

# **Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu: le logiciel AMAPpara.**

F. BLAISE, Ph. de REFFYE

Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD  
B.P. 5035 34032 Montpellier CEDEX 01  
FRANCE

Tél.: (33)67.10.15.75 Fax: (33)67.10.15.99  
E-mail: blaise@amap.cirad.fr

**RESUME:** L'Unité de Modélisation des plantes du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement (CIRAD) a développé une méthodologie de mesure et d'analyse de la croissance des plantes qui rend possible, par une approche expérimentale, la description précise des lois qualitatives et quantitatives de leur fonctionnement. Le logiciel AMAPpara simule en parallèle (en utilisant des techniques empruntées à la simulation des événements discrets) le fonctionnement des bourgeons d'un ou de plusieurs arbres et génère des maquettes informatiques tridimensionnelles conformes à la réalité botanique. Les interactions telles la gêne de contact entre couronnes voisines, l'influence de la lumière ou les stress climatiques sont prises en compte dans la simulation.

**MOTS CLES:** architecture des plantes, simulation de la croissance, échéancier, cerne, interactions arbres/milieu.

## **Introduction.**

Depuis plusieurs années, des équipes de botanistes et d'informaticiens essaient de modéliser et de simuler la croissance et l'architecture des végétaux à partir des connaissances morphogénétiques acquises. Ainsi, l'école de Lindenmayer (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990) simule la croissance des plantes herbacées en utilisant la technique des L\_systèmes (grammaires informatiques). Une autre approche, qui concerne plus particulièrement les

arbres, a été développée au CIRAD. Elle s'appuie sur les connaissances qualitatives apportées par l'école de Hallé en architecture végétale (Hallé *et al.* 1978) et sur les méthodes quantitatives mises au point au CIRAD dans le cadre de l'AMAP (Reffye (de) *et al.*, 1988) (Jaeger et Reffye (de), 1992). Ces méthodes sont basées sur la description du fonctionnement des bourgeons (croissance, mort, ramification) par des processus stochastiques. Les logiciels de croissance, encore appelés moteurs de croissance, issus de ces théories permettent de construire des maquettes réalistes de végétaux dans lesquelles la topologie (agencement des entités constituant la plante) et la géométrie (disposition de ces entités dans l'espace) sont simulées d'après les paramètres du modèle, eux-mêmes estimés à partir des données expérimentales prises sur les arbres. Ces maquettes permettent tout d'abord de visualiser en 3D l'architecture des arbres, mais peuvent également servir de base pour des applications particulières. Elles permettent par exemple de simuler le rayonnement solaire pénétrant dans un couvert végétal et de calculer les transferts radiatifs (Dauzat, 1990). Toutefois, la croissance en épaisseur des axes végétatifs n'est pas simulée comme résultant de l'allocation des assimilats. Les troncs et les rameaux sont représentés empiriquement par des troncs de cône.

L'Unité de Modélisation des Plantes a développé plusieurs générations de logiciels de croissance qui diffèrent par leurs connaissances botaniques ou par leur mise en oeuvre informatique. Historiquement, la première génération a été développée en Côte d'Ivoire, dans une station du CIRAD, par Ph. de Reffye. C'est elle qui a mis en place les principes de modélisation et de simulation de l'architecture des plantes. Nous allons nous intéresser ici plus spécifiquement au logiciel AMAPpara, que l'on peut considérer comme la seconde génération, et qui est le résultat d'un travail de thèse (Blaise, 1991). Nous verrons que ce logiciel utilise des techniques informatiques qui lui permettent de simuler des phénomènes particuliers tels les interactions arbres/environnement ou encore la diffusion des assimilats dans les branches.

## **Principes de la simulation.**

### **Notions d'architecture des plantes.**

Le modèle architectural est défini comme étant la structure spatiale idéale réalisée par la plante au cours de sa croissance, dans un environnement non traumatique. La structure élémentaire utilisée pour la description d'une plante est l'axe feuillé (encore appelé tige ou branche). Les feuilles sont insérées sur la branche au niveau des noeuds. La portion de branche entre deux noeuds consécutifs est un entre-noeud. La croissance en longueur d'une branche se

décompose en une phase de fabrication des entre-noeuds dans le bourgeon, puis en une phase d'élongation. La portion de branche mise en place durant une période d'allongement est appelée unité de croissance (notée U.C.).

L'analyse architecturale a pour but la description de la forme de végétaux pris dans leur globalité (Hallé *et al.*, 1978). Les observations nécessaires à cette analyse portent sur: le mode de croissance, le mode de ramification, la différenciation morphologique des axes et la position de la sexualité. En se basant sur ces caractéristiques morphologiques primaires, Hallé a classé l'ensemble des plantes connues en moins d'une trentaine de modèles (fig.1).



Modèle d'Aubréville (*terminalia*) Modèle de Rauh (*peuplier*) Modèle de Massart (*épicéa*)

Figure 1 Exemples de modèles architecturaux.

### Données nécessaires à la simulation.

L'analyse des mesures faites sur le terrain conduit à la constitution d'un fichier de paramètres contrôlant la croissance et le développement des arbres. Ces paramètres peuvent être regroupés en catégories distinctes (Reffye (de) *et al.*, 1993):

- les paramètres morphologiques: ils définissent les caractéristiques de production inhérentes à l'arbre (nombre de feuilles par noeud, nombre de fleurs par inflorescence,...),
- les paramètres de fonctionnement du bourgeon (loi du nombre d'entre-noeud par unité de croissance, processus de ramification,...),
- les paramètres géométriques: phyllotaxie, angle de branchement, longueur des entre-noeuds...

### Simulation de la croissance en longueur.

On peut distinguer trois notions importantes dans la simulation de la croissance des arbres:

1. la topologie: elle décrit l'arrangement des entités élémentaires (entre-noeud, feuille, fleur ou fruit) qui constituent l'arbre,
2. la géométrie: elle permet de dimensionner et de positionner dans l'espace ces entités,
3. la dynamique de croissance: elle permet de séquencer dans le temps les différents événements intervenant lors de la croissance de l'arbre.

### Topologie et géométrie.

On peut distinguer trois niveaux spécifiques dans l'organisation naturelle de l'arbre: l'entre-noeud, l'unité de croissance et l'axe ou branche. La structure informatique mise en oeuvre pour rendre compte de cette organisation est une structure hiérarchique dont chaque ordre correspond à un de ces trois niveaux.

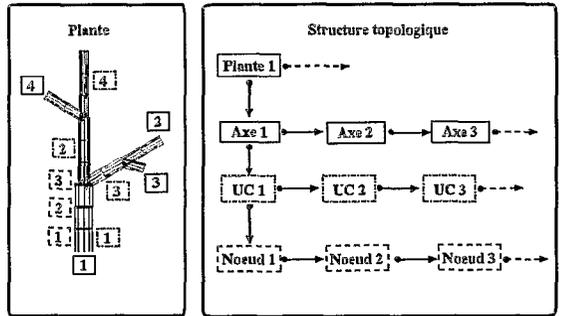


Figure 2 Structure topologique hiérarchique.

Chaque élément de plus bas niveau de cette structure définit un noeud de l'arbre. Les organes végétatifs sont également représentés par une entité spécifique. La topologie est complétée par un quatrième niveau englobant définissant l'arbre lui-même. Ce dernier niveau permet en fait de simuler la croissance non plus d'un seul arbre isolé, mais donne la possibilité de considérer un ensemble d'arbres et donc de gérer leurs éventuelles interactions. Pour chaque entité de cette structure, les liens topologiques adéquats sont créés (fig.2).

L'utilisation de la structure topologique est multiple. Tout d'abord, elle permet de stocker au niveau le plus bas de la hiérarchie la géométrie de l'arbre. Chaque nouvel entre-noeud apparu au cours de la croissance est défini géométriquement afin de pouvoir représenter l'arbre à la fin de la simulation. Ensuite, elle permet de traiter l'élagage. En effet, dès qu'un axe est mort et élagué, toutes les entités le constituant sont supprimées de la structure topologique et ne seront donc plus considérées dans la suite de la croissance. Enfin, elle peut être utilisée pour mettre en oeuvre des applications particulières: taille interactive des branches, calcul mécanique de la flexion des branches,...

## Dynamique de croissance.

La gestion dans le temps des événements qui caractérisent la croissance de l'arbre peut se faire, techniquement, de différentes manières. Ainsi, une gestion simple en informatique est la gestion en préfixée (Jaeger, 1987). Mais ce type de gestion ne permet pas d'assurer la simultanéité dans le temps du fonctionnement des bourgeons actifs. C'est pourquoi une gestion en parallèle a été choisie (fig.3).

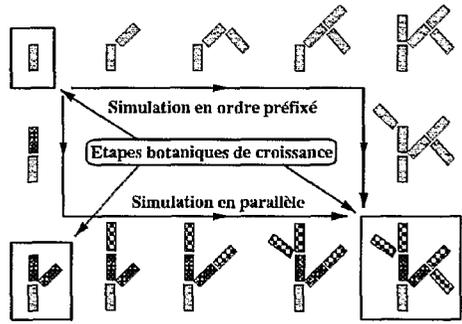


Figure 3 Simulation préfixée et parallèle.

La gestion en parallèle des bourgeons sur une machine séquentielle va se faire à l'aide des techniques de la simulation à événements discrets (Blaise, 1991). Le principe général consiste à discrétiser le temps, et à définir pour chaque date une liste d'événements à traiter. Ces événements sont de différentes

natures: croissance des bourgeons terminaux, des bourgeons axillaires ou encore mise en place d'une feuille. Remarquons que ces événements se dérouleraient en parallèle lors de la croissance naturelle d'un arbre. L'unité de temps dans cet espace de temps discrétisé correspond au délai nécessaire pour la mise en place d'une U.C. du tronc. Si l'arbre considéré se développe dans un

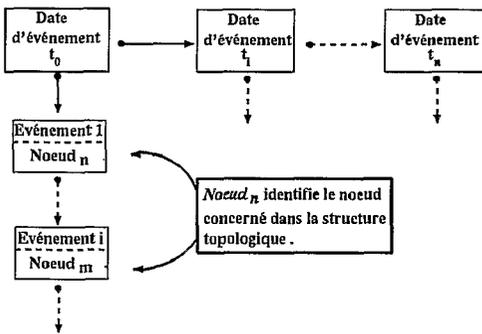


Figure 4 L'échéancier.

climat tempéré et ne met en place qu'une seule U.C. par an, le pas de temps sera donc d'une année. Il est à noter que des événements peuvent s'insérer à des dates intermédiaires si leur vitesse de fonctionnement l'exige. En effet, des axes peuvent avoir une croissance plus rapide que leur axe porteur. La gestion de ce temps discrétisé est assurée par un échéancier (fig.4).

A chaque date d'occurrence de l'échéancier, le moteur de croissance traite les événements présents. Le résultat du traitement est la création éventuelle d'une nouvelle entité (entre-noeud, feuille, fleur ou fruit) et son insertion dans la structure topologique de l'arbre. La création de cette entité est entièrement dépendante des paramètres de fonctionnement définis par les mesures. En

particulier, ces paramètres peuvent empêcher l'apparition de cette nouvelle entité. C'est le cas, par exemple, de l'apparition d'une feuille si son entre-noeud porteur est hors de la zone de mise en place des feuilles. Le cas échéant, le traitement d'un événement induit également la mise en place dans l'échéancier de nouveaux événements concernant, cette fois, la nouvelle entité créée. Les dates d'occurrence de ces événements dépendent de leur nature et des paramètres de fonctionnement de l'arbre. Une fois un événement traité, il est supprimé de la liste des événements.

Si, à chaque traitement d'un événement, la structure topologique est mise à jour, la géométrie des nouvelles entités ne sera définie que lorsque la liste totale sera traitée. Ceci s'explique par le fait que le calcul de la géométrie nécessite la définition d'une topologie cohérente pour la plante. Cette cohérence topologique n'est atteinte qu'après chaque traitement d'une date d'occurrence de l'échéancier. Dans le calcul de la géométrie, il est également tenu compte de la flexion des branches. Cette flexion est calculée en appliquant les méthodes classiques de flexion des poutres encastées. Il est à noter que le résultat est une approximation de la réalité car on ne tient pas compte de l'évolution dynamique de la plante.

Une fois que tous les événements de la liste en tête de l'échéancier ont été traités, on passe à la date d'événements suivante. La simulation s'arrête dès que toutes les dates de l'échéancier ont été traitées.

## **Simulation de la croissance en épaisseur.**

### ***Modélisation de la diffusion des assimilats.***

Dans un climat tempéré, les bourgeons terminaux mettent chaque année en place une nouvelle U.C. feuillée et le diamètre des branches augmente d'un nouveau cerne. Seules les U.C. feuillées fournissent les assimilats nécessaires à la croissance en longueur et en épaisseur de l'arbre grâce à l'activité photosynthétique. Si l'on souhaite calculer en tout point d'un arbre l'épaisseur des cernes formés, il est nécessaire, d'une part, d'avoir un modèle qui tienne compte des connaissances acquises en croissance et en architecture végétale, et, d'autre part, de disposer au sein de cette architecture de lois de production, de diffusion et de consommation des assimilats de façon à pouvoir calculer en tout point de l'arbre l'épaisseur des cernes formés. On peut alors traiter explicitement l'allocation des assimilats selon diverses lois, et établir un lien formel entre la structure interne des branches et l'architecture externe de l'arbre en croissance (Reffye (de) Ph. *et al.*, 1994).

## Simulation d'un modèle de diffusion des assimilats.

Quelle que soit la complexité de l'arbre considéré, la simulation peut accéder à tout moment aux caractéristiques exactes de son architecture, notamment grâce à la structure topologique. En particulier, l'on connaît le nombre d'U.C. feuillées susceptibles de produire des assimilats par photosynthèse. Par ailleurs, considérons que la diffusion des assimilats s'effectue selon une loi de répartition uniforme. Cela signifie que la quantité d'assimilats exportées par une U.C. feuillée chaque année est constante et qu'elle se répartit équitablement en cerne cylindriques sur chaque U.C. sous-jacente jusqu'à la base du tronc. Sous cette hypothèse, nous allons étudier quelques aspects de la structure interne du tronc d'un arbre simulé.

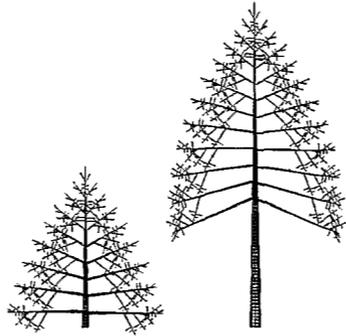


Figure 5 Deux stades de croissance.

La figure 5 nous montre l'architecture de l'arbre simulé à deux stades de sa croissance (10 ans et 20 ans). On remarquera la dominance entre axes porteurs et axes portés engendrée automatiquement par la diffusion uniforme si l'on considère leur diamètre. La visualisation des empilements de cerne peut se faire longitudinalement ou radialement. La section longitudinale est tassée volontairement pour mieux visualiser le profil (fig.6).

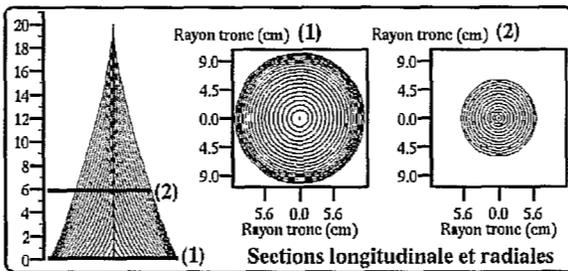


Figure 6 Visualisation des cerne.

et axes portés engendrée automatiquement par la diffusion uniforme si l'on considère leur diamètre. La visualisation des empilements de cerne peut se faire longitudinalement ou radialement. La section longitudinale est tassée volontairement pour mieux visualiser le profil (fig.6).

## Influence du climat sur les accroissements annuels.

Nous avons précédemment vu que l'utilisation d'un échancier nous permettait de discrétiser le temps et de connaître pour chaque date les événements caractérisant le fonctionnement de l'arbre. Si l'on suppose que l'on accède également aux conditions climatiques lors du fonctionnement des bourgeons concernés par ces événements, on peut alors simuler l'influence de stress sur leur activité.

Ainsi, on peut définir un fichier "stress" qui décrit tout au long de la

croissance d'un arbre l'influence des conditions climatiques sur la croissance en longueur et en épaisseur des entre-noeuds. Ce fichier est constitué, pour chaque date discrète, de deux "facteurs climatiques", compris entre 0.0 et 1.0, permettant de pondérer l'élongation de l'entre-noeud et la quantité d'assimilats produite par les feuilles ou les aiguilles en diminuant leur capacité assimilatrice. Un facteur de 1.0 définit des conditions optimales.

La figure 7 nous montre les résultats obtenus pour différents fichiers stress sur un pin de 15 ans. Le pin de gauche, qui n'a subi aucun stress, laisse apparaître des unités de croissance de longueur optimale.

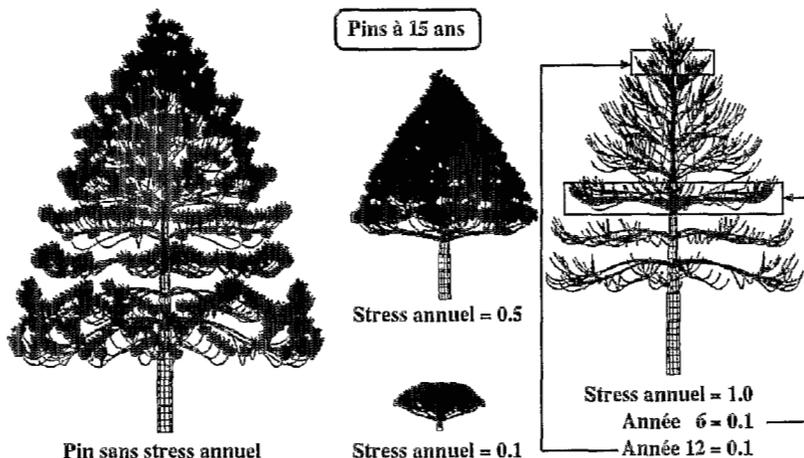


Figure 7 Influence du climat sur la croissance d'un pin.

Deux autres simulations utilisent des fichiers stress où les conditions climatiques restent homogènes tout au long de la croissance, et ce, aussi bien pour l'élongation que pour la production d'assimilats. La première, avec un facteur climatique de 0.5, modifie en particulier la longueur des U.C. du tronc de moitié. La pondération de la production d'assimilats limite la croissance en épaisseur. On remarquera que la modification des capacités assimilatrices des aiguilles est une conséquence de la diminution de leur taille. La seconde simulation utilise un facteur climatique de 0.1. Dans ce cas, le tronc se constitue d'U.C. de longueur dix fois moins grande que celle de l'arbre non stressé: on obtient un "bonsaï" naturel. Notons également la forte diminution du diamètre du tronc. Des conditions climatiques de montagne pourrait engendrer une architecture comparable. La dernière simulation résulte de conditions climatiques optimales tout au long de la croissance sauf pour la 6<sup>ème</sup> et la 12<sup>ème</sup> année où le facteur climatique est de 0.1. Lors de ces deux années, l'U.C. du tronc ne sera constituée que d'un unique entre-noeud court. Ceci explique la faible distance séparant les branches portées par le tronc entre les 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup>

années et les 12<sup>ème</sup> et 13<sup>ème</sup> années.

Examinons plus en détail le pin de 15 ans, à droite dans la figure 7, qui a subi deux années défavorables (la 6<sup>ème</sup> et la 12<sup>ème</sup>) au cours de sa croissance. Les sections longitudinale et radiale du tronc laissent apparaître une faible largeur des cernes pour les années défavorables (fig.8). Rappelons que le pin est âgé de 15 ans, et donc la 6<sup>ème</sup> année correspond aux cernes d'âge 10 et la 12<sup>ème</sup> année aux cernes d'âge 4.

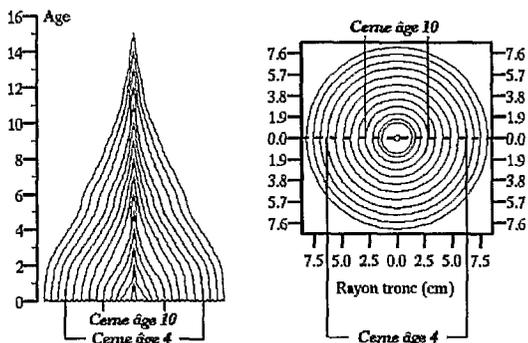


Figure 8 Sections longitudinale et radiale à la base du tronc.

## Simulation des interactions arbres/milieu.

### L'arbre et son environnement.

L'étude architecturale est toujours pratiquée sur une population d'individus dans un contexte agro-climatique donné. L'analyse statistique du fonctionnement des bourgeons permet alors de reproduire l'architecture des arbres étudiés avec toute sa variabilité. L'effet des facteurs environnementaux (sol, fertilisation, alimentation hydrique, éclaircissement...) peut être pris en compte en analysant les paramètres architecturaux sur des sites différents ou recevant des traitements différents.

Reconstituer des formations végétales ne se réduit pas cependant au positionnement dans un espace donné d'arbres simulés indépendamment les uns des autres: la compétition entre arbres voisins doit être prise en compte (Blaise, 1991 et 1992). Rappelons que le moteur de croissance AMAPpara, en utilisant le niveau plante de la structure topologique hiérarchique, permet de simuler la croissance de plusieurs arbres en même temps. Cette compétition intervient à différents niveaux. Nous n'aborderons pas ici les compétitions racinaires mais nous intéresserons à la compétition des parties aériennes. Cette compétition est surtout liée à la pénétration du rayonnement dans la canopée. Cependant, des phénomènes de gêne physique à l'intérieur de la couronne d'un arbre ou entre les couronnes d'arbres voisins peuvent conduire à un élagage des axes végétatifs.

## Discrétisation de l'espace et des arbres.

L'un des problèmes qui se présente réside dans la résolution des collisions entre entités géométriquement connues. La solution la plus directe est d'utiliser la géométrie analytique qui, à l'aide d'outils classiques, nous donnera entière satisfaction dans la plupart des cas. Cette approche n'est toutefois guère envisageable pour traiter le cas de formations végétales comportant un très grand nombre d'éléments. Aussi avons nous utilisé la technique de l'espace voxel qui a déjà été mise en oeuvre pour gérer les interactions entre un arbre et son environnement (obstacles, ombrage) lors de sa croissance (Green, 1989).

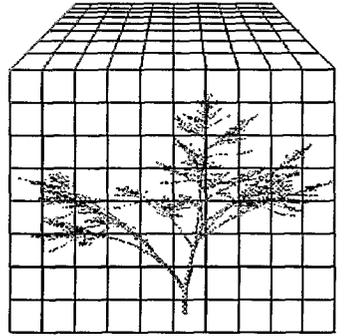


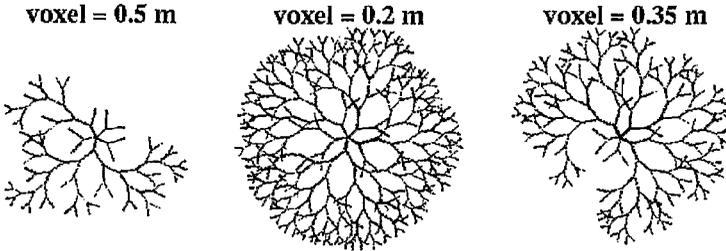
Figure 9 Espace voxel.

Un espace voxel est défini comme une région de l'espace 3D discrétisé suivant un maillage régulier en parallélogrammes ou voxels. La dimension du voxel est encore appelée pas de discrétisation. Grâce à cet espace discrétisé, il est plus facile et plus rapide de déterminer certaines relations, telles la proximité ou l'intersection, entre des objets géométriques que par l'utilisation de la géométrie analytique. En effet, les objets à traiter sont des organes considérés non plus comme des entités géométriques, mais comme des ensembles de voxels (fig.9). Un voxel est alors considéré comme occupé dès lors qu'il est traversé par un organe.

## Détection et traitement de la gêne.

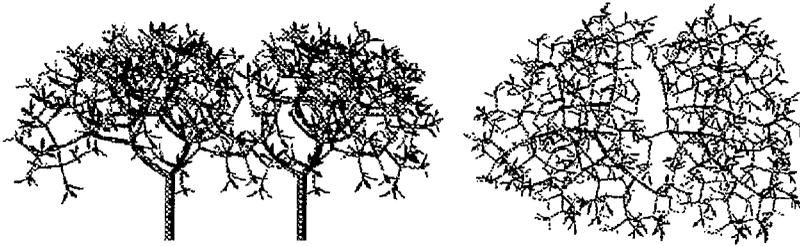
Une gêne peut intervenir chaque fois qu'un axe pénètre dans un voxel déjà occupé. Suivant les cas, différents traitements peuvent cependant être réalisés. En effet, pour des raisons mécaniques, la probabilité de collision entre deux axes est fonction de leur "éloignement topologique". Par exemple, deux axes portés par la même U.C. sont peu susceptibles, malgré leur proximité, de se gêner mutuellement. A l'inverse, deux axes géométriquement proches et appartenant à des branches maîtresses différentes, *a fortiori* à des arbres différents, ont de fortes chances de collision. Une fois l'éventuelle collision détectée, et le cas de gêne démontré, il reste encore à effectuer un traitement adéquat. On ne cherche pas à déterminer de façon exacte les intersections entre les entre-noeuds. Seules l'absence ou l'existence d'une collision nous intéresse. Elles seront synonymes de continuation ou d'inhibition de la croissance. Autrement dit, en cas de gêne, le bourgeon meurt.

La figure 10 nous montre les résultats du traitement de la gène entre branches du premier étage d'un terminalia. On remarque que la dimension du voxel discrétisant l'espace peut modifier nettement l'architecture résultante. Mais il ne faut pas pour autant considérer le principe de discrétisation de l'espace comme une méthode donnant des résultats peu stables pour ne pas dire aléatoires. En effet, on peut démontrer que les différentes architectures obtenues avec des voxels de dimension différente évoluent graduellement et convergent vers une topologie "limite" qui correspond à une valeur asymptotique du pas de discrétisation. Autrement dit, il existe une valeur minimale de ce pas en dessous de laquelle les architectures obtenues sont similaires (Blaise, 1991).



**Figure 10** Traitement de la gène de contact.

Un autre phénomène est connu sous le nom de timidité dans l'architecture des plantes. Il traduit la capacité de certaines espèces à éviter les contacts entre cimettes dans leur propre couronne ou entre leur couronne et celle d'arbres voisins. Cela se traduit par la formation d'espaces libres entre les cimettes voisines (fig.11).



**Figure 11** Simulation de deux frangipaniers timides.

## **Influence de la lumière.**

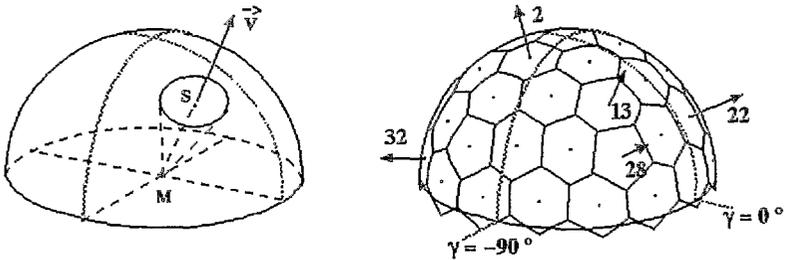
### ***L'arbre et la lumière.***

On considère que l'influence de la lumière intervient de deux manières différentes; d'une part, en modulant les processus de croissance et de

ramification des bourgeons en fonction de la quantité et de la qualité de lumière reçue localement, et d'autre part, en orientant les axes végétatifs de façon à intercepter le maximum de lumière (phototropisme). On doit donc calculer la pénétration de la lumière en fonction de sa direction. Ce problème de la direction privilégiée de la lumière nous ramène à un problème d'échantillonnage des directions à analyser.

**Modèle de pénétration de la lumière.**

La pénétration de la lumière ne peut être calculée que dans un nombre limité de directions discrètes. Ainsi, le modèle TURTLE associe à chaque direction un secteur angulaire. Pour que tous les secteurs angulaires aient un même angle solide, une discrétisation particulière de la voûte céleste est nécessaire. En l'occurrence, 46 directions sont définies dans l'hémisphère, chacune distante d'une autre adjacente d'un angle de 24° environ (Dulk (den), 1989) (fig.12).



**Figure 12** Discretisation de la voûte céleste par le modèle TURTLE.

Pour calculer le taux de lumière qui arrive dans un voxel, on doit parcourir l'ensemble des voxels traversés dans chaque direction définie (fig.13). La transparence à la lumière de chaque voxel traversé est déterminée par son contenu. Le pourcentage du rayonnement incident dans une direction donnée est le produit des taux de transmission des voxels traversés. On suppose pour simplifier une luminance du ciel identique pour les 46 secteurs.

**Recherche de la lumière.**

Chaque nouvelle portion d'axe mise en place dans l'espace voxel possède une direction originelle déterminée par l'orientation de son axe porteur. L'intensité du rayonnement reçu depuis les 46 secteurs peut induire une déviation par rapport à cette direction originelle. Le poids de chaque secteur dans ce calcul dépend de l'écart angulaire entre sa direction et la direction originelle de l'axe. La déviation résultante peut être modulée en fonction de

paramètres de sensibilité à la lumière. La figure 14 nous montre la réaction d'un arbre très sensible à l'ombre portée par un mur opaque.

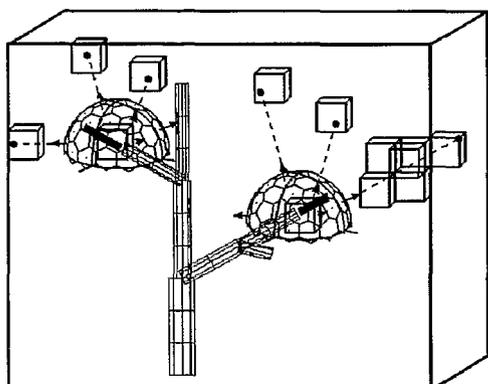


Figure 13 Calcul du taux de lumière.



Figure 14 Recherche de la lumière.

### Influence des interactions inter-couronnes sur la croissance secondaire.

La figure 15 nous présente une vue de dessus d'un bosquet de 6 épicéas en compétition et d'un épicéa isolé qui s'est développé sans problème de voisinage et qui servira de référence. On remarquera en premier lieu la forte influence des arbres voisins sur le développement de la couronne de l'arbre central, ainsi que la tendance générale des arbres périphériques à se développer vers l'extérieur afin de bénéficier d'un espace libre.

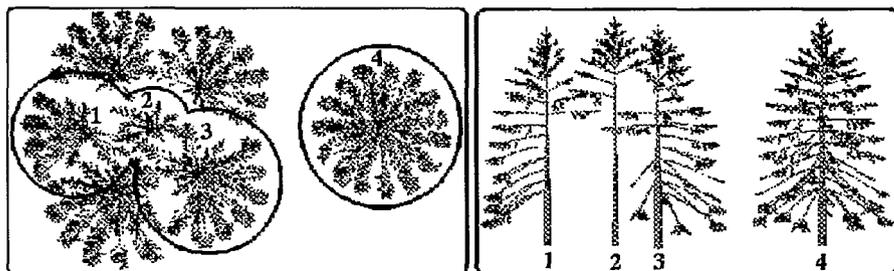
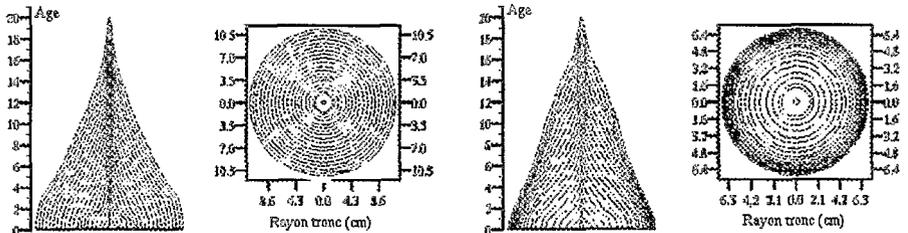


Figure 15 Limitation de la croissance secondaire par élagage des branches.

Dans la partie droite de la figure 15, on a sélectionné 4 épicéas en particulier: 3 appartenant au bosquet, dont l'arbre central, et le dernier étant l'arbre isolé. Cette image nous montre une forte différence dans la grosseur des troncs, notamment si l'on compare l'arbre isolé et l'arbre central. Ceci s'explique par l'élagage de nombreuses branches des arbres du bosquet, conséquence des

phénomènes de gêne entre couronnes. En effet, en disparaissant, ces branches, ou plutôt leurs unités de croissance feuillées, n'ont plus produit d'assimilats ce qui a entraîné une forte diminution de la largeur des cernes du tronc.

La figure 16 nous montre les sections longitudinales et radiales du tronc pour l'arbre isolé et l'arbre central du bosquet. Les cernes concentriques de l'arbre isolé sont plus réguliers que ceux de l'arbre central. Ceci s'explique par l'homogénéité relative du houppier de l'arbre isolé tout au long de sa croissance.



**Figure 16** Sections longitudinales et radiales à la base du tronc pour l'arbre témoin et l'arbre central du bosquet.

## Conclusion.

Le logiciel AMAPpara simule l'architecture d'un arbre à un âge donné en faisant fonctionner parallèlement tous ses bourgeons selon leurs lois propres de croissance, de mort et de ramification. Le résultat de la simulation est une maquette tridimensionnelle conforme à l'architecture aérienne et à la structure interne de l'arbre.

La gestion en parallèle des bourgeons et la discrétisation de l'espace permettent de simuler la croissance d'un ensemble d'arbres en tenant compte des interactions. Toute diminution de volume foliaire aura son implication sur la production d'assimilats et donc sur la quantité de bois produite. L'utilisation du modèle TURTLE, en discrétisant la lumière solaire en directions privilégiées, peut permettre d'estimer la quantité de lumière reçue par les feuilles et donc de calculer précisément leur capacité photosynthétique afin de moduler les productions d'assimilats.

D'autres applications sont envisageables. Ainsi, la quantité de bois produite par la diffusion des assimilats est répartie tout le long de l'architecture et réagit avec elle mécaniquement (Fourcaud et Lac, 1993). Il devient alors possible de faire de la mécanique de l'arbre sur pied, et d'étudier l'équilibre de l'arbre en fonction de la densité du bois et de la loi de diffusion. Par ailleurs, il est possible de simuler des plantations multi-spécifiques et non équiennes, dans le but d'optimiser sous des contraintes choisies, les stratégies d'éclaircie, en vue d'un rendement ligneux optimum (Reffye (de) *et al.*, 1994).

## Références bibliographiques

- . Blaise F., 1991. *Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et application*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, spécialité informatique, N°1071, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 186p.
- . Blaise F., 1992. Simulation de couverts végétaux réalistes en 3D. XVII<sup>ème</sup> Congrès I.S.P.R.S., Vol.XXIX, Tome B3, Washington, DC, pp.207-212.
- . Dauzat J., 1990. Simulations des transferts radiatifs sur maquettes informatiques d'*Elaeis guineensis*. *Rapport ATP n°222/IRHO Modélisation des transferts radiatifs au sein d'une palmeraie*, doc. 2, 22p.
- . Dulk (den) J.A., 1989. *The Interpretation of Remote Sensing, a feasibility study*. Master's thesis, Wageningen Agricultural University, Neederland.
- . Fourcaud Th., Lac P., 1993. Modélisation mécanique de la croissance des végétaux. Actes du Colloque National en Calcul des Structures, Giens, Var 11-14 mai, Edition Hermès, Vol.1:131-140.
- . Green N., 1989. Voxel space automata: modeling with stochastic growth processes in voxel space. *Computer Graphics*, Vol.23(3), pp.175-184.
- . Hallé F., Oldeman R.A.A., Tomlinson P.B., 1978. *Tropical Trees and Forest*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 441p.
- . Jaeger M., 1987. *Représentation et Simulation de Croissance des végétaux*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, spécialité informatique, N°328, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- . Jaeger M., Reffye (de) Ph., 1992. Basic concepts of computer simulation of plant growth. *Journal of Biosciences*, Vol.17, N°3, pp.275-291.
- . Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990. *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag, New York, 228p.
- . Reffye (de) Ph., Blaise F., Guedon Y., 1993. Modélisation et simulation de l'architecture et de la croissance des plantes. *Revue du Palais de la Découverte*, Vol.21, N°209, pp.22-48.
- . Reffye (de) Ph., Houllier F., Blaise F., Fourcaud Th., 1994. Essai sur les relations entre l'architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs. *Colloque INRA (à paraître)*.
- . Reffye (de) Ph., Edelin C., Françon J., Jaeger M., Puech C., 1988. Plant models faithful to botanical structure and development. *Computer Graphics*, Vol.22, N°4, pp.151-158.