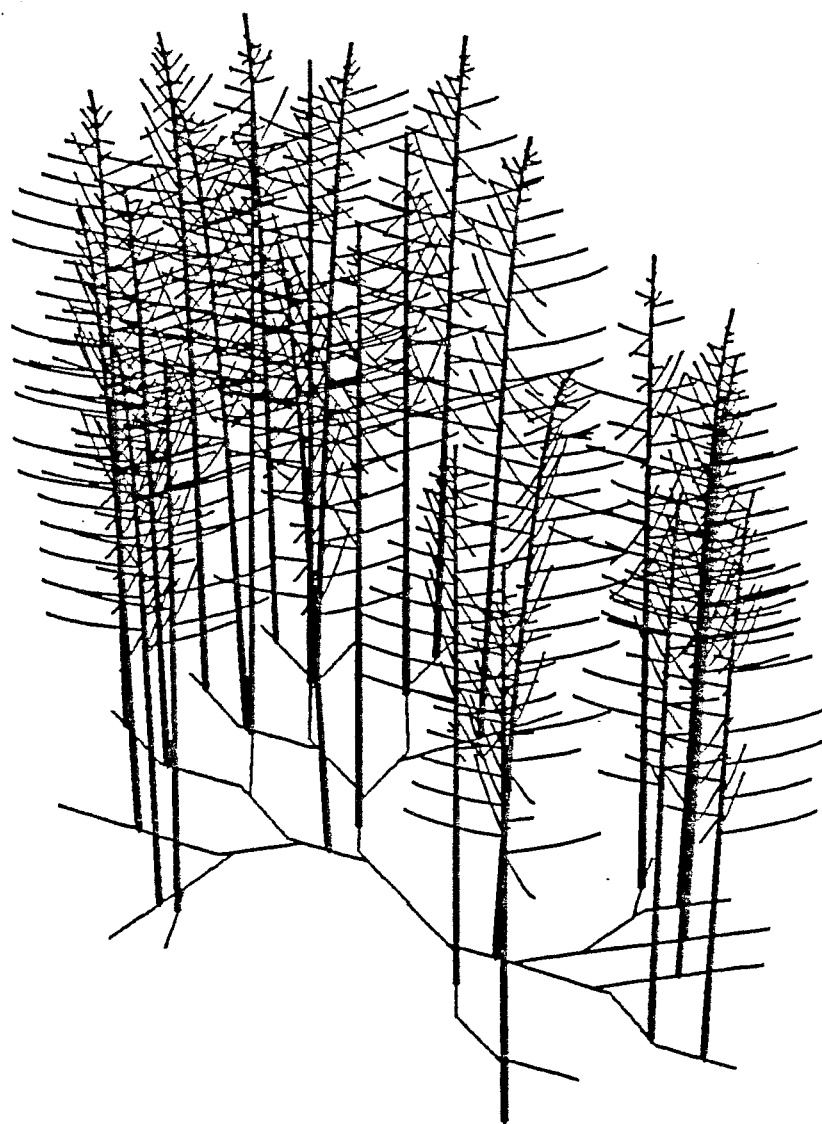


*Deuxième congrès international du bambou  
Juin 1988*

*MODÉLISATION DE LA CROISSANCE ET DE  
L'ARCHITECTURE D'UN BAMBOU:*

*Phyllostachys viridi-glaucescens Rivière A. et C.*



*Pascal DABADIE  
Philippe de REFFYE  
Pierre DINOUARD*

*Laboratoire de biomodélisation du CIRAD  
Institut de botanique de Montpellier*

## Introduction

L'objet de cette étude est l'application d'une méthode à la fois botanique et mathématique permettant de déterminer des paramètres fondamentaux de la croissance et de l'architecture d'une plante.

Les informations recueillies sont assez complètes pour que l'on puisse obtenir une simulation très réaliste via un logiciel complexe de modélisation et représentation des plantes [6].

Le résultat des simulations, qu'on peut exprimer sous forme d'images de la plante, est exact botaniquement et reproduit les variations individuelles. Le cotonnier, le caféier et le litchi ont déjà été étudiés par cette méthode, avec une finalité agronomique.

Si une analyse qualitative permet de se représenter mentalement la croissance d'une plante elle ne fournit qu'une partie des informations nécessaires à une modélisation mathématique correcte.

Seule l'analyse mathématique permettra d'extraire des paramètres fondamentaux de l'architecture de la plante mais indéterminables par l'observation seule.

Cependant l'approche botanique de l'architecture de la plante étudiée est le préalable indispensable à l'étude statistique, sans lequel on ne saurait pas quoi mesurer.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude a porté sur *Phyllostachys viridi-glaucescens* Rivière A. et C., dans la bamboueraie de Prafrance, à Anduze dans le Gard.

L'analyse architecturale se fait par l'observation et le dessin. Les mesures mathématiques portant sur des nombres d'entre-noeuds, le travail de terrain consiste principalement à relever par des schémas les ramifications de la plante en marquant les entre-noeuds des axes. On relève aussi des données géométriques telles que la phyllotaxie, les angles d'insertion, l'évolution des diamètres et des longueurs d'entre-noeuds. Les mesures ont nécessité l'abattage d'une trentaine de chaumes. Chaque année les nouveaux chaumes sont marqués d'une tache de peinture de couleur différente. La connaissance de l'âge des chaumes a été un renseignement très précieux.

Je remercie ici Mr Crouzet, propriétaire de la bamboueraie pour son aide matérielle et ses conseils durant l'étude sur le terrain.

Au laboratoire le dépouillement des données s'est effectué à l'aide d'un tableur sur micro-ordinateur. Les ajustements de paramètres et simulation de Monte-Carlo ont été calculés sur le mini-ordinateur du CIRAD (MV20000 de DATA GENERAL).

Pour la production d'images de synthèse par le logiciel de simulation des plantes on a fait appel au mini-ordinateur, les images étant visualisées et mises au point sur une station graphique de haut niveau (IRIS 4D de Silicon Graphics).

Les images de simulation présentées dans cet article proviennent d'une imprimante à laser.

## RAPPEL DES PRINCIPES DU MODÈLE MATHÉMATIQUE

Ceci n'est qu'une présentation sommaire et nous renvoyons pour plus de précision le lecteur aux travaux déjà effectués sur d'autres plantes [5,6,7]. Il s'agit de déterminer les paramètres d'un modèle très général de croissance de système ramifié.

On assimile la plante à un assemblage d'éléments de base formés d'un entre-noeud (portion d'axe) surmonté d'un noeud (zone de ramification comportant une ou plusieurs feuilles et leur bourgeon axillaire).

Le temps est discrétisé en tops d'horloge élémentaires.

A chaque top on décide de l'évolution de chaque méristème apical qui peut mourir, former un élément supplémentaire ou rester latent.

Si l'on sème deux plantes de la même espèce on les voit rapidement se différencier tout en gardant un air de famille.

Des axes identiques au départ ne se développeront pas avec la même vigueur chez l'une et l'autre.

La simulation stochastique rend bien compte des variations individuelles: l'évolution de chaque méristème est déterminée par la méthode de Monte-Carlo, qui consiste à comparer la probabilité d'un évènement (mort, accroissement...) à un nombre aléatoire compris entre zéro et un.

### Méthode d'estimation des paramètres

On appelle "dimension" d'un axe le nombre de tests qu'il a subi, ce qui correspond à son âge en tops d'horloge.

Soit un axe de dimension N dont la probabilité d'allongement vaut P. La longueur d'une population d'axes se distribuera selon la loi binomiale B(N,P).

Inversement des axes de même taille peuvent avoir une dimension différente. La probabilité qu'un axe de K entre-nœuds provienne de N tests est donnée par une loi binomiale négative.

$$P(X = K) = C_{N-1}^{N-K} P^K (1 - P)^{N-K}$$

Les axes d'ordre différent poussent généralement à des vitesses différentes: leurs tops d'horloge n'ont pas la même durée. On définit le rapport d'horloge  $W_n$  par le rapport entre l'unité de temps de l'axe porteur n-1 et de l'axe d'ordre n.

En observant l'extrémité d'un axe ramifié, on peut estimer trois paramètres fondamentaux: les probabilités d'élongation  $P_1$ ,  $P_2$  de l'axe principal et des axillaires, et le rapport d'horloge  $W_2$  (\*).

On démontre [6] qu'à K entre-nœuds du sommet et si  $P_1, P_2, W_2$  sont constants que la variance théorique moyenne du couple formé par le nombre d'entre-nœuds de deux axes d'ordre 2 séparés de L entre-nœuds vaut:

$$V_I = \frac{(K + L/2)}{P_1} W_2 \cdot P_2 (1 - P_2) + \frac{P_2^2 \cdot W_2^2 \cdot L (1 - P_1)}{2 \cdot P_1^2} + \frac{P_2^2 \cdot W_2^2 \cdot L^2}{4 P_1^2}$$

On estime  $V_I$  par la moyenne des variances des couples d'axes de l'échantillon. Pratiquement il faut que L soit petit (1 ou 2) pour observer une convergence rapide vers la valeur théorique.

par ailleurs à K entre-nœuds du sommet:

$$E(X) = \frac{K \cdot P_2 \cdot W_2}{P_1}$$

$$V(X) = \frac{K \cdot P_2 (1 - P_2) W_2}{P_1} + \frac{K (1 - P_1) W_2^2 P_2^2}{P_1^2}$$

On tire de ces trois équations les estimateurs:

$$P_1 = 1 - \frac{1}{E(X)^2} \left( K (V(X) - V_I) + \frac{L}{2} \left( \frac{L \cdot E(X)^2}{K} + V(X) \right) \right)$$

$$P_2 = \frac{1}{E(X)} \left( \frac{L}{2K} \cdot (V(X) + \frac{L \cdot E(X)^2}{K}) - V_I \right) + 1$$

$$W_2 = \frac{E(X) \cdot P_1}{K \cdot P_1}$$

La précision des estimateurs des paramètres est mesurée par simulation numérique, la méthode du maximum de vraisemblance étant difficile à mettre en oeuvre dans ce cas.

(\*) Les indices correspondent à l'ordre de ramification des axes.

## APPLICATION AU BAMBOU

*Phyllostachys viridi-glaucescens* Rivière A. et C. est un grand bambou originaire de Chine centrale, où il atteint, comme à Prafrance dans les Cévennes environ quatorze mètres de hauteur. Il est du type traçant [2][3], le rhizome présentant de grands axes horizontaux portant des chaumes latéralement.

Une caractéristique du genre *Phyllostachys* est que les noeuds ramifiés portent en général deux branches de taille inégale (fig.2).

Nous appellerons A la grande et B la petite.

L'axe B est en fait une ramification de A, dont le premier entre-noeud est très court, ce qui fait paraître A et B issus du même axe. Les entre-noeuds situés en début de zone de ramification ne portent souvent qu'un axe A alors que ceux de l'extrémité de l'axe peuvent présenter trois axes A B C, C étant axillaire de B.

Le diamètre du chaume n'est pas maximal à la base mais vers trois mètres de hauteur.

La première année le chaume ramifie jusqu'à l'ordre quatre, exceptionnellement cinq; il porte des gaines caduques. Tous les axes portent terminalement deux à cinq feuilles unies par leur gaine. La première année l'édification du chaume est entièrement monopodiale. Au printemps suivant les feuilles tombent, les dernières restant attachées entre elles et emportant la portion d'axe qu'elles enserrant.

Il apparaît dans la même période à partir des bourgeons axillaires des entre-noeuds inférieurs aux feuilles de l'année précédente des axes courts feuillés (fig.1). La croissance du rhizome a été étudiée à Prafrance sur une espèce proche : *Phyllostachys viridis* (Young) Mc Clure [2].

### Étude de la première année de croissance

La couronne du bambou est conique à son extrémité et devient cylindrique plus bas (fig.4). Tout se passe comme si les axes 2 avaient une dimension finie, s'arrêtant de pousser alors que les A2 supérieurs sont encore en croissance. C'est dans la partie conique qu'il faut pratiquer l'analyse des cimes, qui demande que les axes de la cime n'aient pas été bloqués à des moments différents les uns des autres. Tous les axes de l'extrémité de la couronne ont leur croissance stoppée ensemble, ce qui ne perturbe pas les calculs. Si une plante subi un arrêt total de croissance (l'hiver par exemple), cela n'influencera pas les paramètres; les tops d'horloge mesurant en fait une activité biologique et non pas un temps physique.

Il apparaît que la cime reste conique jusqu'à vingt entre-noeuds du sommet.

On a compté sur 13 chaumes les entre-noeuds des axes A2 situés à K et K + L entre-noeuds du sommet, K variant de 8 à 20 et pour L = 1, ce qui correspond à 136 couples d'axes.

cela donne:

$$0,59 < P_1 = 0,79 < 0,92$$

$$0,91 < P_2 = 0,94 < 0,96$$

$$0,56 < W_2 = 0,73 < 0,86$$

L'intervalle de confiance, qui est asymétrique, est donné pour le risque  $\alpha = 5\%$ . On voit que les axes A2 poussent moins vite que l'axe 1.

On appelle cette méthode la méthode des cimes.

### Résultats pour les axes B2

Bien que les axes B2 soient en fait des ramifications de A2, ils sont morphologiquement différents des autres axes d'ordre 3 et doivent être traités séparément.

Les premiers B2 n'apparaissant en moyenne qu'à 5 entre-noeuds du sommet on suppose qu'ils subissent un retard à l'élongation de  $4/P_1 = 4$  tops d'horloge.

On élimine le biais introduit dans l'estimation en remplaçant K par K - 4.

Cela donne:

$$0,23 < P_1 = 0,74 < 0,99$$

$$0,87 < P_{2B} = 0,95 < 0,98$$

$$0,24 < W_{2B} = 0,71 < 1,04$$

Le même calcul est effectué à l'ordre supérieur entre les A2 et A3 de 9 à 15 entre-noeuds du sommet sur 128 couples, avec les résultats suivants:

$$0,91 < P_2 = 0,95 < 0,99$$

$$0,96 < P_3 = 0,99 < 1$$

$$0,65 < W_3 = 0,67 < 0,7$$

Entre les axes A3 et A4 on trouve:

$$P_3 = 0,95$$

$$P_4 = 1$$

$$W_4 = 0,5$$

Si l'on se rapproche trop du sommet la méthode de Monte-carlo ne permet plus de calculer l'intervalle de confiance, l'estimation étant biaisée par l'approximation de réels par des entiers.

#### Calcul des dimensions maximales pour A2 et B2

Si la zone cylindrique est générée par une dimension finie, la distribution du nombre d'entre-noeud des axes A2 doit suivre une loi binomiale  $B(N;P_2)$ .

On estime d'après la distribution observée:

$$N = 21$$

$$P_2 = 0,9 \pm 0,07$$

ce qui est cohérent avec l'estimation de  $P_2$  par la méthode des cimes.

Les axes A2 atteignent donc bien une dimension limite.

#### Distribution de la longueur des A2

K	16	17	18	19	20	21
effectif observé	3	7	14	19	20	11
effectif théorique	3,6	7,1	14,4	20,7	18,9	8,2

Pour les axes B2 on trouve la loi binomiale  $B(21;0,94)$ .

On a là une deuxième façon d'estimer les probabilités d'élongation des A2. Il est avantageux, et c'est souvent possible, d'appliquer plusieurs méthodes différentes pour estimer le même paramètre.

#### Accidents de croissance des axes

Une partie importante des axes d'ordre 1 à 3 sont terminés brutalement aux niveau d'un noeud (fig.3). Or un axe âgé ne casse jamais à cet endroit. Il s'agit de la cicatrice de l'abscission qui se produit quand l'apex en élongation meurt.

Il semble que la mort des apex soit principalement due à l'entrechoquement des chaumes, ils avortent parfois aussi spontanément.

Cas des A2:

On se place dans la zone à dimension finie.

Si la probabilité de mort est constante sur l'axe la distribution de la longueur des axes est régie par une loi qui est la combinaison d'une loi binomiale et d'une loi exponentielle:

de fonction génératrice:

$$G(z) = (1 - P_v) \frac{(1 - (P_v(1 - P_2 + P_2z))^N)}{1 - P_v(1 - P_2 + P_2z)} + P_v^N (1 - P_2 + P_2z)^N$$

et d'expression pour les probabilités d'état :

$$P(X = K) = \sum_{i=K}^{N-1} C_i^K P_2^K (1 - P_2)^{i-K} (1 - P_v) P_1^i + C_N^K P_2^K (1 - P_2)^{N-K} P_1^N$$

avec :

$$E(X) = \frac{P_2 \cdot P_v}{(1 - P_v)} (1 - P_v^N)$$

$$V(X) = \frac{P_2 \cdot P_1}{(1 - P_1)^2} \left( 1 - P_v (1 - P_2) - (1 - P_v) (2 \cdot N \cdot P_2 + 1) P_1^N - P_2 \cdot P_1^{2N+1} \right)$$

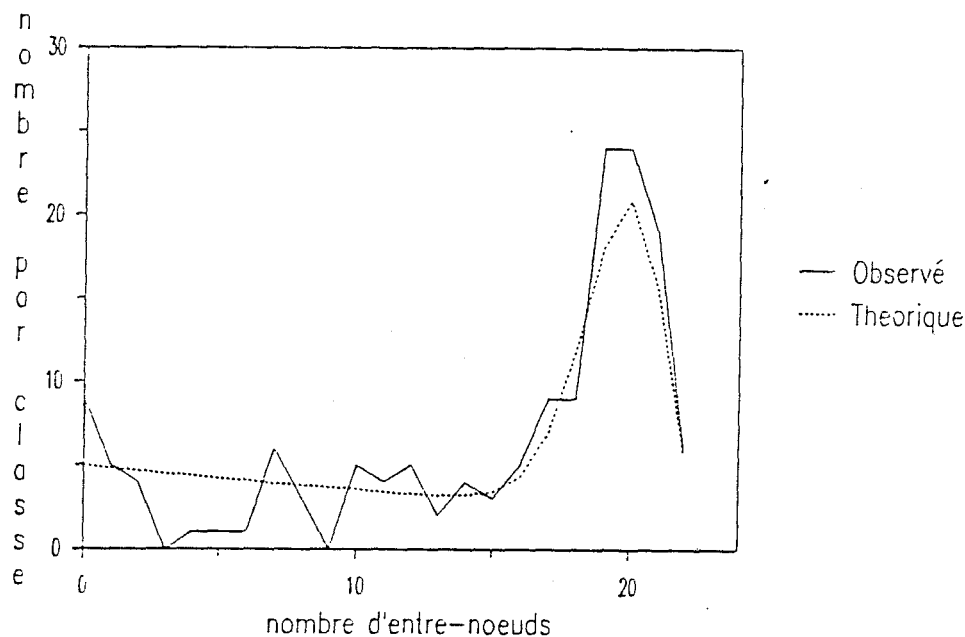
avec N: dimension maximale de l'axe

P<sub>2</sub>: probabilité d'élongation

P<sub>v</sub>: probabilité de vic

nb d'entre-noeuds	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
échantillon	9	5	4	0	1	1	1	6	3	0	5
valeurs théoriques	5	4,8	4,7	4,5	4,4	4,2	4,1	3,9	3,8	3,7	3,6
simulation d'après les paramètres estimés	4	4	6	3	6	2	3	6	7	2	2

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
échantillon	4	5	2	4	3	5	9	9	24	24	19	6
théorie	3,4	3,3	3,2	3,2	3,4	4,3	6,9	11,9	18,1	20,9	15,7	5,7
simulation	5	2	4	0	2	6	5	14	16	27	17	6



On remarque en début d'axe la loi exponentielle décroissante engendrée par les accidents de croissance et en fin d'axe la loi binomiale engendrée par les pauses.

On trouve ici une dimension limite de 25. N étant connu on recherche les valeurs de P<sub>2</sub> et P<sub>1</sub> qui minimisent le χ<sup>2</sup> de comparaison avec l'échantillon.

On trouve un ajustement correct avec les valeurs

$$P_2 = 0,89 \pm 0,02$$

$$0,955 < P_1 = 0,97 < 0,98$$

Les calculs n'ont pas été étendus aux autres types d'axes mais la loi est vraisemblablement la même avec des paramètres de valeurs différentes.

#### Dimension de l'axe 1

On conçoit que la graine de bambou n'édifie pas la première année un chaume de 14 m mais qu'il se formera chaque année des chaumes de plus en plus grands jusqu'à atteindre une taille maximale. Ce phénomène, fréquent chez les plantes rhizomateuses, est décrit comme une des manifestations de la "croissance d'établissement"[4]. La plantation étudiée provient de boutures effectuées aux environs de 1850 et n'a jamais fleuri. Une proportion non négligeable des chaumes sont plus petits (entre 5 et 10 m) et plus grêles que la moyenne. Étant donné l'âge de la plantation il ne s'agit pas de croissance d'établissement, (on estime que le rhizome produit des chaumes de taille maximale à partir de 10 ans), et leur position sur le rhizome est inconnue.

Pour travailler sur une population homogène tous les calculs ont porté sur des chaumes jugés de taille maximale.

Selon le modèle le nombre d'entre-nœuds des axes 1(\*) d'un échantillon doit suivre une loi binomiale  $B(N, P_1)$ . En estimant  $N$  et  $P_1$  d'après un échantillon de 16 tiges on obtient:

$$P_1 = 0,82 \pm 0,05$$

$$64 < N = 68 < 73$$

estimation comparable au  $P_1 = 0,79$  obtenu par la méthode des cimes. Les axes 1 ont donc une dimension finie.

#### Effet de base

La base de la couronne est en forme de cône inversé, la longueur des axes 2 augmentant progressivement vers la zone médiane dont les probabilités d'élongation, de mort et la dimension ont été calculées. On peut traduire ce phénomène, appelé "effet de base" et assez général chez les arbres, par une variation de la dimension maximale des A2. Une régression montre que cette variation est linéaire. La dimension de l'A2 est de 17 à 16 entre-nœuds à partir de la base(\*\*), et croît linéairement jusqu'à la limite de 22 atteinte au 21<sup>ème</sup> entre-nœud.

#### Étude de la deuxième année de croissance

Après la chute des feuilles de première année entraînant les apex, la reprise se fait par les bourgeons situés sur les derniers entre-nœuds de l'axe. Ils forment des axes courts feuillés que nous noteront AC1 (axes courts de première génération).

#### Loi d'apparition des AC1 sur A4 et A5

Il apparaît de un à cinq AC1 à l'extrémité des axes, de telle façon que  $n$  AC1 occupent toujours les  $n$  derniers nœuds de l'axe porteur.

On calcule les probabilités  $P_{bi}$  pour qu'un axe porte  $i$  relais. Ces probabilités sont variables suivant la hauteur dans la couronne.

nombre de relais	0	1	2	3
haut de la couronne	0	0,25	0,69	0,06
milieu	0	0,57	0,43	0
bas	0,12	0,78	0,1	0

On voit que le nombre de relais augmente de la base au sommet.

(\*) Par convention on définit le tronc d'un chaume comme d'ordre de ramification 1, bien qu'issu d'un rhizome ramifié.

(\*\*) La base est définie par l'entre-nœud portant le verticille de racine supérieur.

Beaucoup d'AC1 sont ramifiés en fin de deuxième année et portent des axes courts semblables aux AC1 et que nous noterons AC1'. Il y a donc deux périodes de pousse la deuxième année (fig.6). Les AC1 portent de 0 à 3 AC1', groupés à l'extrémité comme les AC1 eux-même sur leur axe porteur. Soit  $P_{bi}$  la probabilité pour qu'un AC1 ramifie de  $i$  AC1'.

nombre d'AC1'	0	1	2	3
haut de la couronne	0,87	0,09	0,04	0
milieu	0,18	0,44	0,26	0,02
bas	0	0,75	0,20	0,05

Ce gradient est inverse du précédent, les AC1' étant les plus fréquents à la base de la couronne. Ces mécanismes ont pour effet de multiplier le nombre de feuilles par les coefficients suivants.

haut de la couronne : 2,1

milieu : 2,9

bas : 2,1

Soit 2,4 en moyenne.

Ceci montre bien que la première année est principalement consacrée à l'édification des axes porteurs et les suivantes à l'extension et au renouvellement du système chlorophyllien.

### Évolution du chaume après deux ans

L'évolution au-delà de la deuxième année n'a pas été étudiée statistiquement, on s'en tient ici à une approche qualitative.

Un chaume peut vivre au moins une dizaine d'années.

La quantité de feuillage ne peut pas se multiplier indéfiniment comme durant la deuxième année.

Elle doit devenir stationnaire aux environs de la troisième année, puis décroître jusqu'à la mort du chaume. Lors du vieillissement les axes d'ordre 1, 2 et 3 se dessèchent progressivement par leur extrémité tandis que les A2 et B2 de la base meurent et s'élaguent.

Ceci a pour effet de regrouper la partie vivante en une boule de feuillage très dense située dans le tiers supérieur de la couronne.

Le renouvellement du feuillage est assuré, en plus des mécanismes précédemment décrits, par le réveil de bourgeons restés latents. Ces bourgeons sont situés à la base des axes courts, et à la base des axes d'ordre 4 (fig.5).

Certains bourgeons peuvent rester latents pendant au moins cinq ans.

Nous n'avons jamais observé l'apparition de deux générations d'axes courts dans l'année à une autre époque que la deuxième année.

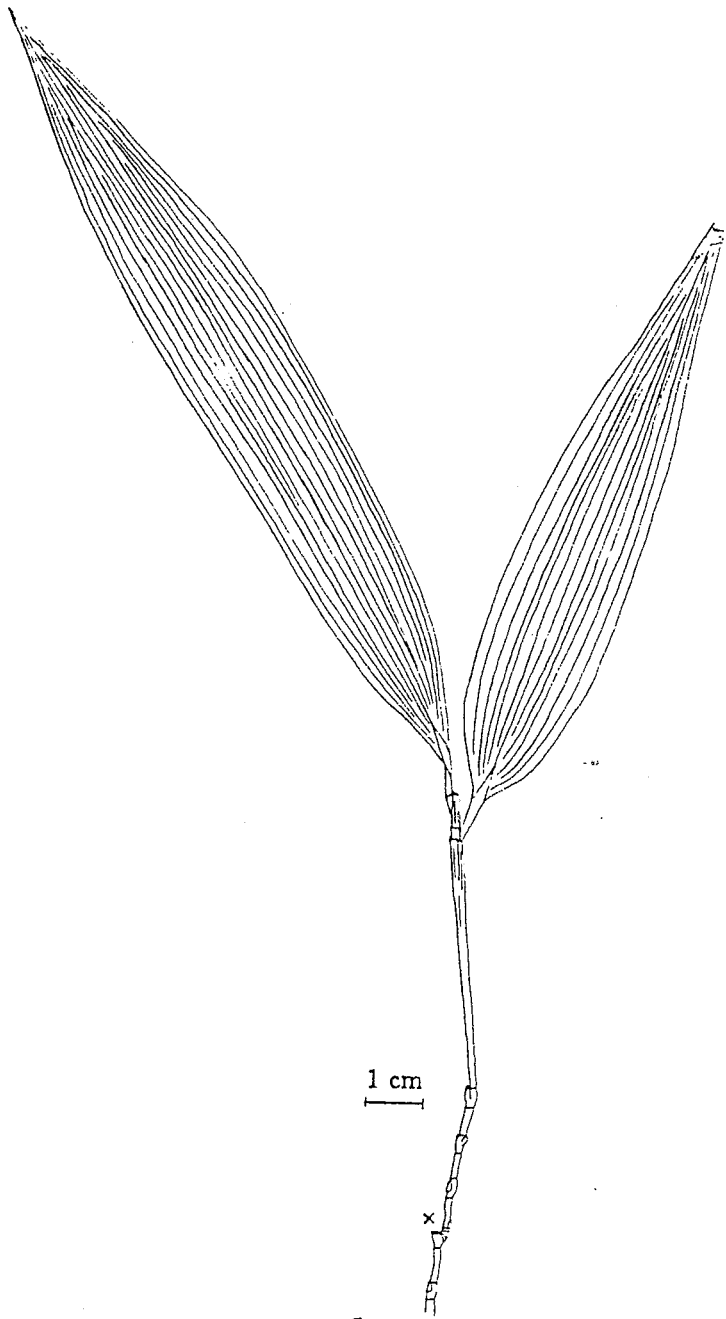
On voit que contrairement à une idée répandue, et du moins chez cette espèce, il ne suffit pas de compter l'ordre de ramification des axes courts pour déterminer l'âge d'un chaume puisqu'il est difficile de déterminer s'il s'est établi une ou deux générations d'axes courts chaque année.

On peut toutefois proposer la méthode suivante, qui n'est valable que pour cette espèce dans la plantation de Prafrance:

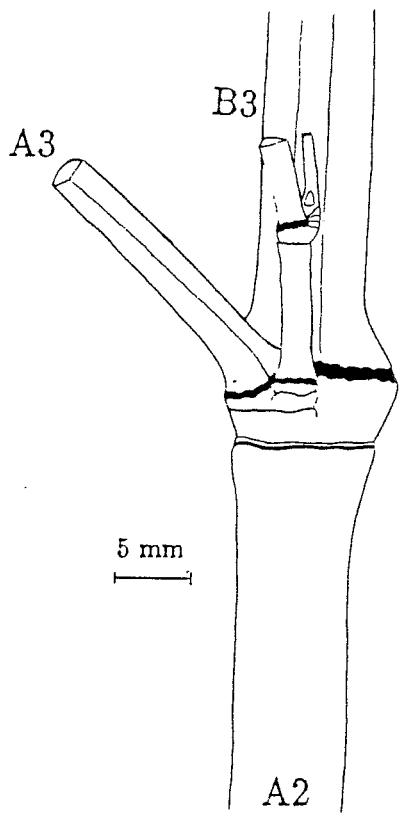
Sur des ramifications issues du sommet, chercher le nombre  $n$  d'empilement maximal des axes courts.

Procéder de même sur des ramifications issues de la base. On doit trouver un maximum  $n + 1$  (à cause du doublement fréquent en deuxième année). L'âge est alors  $n + 1$ . En pratique la détermination de l'âge est délicate chez les chaumes agés.

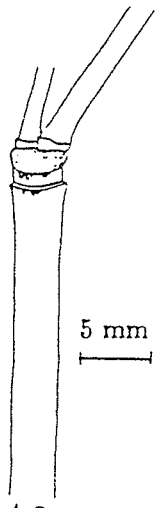




1 : axe court

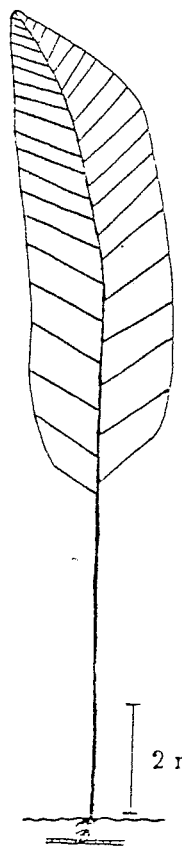


2: détail de noeud

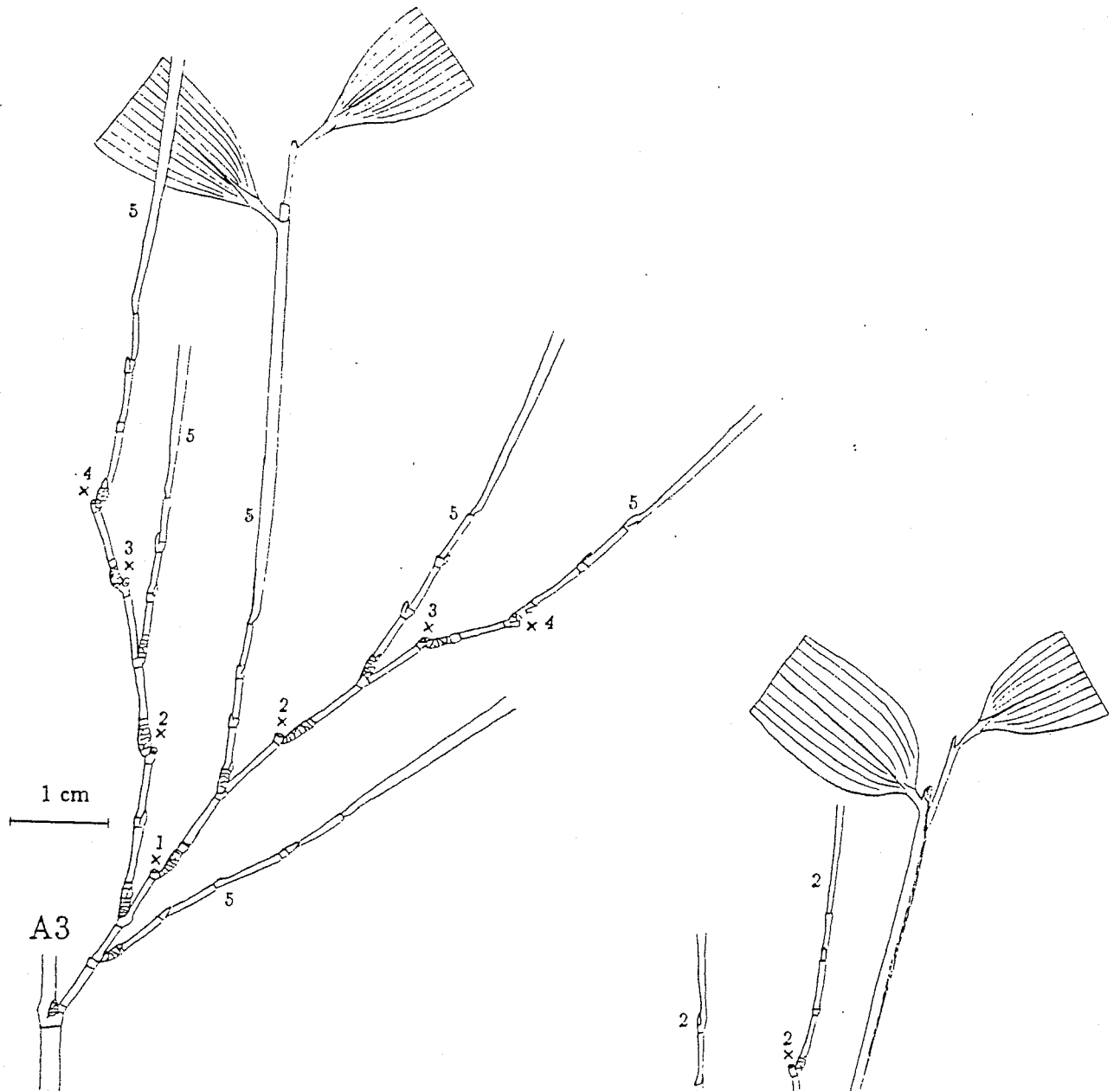


A3

3: axe endommagé pendant la croissance  
l'abscission se produit sur un noeud.



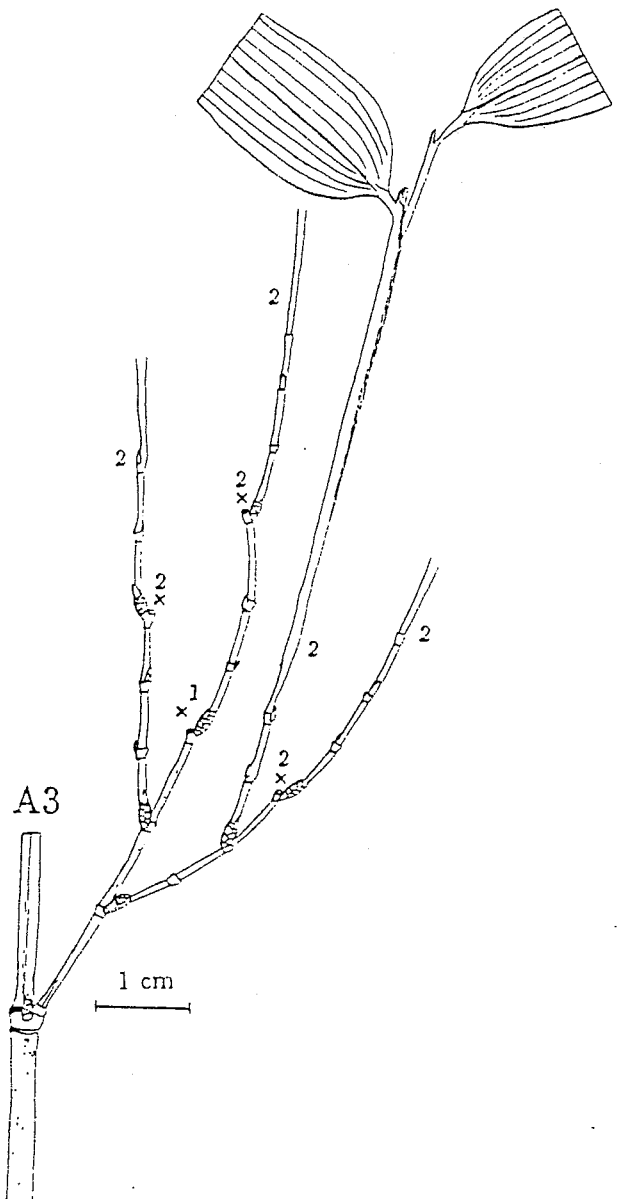
4 : silhouette de chaume



5 : rameau de cinq ans  
(un seul axe court la deuxième année)

On voit que certains bourgeons restent latents  
plusieurs années.

*Les numéros indiquent l'année  
de formation de l'axe.*



6 : rameau de 2 ans  
(deux axes courts la deuxième année)

## SIMULATION DE LA CROISSANCE DU BAMBOU

Les données recueillies sur une plante par cette méthode sont assez précises pour pouvoir en simuler la croissance pas à pas.

Le principe du logiciel de simulation consiste à appliquer à chaque top d'horloge les tests de mort, d'élongation et de ramification aux méristèmes apicaux créés.

On obtient donc pour un âge donné une liste d'entre-noeuds reliés entre eux. Parallèlement le programme [8] calcule la position dans l'espace de chaque élément créé, utilisant pour cela des paramètres comme la phyllotaxie, l'angle de ramification, la longueur des entre-noeuds ou l'élasticité du bois. Sont également tenus en compte l'élagage des axes et leur épaissement. Dans le cas du bambou, l'évolution de la longueur et du diamètre des entre-noeuds de chaque axe a été intégrée.

On dispose donc en fin de calcul d'une description complète dans l'espace de la plante dont on peut tirer une image et à laquelle on peut appliquer des calculs pour déterminer par exemple la production de bois ou l'interception solaire. L'image, allée à des ajustements statistiques, permet une très efficace validation du modèle (une image ressemblante ne prouve pas à elle seule que la modélisation soit juste mais une mauvaise image indique une lacune de la modélisation).

Philippe de Reffye est à l'origine du logiciel, dont la première application fut l'étude agronomique du caféier [5]. Il a ensuite été développé par Marc Jaeger [8], qui l'a rendu plus performant et l'a adapté à la production d'images de synthèse.

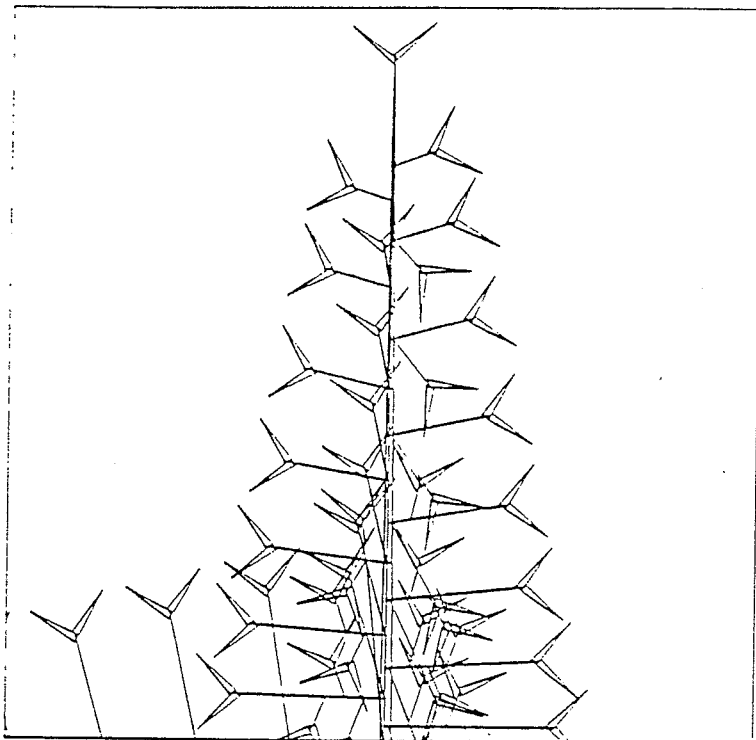
# IMAGES ISSUES DU LOGICIEL DE SIMULATION

Ces représentations intègrent tous les résultats des mesures effectuées sur le terrain.

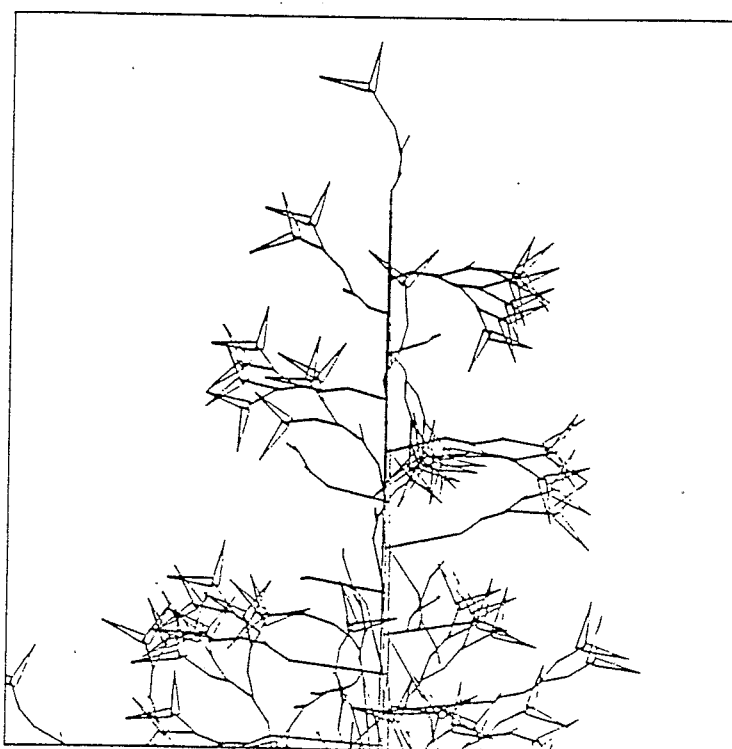
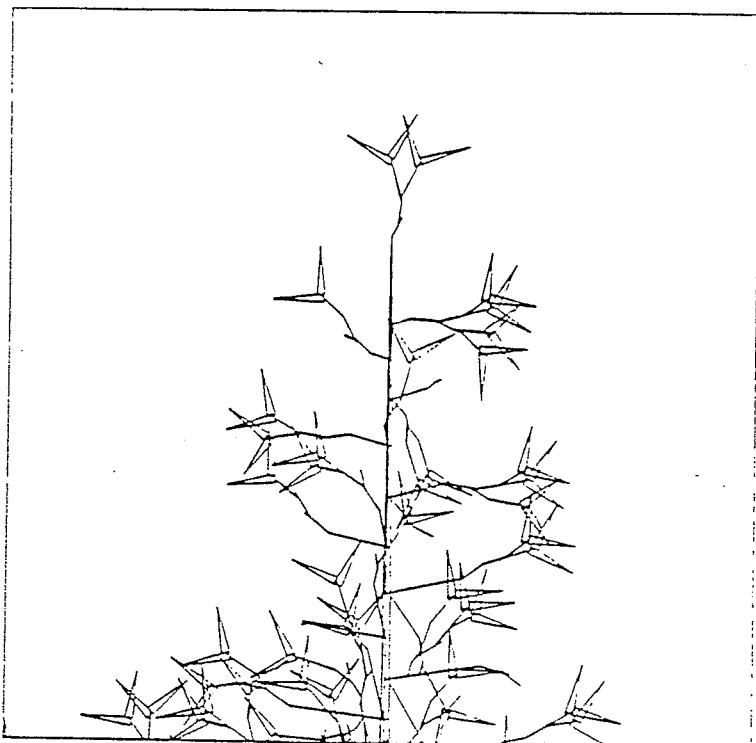
## Évolution d'un axe d'ordre 2 et de ses ramifications

vue de dessus

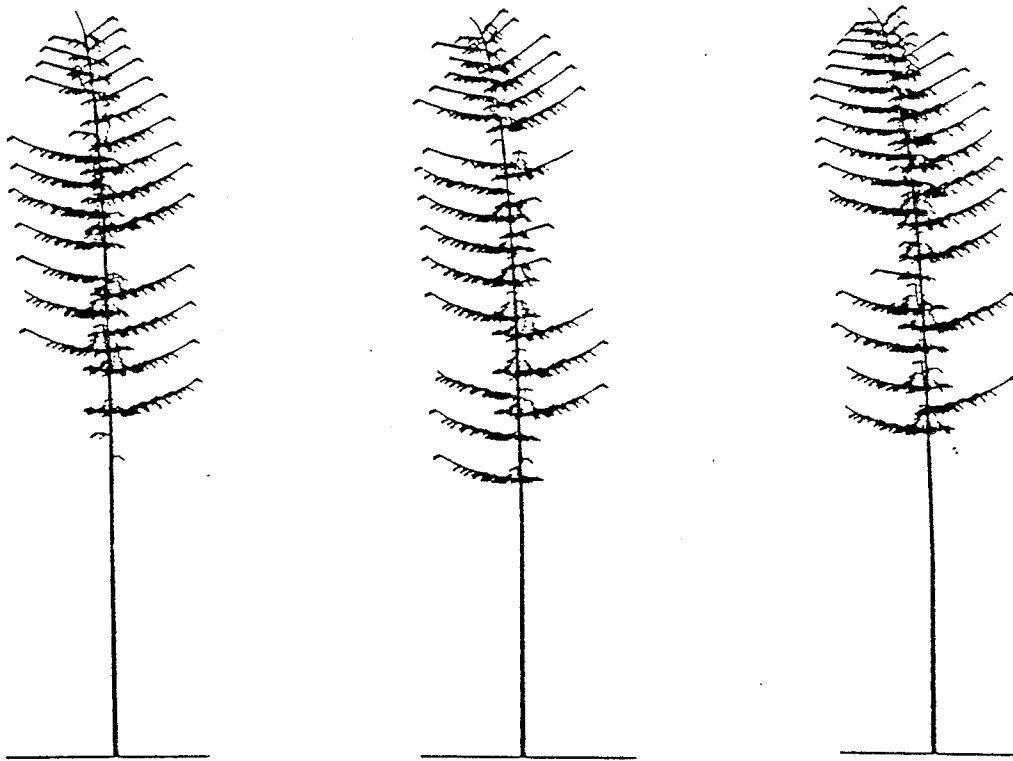
1 an



2 ans

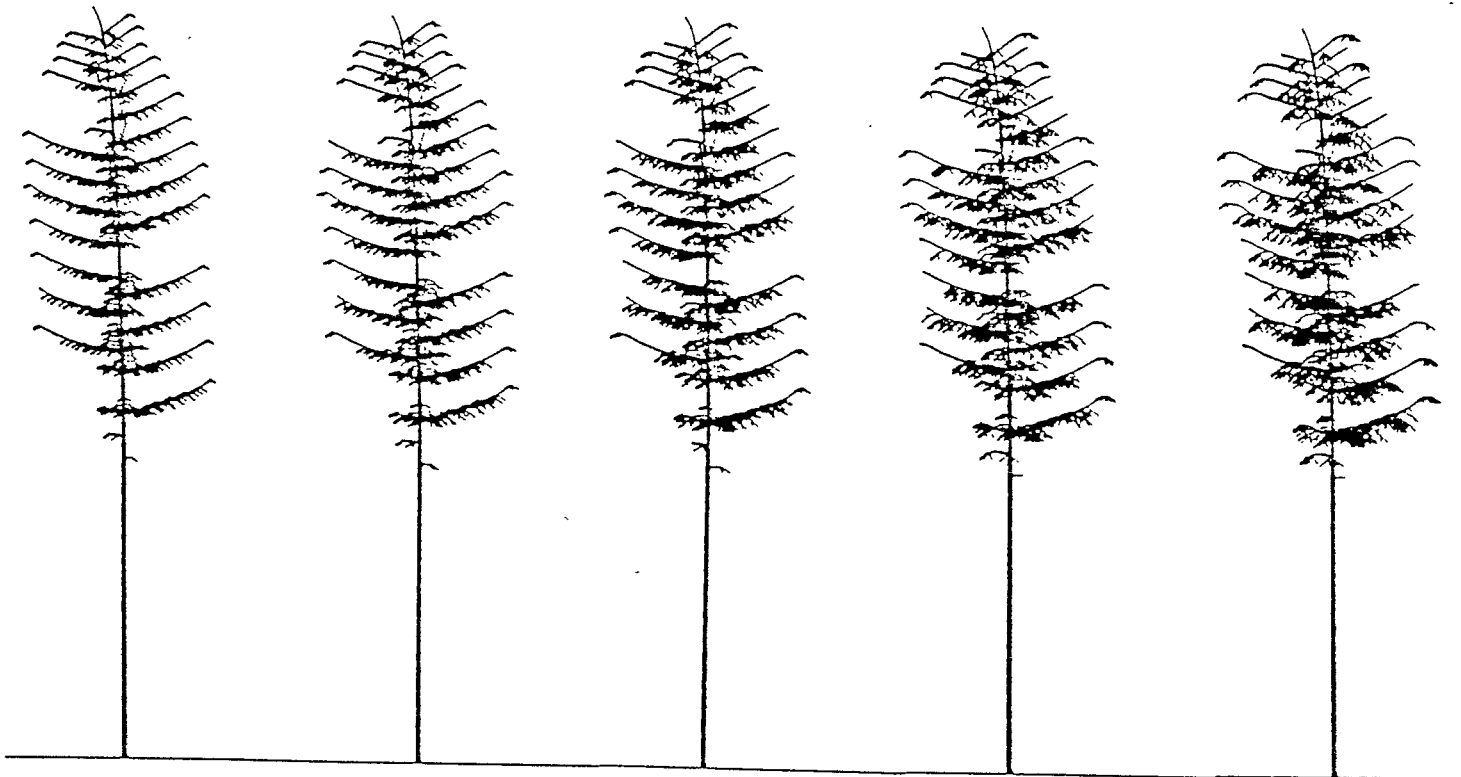


3 chaumes différents de 1 an



Les trois chaumes ont été construits suivant les mêmes lois, seule la génération des nombres aléatoires diffère. Les accidents sur les axes d'ordre 2 sont bien visibles.

vieillessement d'un chaume



1 an

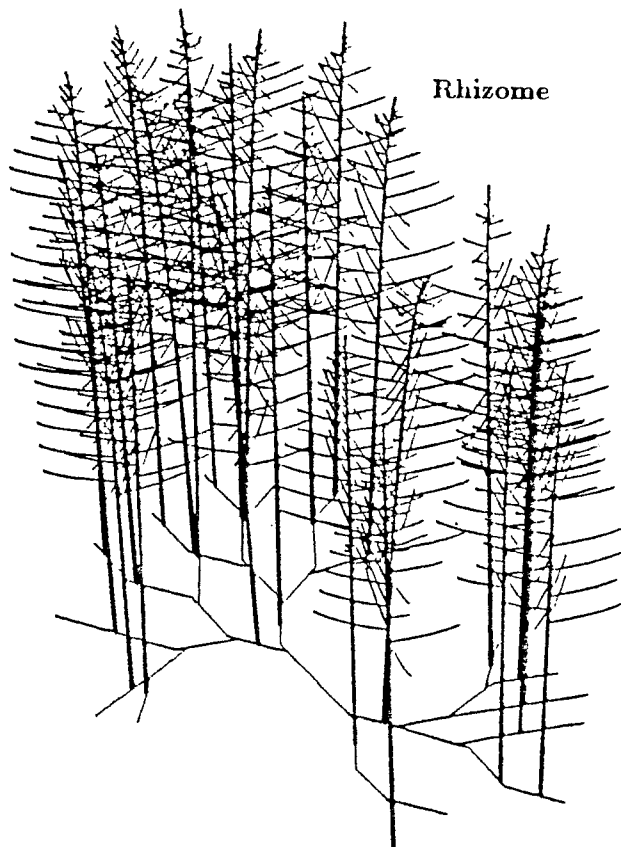
2 ans

3 ans

4 ans

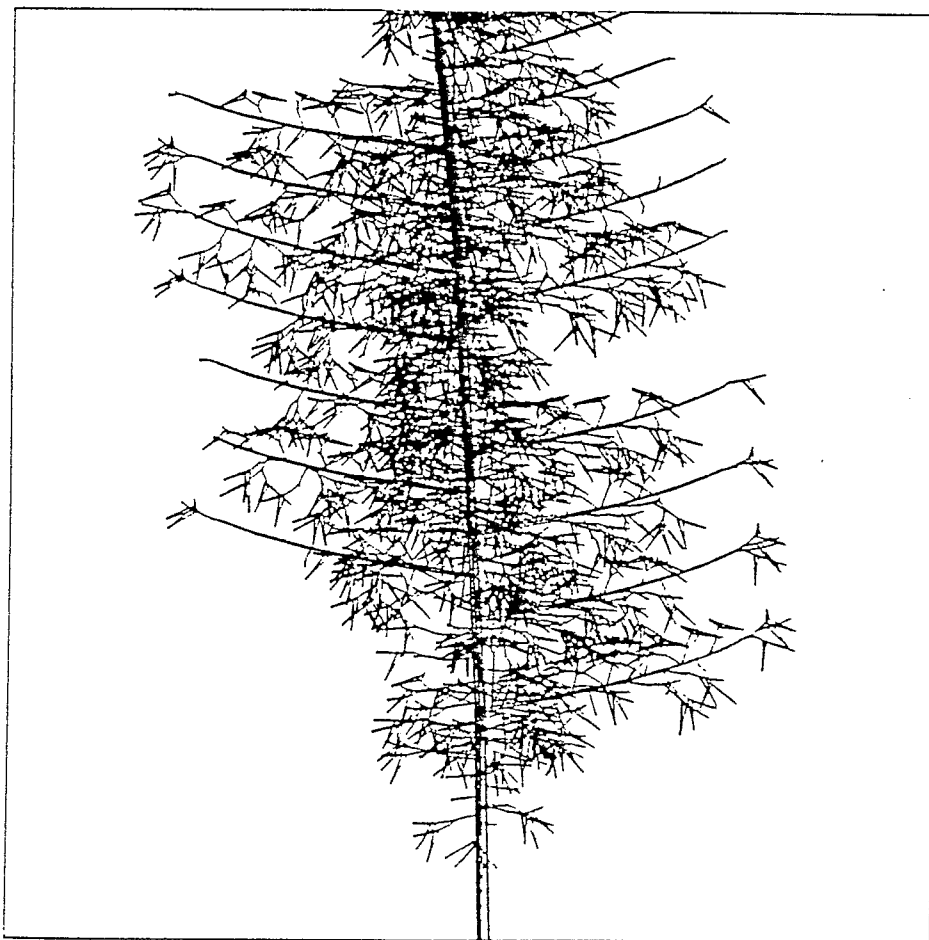
5 ans

L'augmentation du nombre de feuilles est très visible



Le rhizome, en cours d'étude[2], est encore trop mal connu, et surtout d'une manière quantitative, pour être représenté correctement. L'établissement progressif des axes traçants n'est pas pris en compte ici et les modalités d'apparition des chaumes sur le rhizome sont inconnues.

détail de la cime



## CONCLUSION

Les résultats de la simulation, tant graphiques que numériques, s'étant révélés satisfaisants, les hypothèses de départ (allongement par entre-nœuds, quantification du temps, méthode de Monte Carlo) le sont aussi. L'étude quantitative de l'architecture des chaumes a pu être traitée complètement, celles des rhizomes, du stade jeune et du stade de floraison restent à faire.

Les données analysées sont caractéristiques de la parcelle étudiée. Elles sont naturellement susceptibles de différer en d'autres lieux ou à un autre stade d'évolution.

L'originalité du bambou par rapport aux plantes étudiées jusqu'ici par cette méthode est la présence d'axes de dimension finie. C'est aussi le passage brutal d'une croissance monopodiale rapide à une croissance sympodiale lente.

Les mécanismes de l'édification du chaume et du renouvellement des feuilles se retrouvent très probablement avec des variations chez les autres bambous. En effet le problème posé est le même: comment construire un arbre sans cambium?

## BIBLIOGRAPHIE

### Botanique

#### **architecture des plantes:**

[1] Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux.

F. Hallé et R.R.A Oldeman

Masson et Cie

#### **bambous:**

[2] Données sur la croissance et l'architecture d'un bambou à rhizome leptomorphe

Phyllostachys viridis

DEA de Zulkifli DAHLAN, Isabelle VALADE 1987

université des sciences et techniques du Languedoc

[3] Mc Clure F. A. ,1966

The bamboos a fresh perspective.

Havard Univ. Press. Cambrigde

[4] Establishment growth in woody monocotyledons native to New Zealand.

P. B. Tomlinson et A. E. Esler 1973

New Zealand journal of botany 11: 627-644

### Modélisation mathématique

#### **Principes mathématiques:**

[5] Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques.

Simulation spatiale des modèles architecturaux sous l'effet de la pesanteur.

Application au Coffea robusta.

Thèse de Philippe de Reffye, université Paris-Sud

[6] Modélisation de la croissance et de l'architecture du cotonnier.

Philippe de Reffye, Michel Cognée, Marc Jaeger,

B. Traoré

colloque Moët-Hennessy 1987

[7] Travaux sur le litchi

Thèse d'Evelyne Costes à l'université des sciences et techniques du Languedoc (soutenance prévue en Juin 1988)

#### **Logiciel de simulation:**

[8] Représentation et simulation de croissance des végétaux.

Thèse de Marc Jaeger, université Louis Pasteur de Strasbourg 1987.