

SIMULATION DE COUVERTS VEGETAUX REALISTES EN 3-D.

F. Blaise

Laboratoire de Modélisation du CIRAD/GERDAT
BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, FRANCE

But:

La structure des couverts végétaux est difficile à caractériser par des mesures *in situ*. Grâce à la modélisation de l'architecture des plantes, il est possible de générer des maquettes informatiques de plantes botaniquement exactes. La prise en compte des interactions entre la plante et son environnement, notamment les phénomènes de gêne et de recherche de la lumière, permet de simuler des formations végétales réalistes.

Le Laboratoire de Modélisation du CIRAD a développé une méthode d'analyse de l'architecture et de la croissance des plantes. Le logiciel AMAP simule le développement architectural des plantes.

Les maquettes informatiques 3-D générées par ce logiciel sont utilisées pour la simulation numérique des transferts radiatifs.

MOTS CLES: AMAP, architecture plantes, simulation croissance, interactions environnement, maquettes 3-D, transferts radiatifs.

Abstract:

Plant canopies structure is difficult to characterize by *in situ* measurements. Owing to the modeling of plant architecture, we can generate 3-D plant make-ups consistent with botanical laws. Furthermore realistic plant associations may be simulated when accounting for interactions between the plants and their environment.

The Laboratoire de Modélisation du CIRAD developed a methodology to analyse the growth and the architecture of plants. The AMAP software allows the simulation of the architectural development of plants.

The 3-D computed plants generated by this software are used for a numerical simulation of radiative transfers.

KEYWORDS: AMAP, plant architecture, growth simulation, environmental interactions, 3-D plant make-ups, radiative transfers.

1. INTRODUCTION

Les couverts végétaux possèdent des structures complexes difficiles à caractériser. Dans le cas le plus simple de couverts végétaux continus et homogènes, on suppose généralement que la répartition des feuilles est aléatoire. Les seuls paramètres pris en compte sont alors l'indice foliaire, éventuellement sa stratification, et la fonction de distribution des angles foliaires. Le domaine d'application de la plupart des modèles de simulation de la réflectance en milieu diffusant se limite à ces cas simples.

Dans le cas de couverts discontinus, on assimile généralement le couvert à un ensemble de formes géométriques simples: parallélogrammes pour des cultures en rangées, cônes ou ellipsoïdes pour des couronnes d'arbres... Les modèles radiatifs dits géométriques traitent les échanges uniquement au niveau de l'enveloppe de ces formes, considérées comme opaques ou translucides. Les modèles "hybrides" traitent les transferts radiatifs au niveau des éléments de surface foliaire à l'intérieur de ces formes. Ces éléments sont supposés répartis aléatoirement au sein des formes ainsi définies.

Ces différents modèles connaissent un certain nombre de limitations:

- ils ne s'appliquent qu'à des couverts continus ou de géométrie simple,
- ils ne simulent qu'imparfaitement la réflectance

bidirectionnelle,
- ils supposent les feuilles lambertiennes.

Les travaux sur la modélisation et la simulation de la croissance des plantes développés au laboratoire de modélisation du CIRAD permettent de générer des populations de plantes botaniquement conformes aux plantes étudiées. La prise en compte des interactions entre plantes donne la possibilité de simuler des formations végétales complexes. Cette représentation informatique de couverts végétaux constituent une base unique pour la simulation de transferts radiatifs.

2. MODELISATION ET SIMULATION DE LA CROISSANCE DES PLANTES

2.1 Les plantes et l'informatique

Malgré la difficulté apparente de la modélisation de tout phénomène naturel, de nombreux modèles s'appuyant sur des concepts mathématiques ou informatiques ont été mis en place afin de générer des plantes plus ou moins réalistes (Françon, 1990).

Ainsi, Fisher et Honda définissent une plante par un nombre restreint de paramètres géométriques, des angles de branchement

et des longueurs. Kawaguchi, inspiré en partie par les travaux de D'Arcy Thompson, produit des images figuratives de formes naturelles: coquillages, cornes, plantes spiralées. Gardner décrit une méthode de génération de feuillage orientée vers la synthèse d'images animées. C'est en se basant sur les théories fractales de Mandelbrot que Oppenheimer développe un modèle fractal générant des objets ramifiés: plantes, feuilles, réseaux artériels, ou encore, deltas fluviaux et flocons de neige. Dans le but de décrire la croissance d'organismes vivants, Lindenmayer a introduit la notion de systèmes de réécritures parallèles ou L-systèmes. Aono et Kunii se sont intéressés aux L-systèmes pour représenter le mode de branchement des arbres, mais ont fini par définir un modèle géométrique 3-D semblable à celui de Fisher et Honda. Il faut attendre les travaux de Smith pour voir les L-systèmes effectivement exploités pour la génération de plantes réalistes avec la notion de graftal. La notion de système de particules proposée par Reeves définit le volume occupé par les branches et les feuilles de la plante. En s'intéressant plus particulièrement à un arbre, l'érable, Bloomenthal décrit un modèle basé principalement sur la géométrie. Prusinkiewicz continue de développer à la suite des travaux de Smith l'interprétation graphique des L-systèmes pour générer des plantes. Pour générer la topologie de la plante (agencement des organes qui la composent), Françon, Viennot et leurs élèves utilisent la combinatoire. Tous les modèles évoqués ont le mérite de proposer des plantes "figuratives" mais sans réalité botanique.

Un autre modèle, issu des travaux initialement menés par l'agronome Philippe de Reffye sur la simulation de la croissance du caféier Robusta, diffère principalement des modèles précédemment présentés par l'objectif fixé. En effet, il ne s'agit plus seulement ici de représenter une plante, mais de simuler sa croissance afin d'obtenir des résultats agronomiquement exploitables: la base du modèle est résolument botanique (Reffye (de) et al., 1988). Les concepts botaniques utilisés pour la description de la plante sont basés sur les notions de l'architecture des plantes.

2.2 L'architecture des plantes

L'étude approfondie de la structure d'un arbre a permis à Halle et Oldeman (Hallé & Oldeman, 1970) de dégager la notion de *modèle architectural*. 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.

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,
- 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.

Comme dans tous les systèmes ramifiés, les axes sont hiérarchisés suivant leur ordre de ramification. Le regroupement des différents axes d'un arbre s'effectue également en fonction de leurs caractères morphologiques. Cette description par catégorie d'axes sert à définir l'**unité architecturale** d'un arbre.

D'autres phénomènes interviennent également dans la structure

architecturale d'une plante. C'est le cas du processus de réitération qui aboutit à la duplication à l'intérieur d'une plante de sa propre unité architecturale. Nous citerons également le phénomène de timidité qui se traduit par l'existence de zones vides entre certaines "cimettes" d'un même arbre, ou encore entre couronne d'arbres voisins.

2.3 Modélisation du fonctionnement des méristèmes

Après son application au caféier, la méthodologie d'analyse des plantes définie par de Reffye fut développée et appliquée à de nombreuses autres plantes (Reffye (de) et al., 1990). La méthode de modélisation et de simulation de l'architecture des plantes fait largement appel aux procédés de la recherche opérationnelle, et plus particulièrement à l'analyse des processus stochastiques.

L'idée fondamentale est de considérer la plante comme le résultat de l'activité des méristèmes. Ce n'est donc pas directement l'architecture qui est modélisée, mais le fonctionnement des méristèmes qui construisent cette architecture.

Pour ce faire, de Reffye distingue trois états possibles pour un méristème:

- l'inhibition,
- le fonctionnement,
- l'arrêt total de fonctionnement, ou mort.

Chacun de ces états, comme la plupart des événements biologiques, a un caractère aléatoire évident, et voit sa probabilité de réalisation évoluer au cours de la croissance de la plante: chaque individu observé est unique, tout en restant conforme au modèle architectural de l'espèce.

La détermination des lois de probabilité des différents méristèmes nécessite, afin d'évaluer la variabilité individuelle, la collecte de nombreuses données sur le terrain: longueur des entre-nœuds, nombre de ramifications sur un nœud donné, nombre d'UC par axe et nombre d'entre-nœuds par UC (UC: l'Unité de Croissance correspond dans la plupart des cas à la croissance annuelle d'un axe végétatif)... Les distributions observées sont ensuite analysées au moyen de lois stochastiques simples ou composées. Ceci est réalisé pour chaque type d'axe identifié dans la plante.

On considère qu'un méristème est soumis à une série de tests d'accroissement dont le succès dépend de la loi de probabilité propre à ce méristème. La fréquence de ces tests est définie par le temps que nécessite l'élaboration d'un nouvel entre-nœud (plastochrone). Le devenir des méristèmes est alors déterminé à chaque nouvelle unité de temps. Il est conditionné par deux probabilités:

- la probabilité de mourir,
- la probabilité d'inhibition, c'est à dire de suspendre son fonctionnement pendant un certain temps.

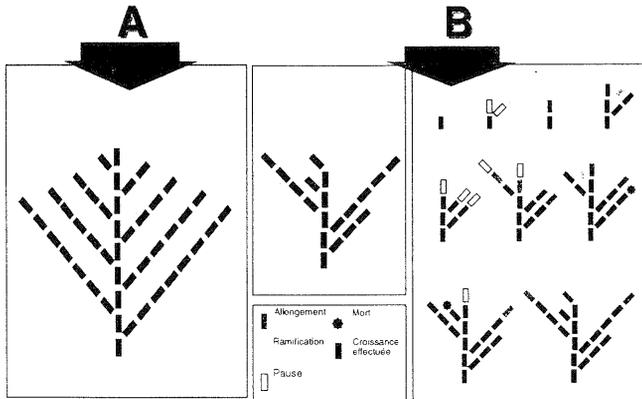
Dans le cas d'un bourgeon axillaire, la probabilité de "non-mort" représente en fait une probabilité de ramification, c'est à dire de développement d'un méristème axillaire.

La description des états possibles d'un méristème définit les trois phénomènes qui caractérisent son fonctionnement (Fig.1):

- la croissance: un axe croît en longueur quand son méristème apical crée et développe des unités de croissance.
- la ramification: des axes latéraux se développent.

- la mortalité: des axes meurent et peuvent éventuellement tomber.

- PROCESSUS DE CROISSANCE : détermine si le méristème s'allonge ou réalise une pause
- PROCESSUS DE RAMIFICATION : détermine si de nouveaux axes apparaissent ou non.
- PROCESSUS DE MORT : détermine si le méristème meurt ou non.



Le graphique A représente l'arbre total réalisable si tous les cycles d'horloge donnent naissance à un entre-noeud.

Le graphique B représente, suivant une série d'étapes successives, la réalisation des différents tests de croissance des méristèmes terminal et axillaire. Dans cet exemple, on considère que chaque top d'horloge est annuel (l'U.C. est restreinte à un unique entre-noeud). Nous remarquons à 1 an une première élongation, puis deux pauses à 2 ans, ensuite deux élongations dont une ramifie à 3 ans (puisqu'il s'agit d'un nouvel axe)... Nous terminons la croissance de cet arbre à 9 ans.

Ainsi peuvent être modélisés croissance, ramification et mortalité.

Figure 1 Fonctionnement du modèle mathématique de croissance.

2.4 Le logiciel AMAP

La simulation procédurale des plantes repose sur la modélisation des processus de croissance, ramification et mortalité. On cherche à construire la plante en considérant des concepts très détaillés plutôt que les notions de haut niveau définies par la botanique architecturale: complexe réitéré, axe, unité de croissance (Jaeger, 1985).

Considérer une plante par le détail conduit tout naturellement à s'intéresser aux entre-nœuds, entités fondamentales à la base de la construction végétale. L'organisation architecturale de la plante intègre ensuite les notions d'UC, d'axes et de complexes réitérés.

Le logiciel de simulation de la croissance des plantes sur la base de leur modélisation architecturale porte le nom d'**AMAP** (*Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes*). L'analyse des mesures faites sur le terrain conduit à la constitution d'un fichier de paramètres contrôlant la croissance et le développement des plantes. Le programme de simulation proprement dit, encore appelé **moteur de croissance** utilise ces informations pour générer stochastiquement des maquettes tridimensionnelles de plantes à un âge donné. Ces plantes peuvent être agencées en formations végétales diverses dans un espace possédant une topographie déterminée.

3. SIMULATION DE COUVERTS VEGETAUX

3.1 La plante 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 méristèmes permet alors de reproduire l'architecture des plantes étudiées avec toute sa variabilité. L'effet des facteurs environnementaux (sol, fertilisation, alimentation hydrique, éclairage ...) 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 de plantes simulées indépendamment les unes des autres: la compétition entre plantes voisines doit être prise en compte (Blaise, 1991). 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. La pénétration du rayonnement dans la bande spectrale 400-700 nm est primordiale car elle conditionne la photosynthèse. Mais d'autres bandes spectrales influant sur la morphogénèse (en particulier dans les longueurs d'onde 660 et 730 nm) interviennent également.

Outre l'action de la lumière, 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.

3.2 Discretisation de l'espace et des plantes

L'un des problèmes qui se présentent à nous 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 cependant utilisable que pour des scènes composées d'un nombre limité de volumes et de surfaces de géométrie simple. Elle n'est en revanche pas 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 œuvre pour gérer les interactions entre une plante et son environnement (obstacles, ombrage) lors de sa croissance (Green, 1989).

Un espace voxel est défini comme une région de l'espace 3-D discrétisé suivant un maillage régulier en parallélogrammes ou **voxels**. 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 végétaux considérés non plus comme des entités géométriques, mais comme des ensembles de voxels. Un voxel est alors considéré comme occupé dès lors qu'il est traversé par un organe.

3.3 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 UC 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 plantes différentes, 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-nœuds. Seules l'absence ou l'existence d'une collision nous intéressent. Elles seront synonymes d'inhibition ou de continuation de la croissance. Autrement dit, en cas de gêne, le bourgeon meurt (Fig.2).

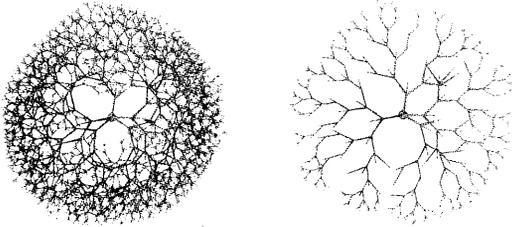


Figure 2 Simulation de la gêne.

3.4 Influence de la lumière

La plante et la lumière On considère que l'influence de la lumière intervient de deux manières différentes:

- en modulant les processus de croissance et de ramification des méristèmes en fonction de la quantité et de la qualité de lumière reçue localement,
- 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. A chaque direction est associé 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.3).

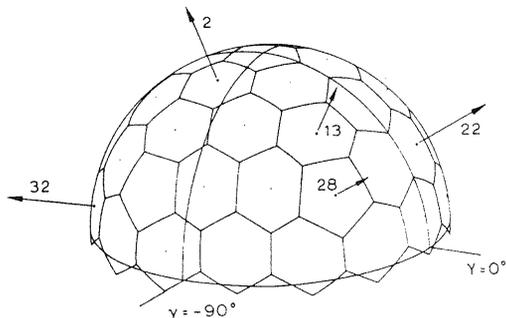


Figure 3 Discrétisation de l'hémisphère (d'après Van den Dulk)

Pour calculer le taux de lumière qui arrive dans un voxel, on doit parcourir l'ensemble des voxels traversés dans chaque direction définie. 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 4 nous montre la réaction d'une plante très sensible à l'ombre portée par un mur opaque.

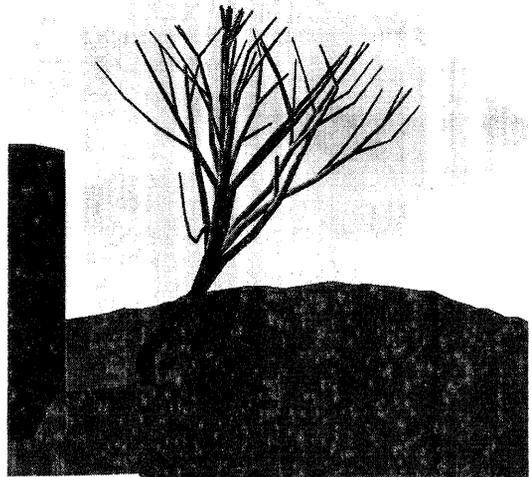


Figure 4 Recherche de la lumière.

La timidité De nombreuses théories ont été avancées pour expliquer le phénomène de la timidité (Gautier, 1986), mais aucune n'a encore été clairement confortée. Toutefois, on peut simuler des effets proches en combinant la gêne et l'influence de la lumière sur le développement de la plante. Cette influence de la lumière inclut la modulation de la croissance et de la ramification par la quantité de lumière reçue localement. La figure 5 nous montre une vue plongeante d'un bosquet d'Épicéas sensibles à la timidité.

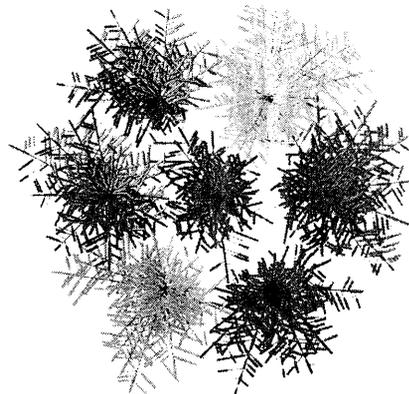


Figure 5 Bosquet d'Épicéas timides.

La figure 6 nous montre un Epicéa qui se serait développé en terrain dégagé (à gauche), et l'Epicéa placé au centre du bosquet de la figure 5 (à droite). On remarquera que l'élagage s'effectue essentiellement sur les branches les plus basses dans le cas de l'Epicéa timide. Ceci s'explique par la mort de ces branches suite à leur collision avec les arbres voisins.



Figure 6 Epicéa dans un milieu libre et Epicéa timide du bosquet.

4. UTILISATION DE MAQUETTES AMAP DANS LE CALCUL DES TRANSFERTS RADIATIFS

Les maquettes informatiques générées permettent d'obtenir une représentation tridimensionnelle détaillée de couverts végétaux. Ces maquettes se prêtent donc particulièrement bien à des simulations numériques de transferts radiatifs (Dauzat & Hauteceur, 1991).

La méthode du lancé de rayons simule de façon très précise les transferts radiatifs à interface plante-atmosphère. Elle permet une prise en compte de l'anisotropie des feuilles. Cette méthode est particulièrement adaptée au calcul et à l'analyse de la réflectance directionnelle de couverts végétaux. La figure 7 nous montre le résultat de simulations effectuées sur un couvert de mil.

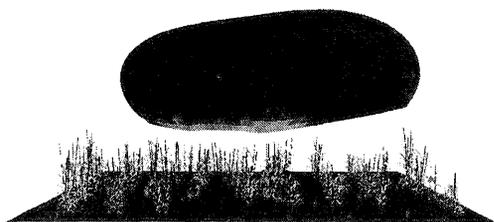


Figure 7 Réflectance directionnelle (du nadir à 80°) pour $\lambda = 640 \text{ nm}$ d'une parcelle de mil d'indice foliaire 0,56. Elévation du soleil (à gauche) = 30°.

Le calcul de l'interception du rayonnement au sein d'un couvert peut également être obtenu par la méthode du lancé de rayons. Cette méthode étant très consommatrice en temps de calcul, on peut utiliser pour cette application un modèle de type probabiliste. La figure 8 représente le profil de rayonnement photosynthétiquement utilisable simulé sur maquettes de tournesols.

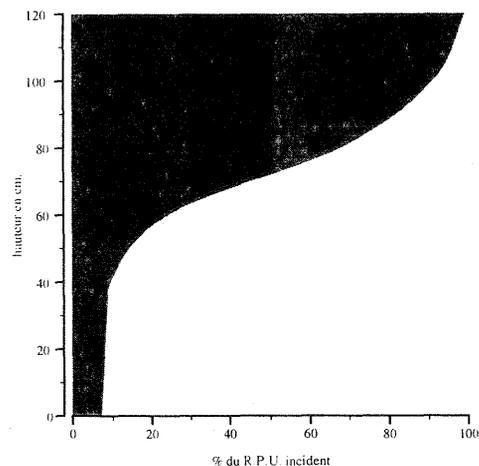


Figure 8 Profil du rayonnement photosynthétiquement utile au sein d'une parcelle de tournesols.

5. CONCLUSION

La modélisation de l'activité des méristèmes dans un contexte botanique rigoureux permet la compréhension du fonctionnement de formations végétales complexes. Ceci ouvre la voie à diverses applications agronomiques.

Sur la base de cette modélisation, le logiciel AMAP simule le développement de couverts végétaux en tenant compte des interactions intra et inter-plantes.

Les maquettes informatiques obtenues par ces simulations donnent une description tridimensionnelle de formations végétales pratiquement inaccessible par des mesures *in situ*. Une telle information tridimensionnelle est utilisable pour simuler précisément et analyser les phénomènes radiatifs. C'est un moyen d'évaluation des modèles radiatifs existants, mais aussi une base pour le développement de nouveaux modèles.

6. REFERENCES

- Blaise, F., 1991. Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et application. Nouvelle thèse n° 1071, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- Dauzat, J. & Hauteceur, O., 1991. Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux. Proceedings of the 5th International Colloquium, pp. 415-418. Courchevel, France.
- Dulk (den), J.A., 1989. The interpretation of remote sensing, a

feasibility study. Master's thesis, Wageningen Agricultural University.

Françon, J., 1990. Sur la modélisation informatique de l'architecture et du développement des végétaux. 2^{me} Colloque International "L'Arbre", Institut de Botanique, Montpellier, France.

Gautier, C., 1986. Essai sur la timidité des cimes. Rapport de D.E.A., Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France.

Green, N., 1989. Voxel space automata: modeling with stochastic growth processes in voxel space. *Computer Graphics*. 23(3) : 175-184.

Hallé, F. & Oldeman, R.A.A., 1970. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson and Cie.

Hallé, F. et al., 1978. Tropical trees and forests: an architectural analysis. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York.

Jaeger, M., 1987. Représentation et simulation des végétaux. Nouvelle thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

Reffye (de), P. et al., 1988. Plant models faithful to botanical structure and development. *Computer Graphics*. 22(4) : 151-158.

Reffye (de), P. et al., 1990. Basic concepts of computer plants growth simulation. *Nicograph*.