UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR
DE STRASBOURG
Département d'informatique

n° d'ordre: 328

I.S.T. BIBLIOTHEQUE

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du

Titre de DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR

Spécialité: INFORMATIQUE

par Marc JAEGER

REPRÉSENTATION ET SIMULATION DE CROISSANCE DES VÉGÉTAUX

Soutenue le 16 Décembre 1987 devant la Commission d'Examen:

MM. DUFOURD J.F.
FOURNIER A.
FRANÇON J.
PUECH C.
DE REFFYE P.

179

Je tiens à remercier:

- Jean-François DUFOURD,
- Alain FOURNIER,
- Jean FRANCON,
- Claude PUECH,
- Philippe de REFFYE,

pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de le juger.

Je remercie également Claude EDELIN pour la gentillesse et la patience qu'il a su montrer pour me familiariser avec la science botanique.

Je tiens de plus à rappeler toute l'amitié et la reconnaissance que je porte à Ph. de REFFYE, qui, tout au long de mon séjour à Montpellier, s'est montré d'une disponibilité permanente tant dans le contexte scientifique que dans la vie quotidienne.

Je remercie vivement Jean FRANCON, qui par ses multiples avis et conseils m'a permis de bien orienter ce travail. Que l'estime que je lui porte soit à la hauteur de son dévouement.

Je remercie Joel SOR et Gilles FOURNIÉ ainsi que les membres du service Informatique du CIRAD, pour leurs conseils avisés et leur disponibilité.

Je salue les membres de l'AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes), qui, tant à Montpellier qu'à Strasbourg, par leurs aides et leur sympathie, m'ont permis de mener à bien ce travail.

Merci à tous mes proches, parents et amis, qui par leur patience et soutien, ont enduré mon éloignement.

SOMMAIRE

(Chapitre I)

2. Modélisation mathématique . . . . . p. 31

2.1. Historique . . . . . p. 32

2.2. Topologie des végétaux . . . . . p. 33

2.2.1. Les 3 principes fondamentaux . . . . . p. 34

2.2.1.1. La croissance . . . . . p. 35

2.2.1.2. La mortalité . . . . . p. 37

2.2.1.3. La ramification . . . . . p. 39

2.2.2. Exemple de généralisation . . . . . p. 40

2.2.3. Relations entre les principes: exemples p. 42

2.2.3.1. Dimension d'un axe . . . . . p. 42

2.2.3.2. La croissance sympodiale . . . . p. 44

2.2.4. Expression des principes topologiques . p. 45

2.2.4.1. Rapport de rythme . . . . . p. 45

2.2.4.2. Expression math. des principes . p. 46

2.3. Géométrie: Importance des gradients physiques p. 47

2.3.1. Effets dus à la pesanteur . . . . . p. 48

2.3.1.1. Flèche et résistance des matériaux p. 48

2.3.1.2. Disposition des axes . . . . . p. 50

2.3.1.3. Extension à d'autres gradients . p. 53

2.3.2. Longueurs et épaisseurs des axes . . . p. 54

2.3.3. Corrélations entre géométrie et topologie p.55

3. Conclusion . . . . . p. 56

CHAPITRE II

Simulation de l'architecture des végétaux . . . . . p. 58

1. Méthode de simulation . . . . . p. 59

1.1. Traduction de la modélisation . . . . . p. 59

1.2. La structure arborescente . . . . . p. 60

1.2.1. Impossibilité d'une réelle simulation . p. 60

1.3. Extension à plusieurs architectures . . . . p. 62

2. Topologie: le moteur de croissance . . . . . p. 66

2.1. Généralités . . . . . p. 66

2.1.1. Définition . . . . . p. 66

2.1.2. Expression générale du moteur de croissance 67

2.1.2.1. Le moteur proprement dit . . . . p. 67

2.1.2.2. Expression des lois . . . . . p. 69

2.1.3. Caractère universel du moteur de croissance 70

2.2. Application aux végétaux . . . . . p. 70

2.2.1. Expression du moteur proprement dit . . p. 70

2.2.2. Expression des lois botaniques . . . . p. 74

2.2.2.1. Caractères des unités de croissance p. 74

2.2.2.2. Viabilité . . . . . p. 75

2.2.2.3. Croissance . . . . . p. 76

2.2.2.4. Ramifications . . . . . p. 76

2.2.3. Exemple . . . . . p. 77

(Chapitre II)

3. Géométrie: Caractères physiques . . . . . p. 78

3.1. Liens avec la topologie . . . . . p. 78

3.2. Aspects géométriques typiques . . . . . p. 79

3.2.1. Géométrie en début d'axe . . . . . p. 79

3.2.2. Géométrie pour chaque noeud . . . . . p. 81

3.2.2.1. Direction de croissance . . . . p. 81

3.2.2.2. Facteurs d'échelle . . . . . p. 81

3.2.2.3. Autres paramètres . . . . . p. 82

3.2.2.4. Écriture des résultats . . . . . p. 82

4. Techniques informatiques . . . . . p. 84

4.1. Conditions techniques . . . . . p. 84

4.2. Structures de données . . . . . p. 85

4.2.1. Description d'un végétal . . . . . p. 85

4.2.2. Autres . . . . . p. 87

4.3. Générateurs aléatoires . . . . . p. 88

4.4.1. Animation . . . . . p. 88

4.4.2. Variabilité inter-espèce . . . . . p. 90

4.4. Schéma général du logiciel . . . . . p. 91

4.4.1. Topologie . . . . . p. 92

4.4.2. Géométrie . . . . . p. 93

CHAPITRE III

Représentation graphique . . . . . p. 94

1. Structures de données . . . . . p. 96

1.1. La notion de ligne élastique . . . . . p. 96

1.1.1. Définition . . . . . p. 96

1.1.2. Opérateurs élémentaires . . . . . p. 98

1.1.2.1. Opérateur sélection . . . . . p. 98

1.1.2.2. Opérateur simplification . . . . p. 98

1.1.2.3. Opérateur de visualisation . . . p. 99

1.1.2.4. Autres opérateurs . . . . . p. 100

1.1.3. Intéret . . . . . p. 101

1.2. Formes . . . . . p. 102

1.2.1. Définition . . . . . p. 102

1.2.2. Caractérisation . . . . . p. 102

1.2.3. Construction . . . . . p. 103

1.2.3.1. Contraintes d'élaboration . . . . p. 103

1.2.3.2. Outils de conception . . . . . p. 104

1.3. Scènes . . . . . p. 106

1.3.1. Définition et description . . . . . p. 106

1.3.2. Construction . . . . . p. 107

1.3.2.1. Scène minimale: un seul végétal . p. 107

1.3.2.2. Un mini-éditeur de paysages . . p. 108

1.4. Paramètres de visualisation . . . . . p. 109

ıapitre III, 1. Structures de données)

1.5. Images . . . . . p. 111

1.5.1. Codage d'une image . . . . . p. 111

1.5.1.1. Résolution et définition . . . . p. 111

1.5.1.2. Codage des points de l'image . . p. 111

1.5.2. Opérateurs . . . . . p. 112

1.5.2.1. Opérateur somme . . . . . p. 112

1.6. Structure de travail . . . . . p. 113

2. Techniques informatiques et graphiques . . . . . p. 114

2.1. Chaîne de visualisation . . . . . p. 114

2.1.1. Principe . . . . . p. 114

2.1.2. Expression générale . . . . . p. 114

2.2. Aspects originaux . . . . . p. 116

2.2.1. Critères de sélection . . . . . p. 116

2.2.2. Discrétisation des faces . . . . . p. 118

2.2.1.2. Remplissage de polygône . . . . p. 119

2.2.1.3. Modèle d'illumination . . . . . p. 120

2.3. Visualisation . . . . . p. 121

2.4. Conditions techniques . . . . . p. 124

CHAPITRE IV

Résultats, perspectives et conclusions . . . . . p. 125

1. Résultats . . . . . p. 126

1.1. En botanique et agronomie . . . . . p. 126

1.1.1. Reconnaissance de clones . . . . . p. 126

1.1.2. Animation et simulation . . . . . p. 127

1.1.3. Applications agronomiques . . . . . p. 132

1.1.4. Résultats dérivés . . . . . p. 132

1.2. En image de synthèse . . . . . p. 133

2. Perspectives . . . . . p. 138

2.1. Travaux en cours . . . . . p. 138

2.2. Applications possibles . . . . . p. 138

ANNEXES

1. Exemple: Le Caféier Robusta . . . . . p. 141

1.1. Paramètres commentés . . . . . p. 141

1.2. Exemples . . . . . p. 143

2. Quelques illustrations . . . . . p. 145

Avant - Propos

Le présent travail a été réalisé au Laboratoire de Biomodélisation du Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement (CIRAD) à Montpellier. Il s'inscrit dans le cadre des travaux de l'Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes (AMAP) qui regroupe des équipes de recherche des:

- département d'Informatique graphique de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg,
- laboratoire de biomodélisation du CIRAD à Montpellier,
- laboratoire de botanique tropicale de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc à Montpellier,
- laboratoire d'Informatique de l'École Normale Supérieure de Paris.

INTRODUCTION

" La Nature, cet immense clavier..."

Victor Hugo

Comment pourrait-on en effet mieux décrire les végétaux que ne le fait le poète?

Tant de variétés s'expriment dans la flore, variétés de formes mais aussi de complexités, d'échelles et de couleurs. Cette richesse quasi-infinie nous émerveille par sa diversité et ses beautés parfois mystérieuses. Mystérieuses car mystère il y a, celui d'une forme spécifique de vie, de développement et de mort. Dès lors, même au vu de cette diversité, il est tentant de penser que ces variétés reflètent une riche combinatoire organisée par des principes élémentaires. Des travaux de synthèse, comme ceux de **Thompson** et **Stevens** (**THO61**, **STE74**) vont dans ce sens mais ne permettent pas d'aboutir à des résultats concrets satisfaisants.

Arriverons nous un jour à définir et à comprendre ce clavier dont parle Hugo? Arriverons nous à le simuler et à apprendre à en jouer?

Tel est le défi que lance la représentation des végétaux et plus généralement des phénomènes naturels par des moyens numériques et graphiques.

Au vu de la diversité de la flore, on ne peut appréhender, même dans le domaine de haute technicité que représente aujourd'hui l'image de synthèse, la physionomie des végétaux, ou plutôt leur architecture, par une simple équation mathématique. Car, si tel était le cas, celle-ci serait d'une telle généralité qu'elle serait en pratique d'une lourdeur insurmontable pour la représentation graphique d'une plante particulière.

On a vu dès lors, l'apparition de modèles généraux inspirés de concepts purement mathématiques ou informatiques.

En effet, on a, et c'est une démarche courante, cherché à simuler la physionomie des végétaux par des modèles générateurs de systèmes ramifiés manipulant des notions bien connues telles que les fractales, les arbres binaires, les grammaires, les arbres combinatoires... D'autres modèles, d'utilisation plus spécifiques, exploitant le volume général et l'aspect visuel du feuillage des arbres, usent de textures (**GAR84**).
Nous ne détaillerons pas ici ces modèles, on trouvera un répertoire et les grands principes de ces approches dans les travaux de **A. Fournier** (**FOU87**) et de **G. Eyrolles** (**EYR86**).

Malgré des images d'esthétiques remarquables, produites notamment par **P. Oppenheimer** (**OPP86**), **Alvy Ray Smith** (**SMI84**)..., ces approches possèdent des faiblesses.

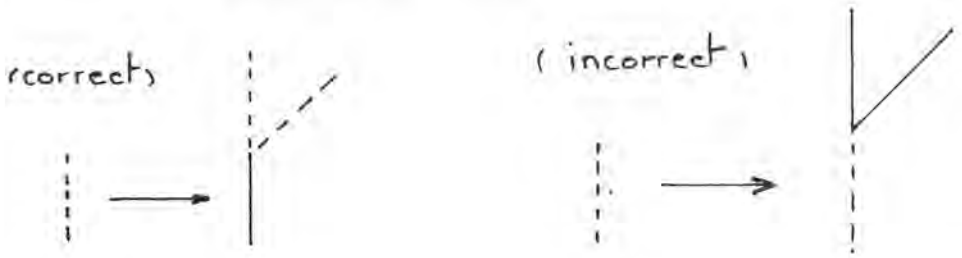
La définition des modèles utilisés est souvent fort éloignée de la réalité botanique des végétaux et se caractérise par un manque de variabilité tant dans l'organisation des structures que les modèles engendrent, c'est-à-dire dans leur topologie, que dans leur géométrie.

Fort peu de végétaux ont une structure typique de fractales. En effet, les représentations, issues des concepts de **Mandelbroot** (**MAN82**) puis développés par des auteurs comme **P. Oppenheimer** ou **Demko** et **Hodges** (**DHN85**), sont très spécifiques et ne correspondent pas une stratégie de croissance.

Les travaux, comme ceux de **Aono** et **Kunii** (**AOK84**), manipulant les traditionnels arbres binaires et ternaires informatiques, ne peuvent pas non plus prétendre représenter de nombreux végétaux. Seules quelques espèces, de surcroit typiquement tropicales, croissent selon de telles stratégies.

Notons enfin que les représentations et simulations dites de croissance, obtenues à partir des graftales ou des L_systèmes de **Smith**, ne peuvent représenter correctement la dynamique de croissance des végétaux. Comme nous le verrons par la suite, une plante se développe par ajouts successifs et irréversibles d'éléments que l'on peut considérer comme étant statiques.

La production présentée, typique de cette approche est dans certains cas contradictoire avec le caractère irréversible des ajouts. Elle est donc dénuée de réalisme si on ne l'applique pas dans une zone périphérique du végétal.



Ces remarques attirent notre attention sur plusieurs faits. D'une part le rôle que jouent les modèles dans la représentation des végétaux est capital, bien plus que celui du rendu visuel, plus technique. Ceci est principalement dû à la richesse topologique de l'architecture des plantes.
D'autre part, la diversité des modèles ainsi que leurs faiblesses montrent la difficulté de décrire les végétaux. Malgré la généralité des approches que nous avons citées, aucune de ces méthodes ne permet de décrire la variabilité caractéristique de la flore. Il est à noter qu'aucune de ces démarches classiques ne s'inspire de travaux scientifiques traitant le sujet; dans ces approches, on a plutôt cherché à adapter des modèles pour représenter la physionomie des végétaux.
De surcroit, un modèle adéquat doit non seulement être capable de représenter un élément végétal quelconque mais également son évolution au cours du temps; ses principes élémentaires doivent donc être définis de manière constructive et dynamique en fonction du temps.

La méthode que nous développons ici, est issue de concepts et de méthodes approchant l'architecture des végétaux éprouvés par la recherche fondamentale et appliqués sur le terrain. Ils définissent ce que nous appelons la modélisation de l'architecture des végétaux.

La modélisation de l'architecture des végétaux, point essentiel dans ce travail, sera donc particulièrement détaillée.

Elle se compose de 2 volets essentiels:

l'un botanique, manipulant des concepts généraux et permettant de définir des lois générales de l'élaboration de la structure de tout corps végétal;

l'autre mathématique, à vocation agronomique, permettant de décrire la topologie et la géométrie précises d'une plante particulière.

Ces deux approches permettent de décrire l'architecture des végétaux à partir d'éléments atomiques: les entrenoeuds et les unités de croissance. Cette modélisation nous montre de plus, qu'on ne peut appréhender la physionomie des végétaux sans son évolution dans le temps, donc que l'architecture d'un végétal est le résultat d'un certain nombre de processus organisés autour des éléments atomiques. Ces processus, appelés principes fondamentaux sont au nombre de 3: la mort, la croissance et la ramification. Ils opèrent sur les éléments atomiques de manière discrète, en fonction du temps.

Une telle modélisation ne peut donc qu'aboutir à un modèle de simulation. Ce modèle, est un modèle stochastique linéaire (les éléments atomiques sont et se développent de manière linéaire). Son implémentation, bien que simplifiée et restrictive mais indépendante du contexte graphique, aboutit à la conception d'un générateur de végétaux à vocation générale tant en agronomie qu'en image de synthèse.

Son élément fondamental et original est le moteur de croissance; il permet de décrire et de simuler l'évolution de la topologie d'un système ramifié en décrivant l'activité des bourgeons selon 3 principes fondamentaux: la mort, la croissance et la ramification. De plus, la géométrie de ce modèle est plus fine et variée que dans la majorité des approches classiques. Nous verrons qu'elle intègre notamment la théorie de la résistance des matériaux du modèle mathématique.

L'obtention d'images issues d'une ou de plusieurs simulations sera réalisée par une chaîne de visualisation, simple mais performante grâce à des structures de données adéquates.

Ce travail, concrétisé par un logiciel transportable, opérationnel et commercialisé s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche de l'AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes). Du point de vue pratique, la réalisation du logiciel a nécessité les étapes suivantes:

- l'assimilation des principaux concepts de la botanique architecturale;
- la familiarisation avec le modèle mathématique de Ph. de Reffye, et le développement de points particuliers géométriques;
- l'élaboration, à partir des premières simulations réalisées par Ph. de Reffye, d'un générateur de végétaux à vocation générale en définissant un "moteur de croissance" et sa géométrie associée;
- l'élaboration d'une chaîne de visualisation graphique avec des structures de données appropriées à la représentation d'objets complexes;
- l'exploitation du logiciel dans divers contextes.

CHAPITRE I

MODÉLISATION DE L'ARCHITECTURE DES VÉGÉTAUX

1. MODÉLISATION BOTANIQUE

De par la nature même de la flore, diverses disciplines se sont développées dans le cadre de la botanique telles que la classification taxonomique, les études morphogénétiques, la phytomathématique, l'approche architecturale et bien d'autres ...

La botanique répertorie les végétaux grâce à la taxonomie. Cette discipline permet la classification de la flore en famille (ex.:Mimosaceae, Rosaceae, Pinaceae, ...) et, dans chaque famille, en genres et espèces (ex.: Quercus ilex - Chêne vert). Les critères de cette sélection sont principalement rattachés à des critères descriptifs des organes reproducteurs, des fleurs en particulier. Cette approche, développée depuis le 18ème siècle (LINNE) ne permet cependant pas de définir des caractères physionomiques. En effet, si des individus appartenant à une même espèce conservent en général la même physionomie et stratégie de croissance, il n'en est rien pour les familles. On ne peut pas dire, à quelques exceptions près (Palmaceae), qu'une physionomie est caractéristique d'une famille et réciproquement; l'exemple des Rosaceae l'illustre: rosiers, nombreux fruitiers comme les pommiers...

De plus, la phytomathématique et la morphogénétique sont souvent incapables de définir la physionomie d'un végétal. Elles travaillent sur des points locaux et internes aux mécanismes de vie; l'intégration de ces mécanismes étant difficile et sortant du cadre de leurs spécialités.

Nous voyons donc que ces disciplines sont mal adaptées à la représentation de végétaux. L'approche architecturale, par contre, grâce à son aspect descriptif, comme nous le verrons, nous convient plus particulièrement. Aussi rappellerons nous dans un premier temps les principaux concepts propres à cette démarche, puis leur extension à d'autres organismes fixés. Enfin, nous montrerons que cette approche permet la simulation de croissance des végétaux et, donc, leur représentation.

1.1. L'APPROCHE ARCHITECTURALE

L'architecture des végétaux est une discipline récente inspirée par l'étude des arbres tropicaux.

Bien que de nombreux scientifiques de tous bords se soient intéressés à la physionomie des végétaux et de leur évolution au cours du temps (**Léonard de Vinci, Corbusier, Stevens, ...**) , il a fallu attendre les travaux de **F. Hallé** et **R.A.A. Oldemann** (**HAL70**) pour que l'architecture des végétaux devienne discipline intégrante de la Botanique.

Cette nouvelle démarche, complémentaire des autres, est principalement développée à l'USTL de Montpellier et fait école sous l'impulsion de **F. Hallé** et **C. Edelin.**

1.1.1. DÉFINITION

On appelle architecture d'un organisme végétal la structure du corps de celui-ci.

Cette définition sous-entend deux aspects; l'un statique, désignant la structure du corps végétal au moment où il est observé, l'autre dynamique, désignant alors le résultat d'une succession de structures du corps, de sa germination jusqu'au moment où il est observé. C'est ce dernier aspect que nous retiendrons plus particulièrement.

Dans un milieu homogène et propice, l'architecture d'une espèce végétale varie peu, elle est fortement correlée aux caractères génétiques ou, plus largement endogènes, de l'espèce.

Une autre formulation de la définition pourrait être: L'architecture d'un végétal dans un milieu donné est une fonction du temps et de ses caractères endogènes, décrivant la topologie et la geométrie de son corps.

Dans la suite, nous nous restreindrons à l'architecture des parties aériennes, en écartant volontairement la partie racinaire.

1.1.2. BUT

Le but de l'approche architecturale consiste à mettre en évidence les rapports entre les différentes parties et organes du corps végétal au cours de sa vie.

Dans notre cas, nous verrons que cette démarche, bien qu'en majeure partie qualitative, permettra de dissocier différents niveaux d'organisation du végétal auxquels nous pourrons rattacher des caractères spécifiques et quantitatifs.

1.2. LES CONCEPTS FONDAMENTAUX

1.2.1. LE MOUVEMENT MORPHOGÉNÉTIQUE

De sa germination jusqu'à sa mort, le végétal suit une séquence de développement. "Le cycle d'un végétal apparaît comme la réalisation d'un programme d'évènements interconnectés" (NOZ85).

La croissance du végétal s'effectue par des méristèmes, tissus auto-reproducteurs. L'on distingue les méristèmes primaires, à l'origine des organes (tiges, feuilles), des méristèmes secondaires comme le cambium qui provoque l'épaississement des axes.

On peut montrer (NOZ85) que les méristèmes primaires changent petit à petit de nature au cours du temps dans un mouvement orienté. Cette transformation peut culminer en fin de vie du végétal par l'apparition massive de la floraison et provoquer des métamorphoses.

Ce mouvement morphogénétique constitue une séquence de développement où vont apparaître, tour à tour, différents processus. Ces processus et leur matérialisation peuvent être hiérarchisés et appréhendés comme des "niveaux d'organisation".

1.2.2. LES DIFFÉRENTS NIVEAUX D'ORGANISATION

Nous allons ici décrire les principaux processus et leurs actions sur des éléments architecturaux intervenant dans le mouvement morphogénétique.

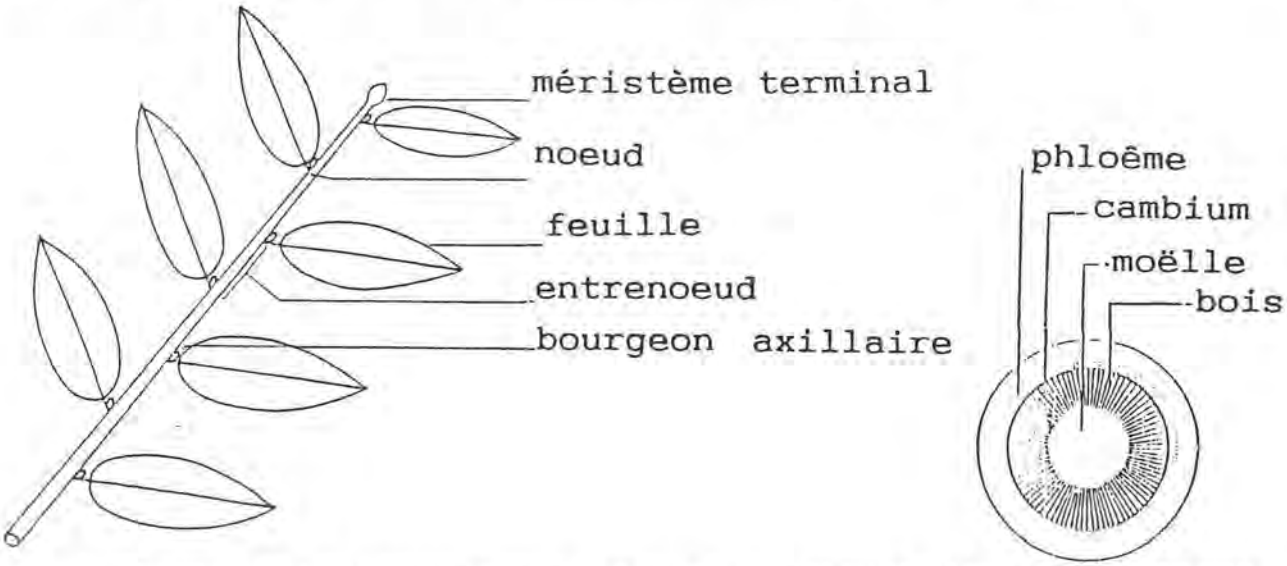
Le schéma suivant résume les principaux concepts détaillés plus bas. Ils sont présentés par degré croissant d'organisation.

Processus	Résultat	Concepts
croissance	entrenoeud	
	unité de croissance	axe
floraison		module
ramification	système ramifié	
différentiation morphologique des axes		modèles architecturaux
réitération	complexe réitéré	
	cime	
sénescence		

1.2.2.1. L'axe feuillé

L'axe feuillé est l'élément fondamental dans l'approche architecturale. Il peut, à lui seul, suffire à une modélisation graphique simple des systèmes ramifiés (**HAL79**).

L'axe feuillé est le résultat de l'activité du bourgeon terminal; il consiste en une succession d'entrenoeuds séparés de noeuds qui portent des feuilles et des bourgeons axillaires.



A chaque noeud correspond une ou plusieurs feuilles. Chaque feuille porte à son aisselle un bourgeon axillaire. Lorsqu'un noeud porte plusieurs méristèmes axillaires (donc plusieurs feuilles) on dit que l'on est en présence d'un **verticille** de bourgeons (et de feuilles). L'entrenoeud est la partie d'axe comprise entre 2 noeuds successifs (donc 2 ensembles successifs de feuilles) d'un même axe.

Croissance

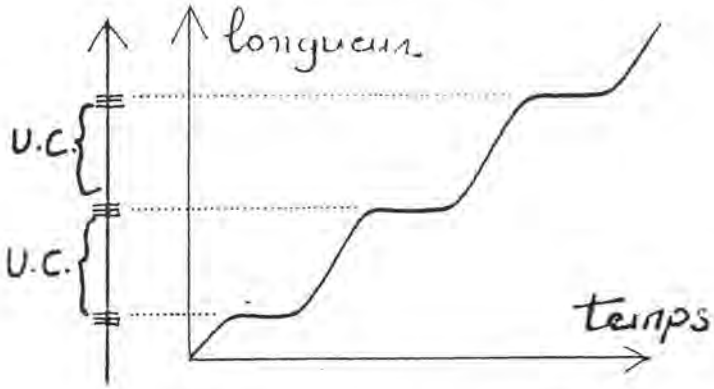
La croissance en longueur s'effectue par le méristème terminal en deux phases :

- fabrication d'un certain nombre de noeuds dans le méristème terminal constituant ainsi une **Unité de Morphogénèse** (*),
- élongation d'un certain nombre de noeuds présents dans le méristème en un temps court, constituant ainsi une **Unité de Croissance**.

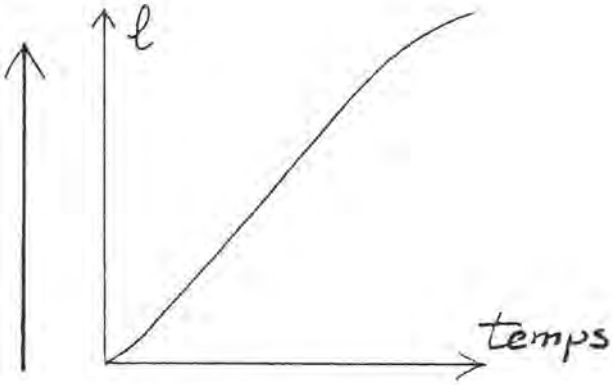
(*) Cette fabrication, consistant en la réalisation des différents noeuds et des ébauches de feuilles, s'effectue de manière rythmique, cadencée par le plastochrone.

La croissance peut donc être considérée comme un <u>processus discret</u> qui s'opère par ajouts successifs d'unités de croissance; une unité déjà présente n'évolue plus en longueur si ce n'est pour mourir; le processus de disparition ou chute d'une portion d'axe est appelé **élagage**.

La croissance est généralement **rythmique** avec des successions régulières de phases d'élongation et de repos mais elle peut être **continue**, ce qui est exceptionnel car elle nécessite un synchronisme entre les unités de morphogénèse et de croissance.



Axe à croissance rythmique



Axe à croissance continue

La croissance en épaisseur de l'axe s'effectue généralement par le cambium, méristème particulier réparti sur la périphérie de l'entrenoeud entre le bois et le phloême. Tout comme la croissance en longueur, la croissance en épaisseur s'effectue généralement de manière irréversible par des ajouts successifs continus ou rythmiques de matières poussant ainsi l'écorce vers l'extérieur.

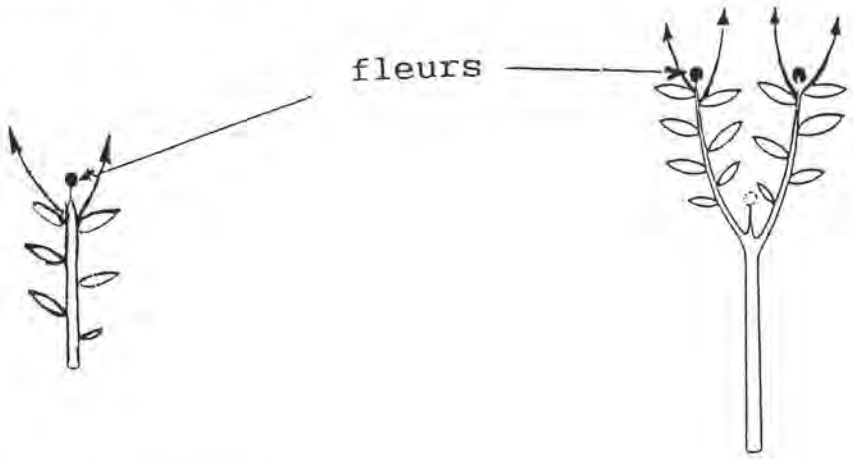
Dans la suite nous prendrons le terme croissance pour désigner la croissance en longueur.

<u>Floraison</u>

La position de la sexualité sur un axe est capitale, car un bourgeon floral ne permet pas le développement d'une unité de morphogénèse. On distingue sur un axe 2 types d'implantation de la sexualité:

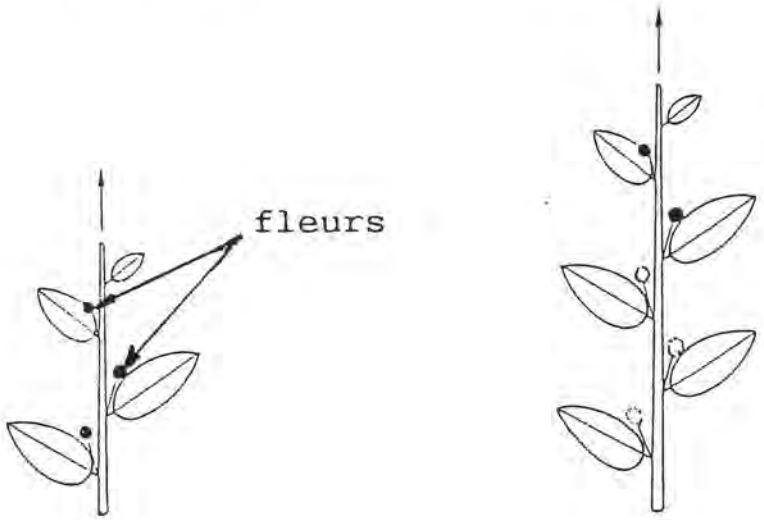
a) **La sexualité terminale**

Elle provoque l'arrêt de croissance de l'axe. Elle ne peut donc continuer que grâce à des relais: la croissance est alors dite **sympodiale.**



b) **La sexualité latérale**

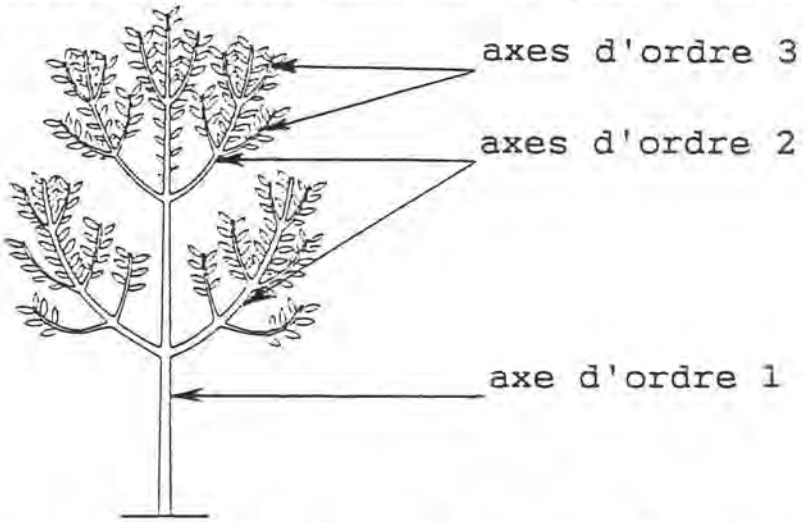
Elle permet à l'axe une croissance potentiellement indéfinie: la croissànce est alors dite **monopodiale.**



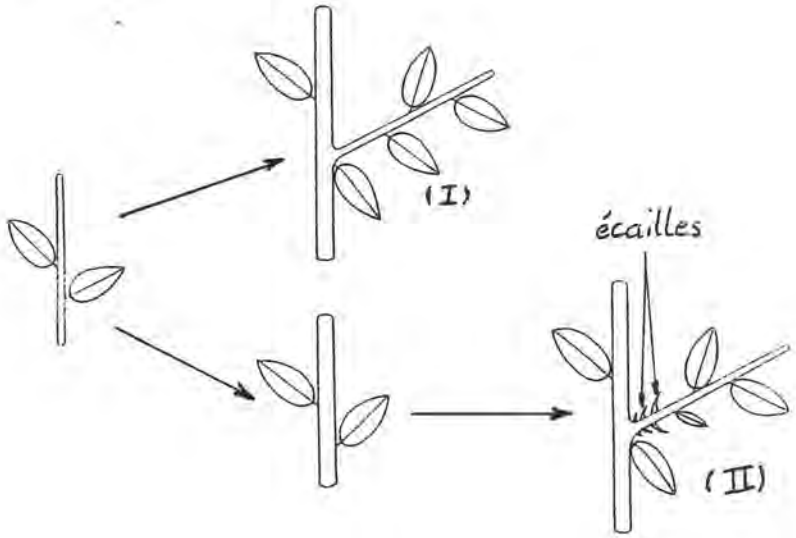
On appelle **module** un axe capable de supporter toutes les étapes végétatives, c'est à dire possédant des feuilles et dont le méristème terminal se transforme en bourgeon floral.

1.2.2.2. Systèmes ramifiés

On désigne par **ramification** le processus conduisant à l'apparition d'un axe sur un axe déjà existant. Cet axe nouvellement formé sera issu d'un méristème axillaire disposé sur un noeud à l'aisselle d'une feuille. On définit par **ordre** de ramification d'un axe le nombre de ramifications nécessaires à sa construction. L'ordre de l'axe issu de la graine vaut 1, par convention.

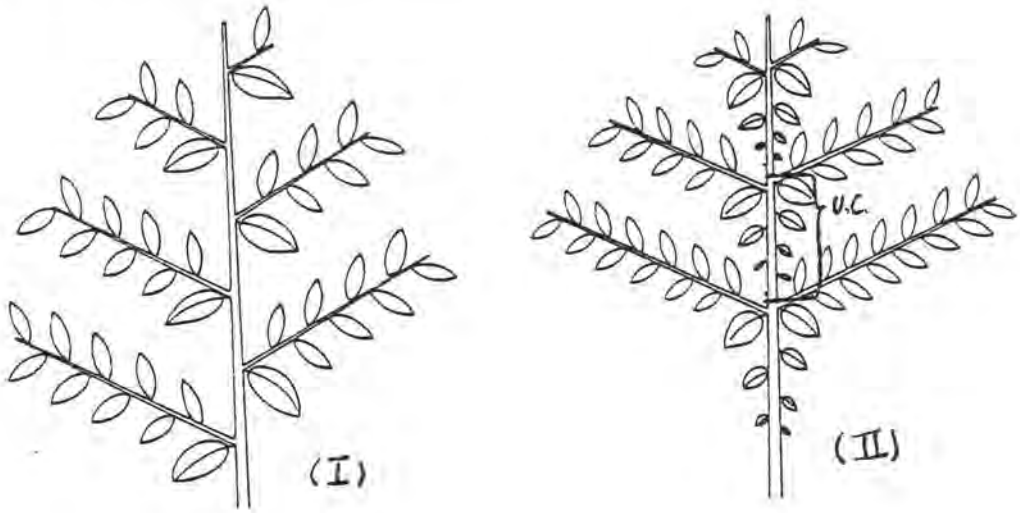


La ramification peut être à développement **immédiat** (I) ou **différé** (II) dans le temps.Dans ce dernier cas on a un processus de **dormance** du méristème axillaire avant la ramification. La levée de dormance du bourgeon laisse généralement des traces (écailles) sur l'axe.



Dans une unité de croissance on peut également distinguer la ramification <u>continue</u> de la ramification <u>rythmique</u> et de la ramification <u>diffuse</u>.

Dans le cas continu à chaque noeud vont apparaître un ou plusieurs axes, dans les autres cas seuls certains noeuds vont en former, de manière périodique (rythmique) ou aléatoire (diffuse) à l'intérieur d'une unité de croissance. La nature de cette ramification peut être indépendante de celle de la croissance. On peut par exemple avoir un axe à croissance continue se ramifiant de manière rythmique ou diffuse.



ramification continue

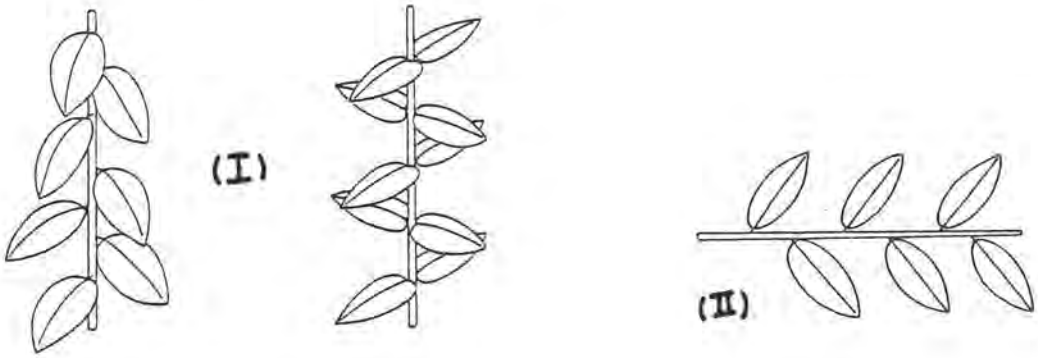
ramification rythmique

On nomme **système ramifié** un ensemble d'axes édifié par des ramifications. Dans un tel système, les axes de même ordre ont des caractères morphologiques équivalents.

Différentiation morphologique des axes, orthotropie, plagiotropie.

Un des caractères morphologiques primordiaux d'un axe est l'orientation principale de développement de celui-ci. On différencie les axes verticaux, à rôle d'exploration, des axes horizontaux, ou plus généralement se développant dans un plan, à rôle d'exploitation du milieu. La tendance de développement verticale (horizontale) d'un axe est appelé **orthotropie** (respectivement **plagiotropie**). Un axe peut présenter ces caractères simultanément; il est alors appellé axe **mixte**.

A l'orthotropie est généralement associée une répartition des feuilles autour de l'axe en spirales: on a alors une **phyllotaxie spiralée(I)**. A la plagiotropie est associée une répartition des feuilles dans un plan: on a une phyllotaxie **distique(II)**.



D'autres différentiations plus fines existent (voir 1.2.2.4).

1.2.2.3. Les modèles architecturaux

Définition: un **modèle architectural** est une stratégie d'occupation du milieu, constatée sur le terrain, et se décrivant à partir des concepts détaillés ci-dessus à savoir : position de la sexualité, orthotropie et plagiotropie, type de croissance, ramification...

C. Edelin (EDE77) parle en effet du modèle architectural comme d'une stratégie fondamentale de l'occupation de l'espace, et, de l'expression visible du programme endogène de développement de la plante.

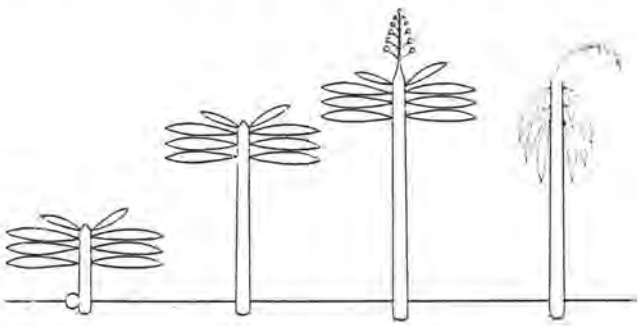
La combinatoire issue des divers concepts détaillés plus haut permet un grand nombre de combinaison mais l'étude sur le terrain n'a en fait retenu que 23 modèles architecturaux pour l'ensemble de la flore. Ils sont décrits, illustrés et commentés pour la première fois par **F. Hallé, R.A.A. Oldemann** et **Tomlinson** en 1978 (**HOT78**). Certaines combinaisons ont été regroupées sous un même modèle, d'autres n'ont jamais été rencontrées. Il est en fait bien difficile d'imaginer les modèles issus de cette combinatoire et encore bien plus de savoir si ces stratégies sont viables ou non.

Quelques modèles architecturaux (Illustrations reproduites d'après "Tropical Trees and Forests" :HOT78).

Les modèles architecturaux sont répertoriés par des noms de botanistes. Signalons que seul un petit nombre d'entre eux sont rencontrés en Europe (RAUH,MASSART,TROLL,CORNER).

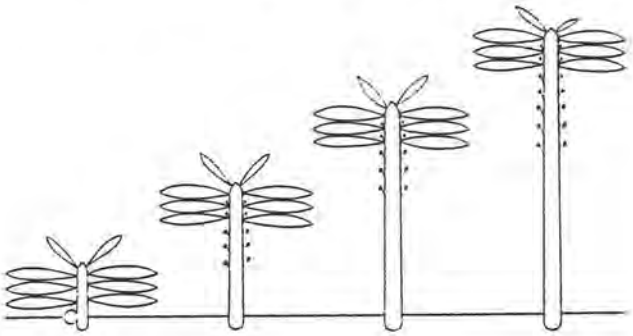
Le modèle de **HOLTTUM:**

caractérisé par un unique axe portant de grandes feuilles et une sexualité terminale. La sexualité est unique et provoque la mort de la plante.



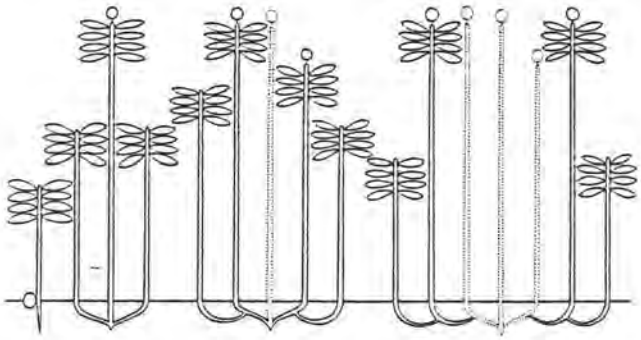
Le modèle de **CORNER:**

caracterisé par un unique axe portant de grandes feuilles et une sexualité latérale. Exemple: Cocotier, Dattier, ...



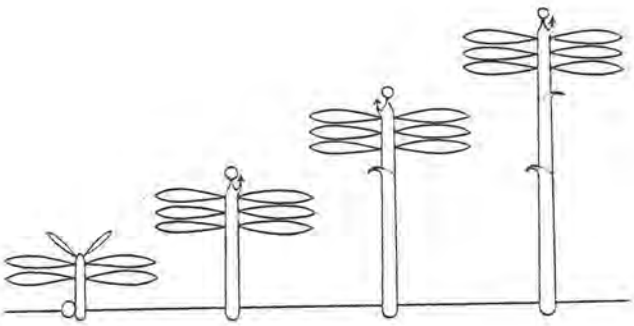
Le modèle de **TOMLINSON:**

caractérisé par la répétition à la base d'un axe unique; cette ramification particulière peut être assimilée à une duplication totale ou encore à une réitération (voir 1.2.2.5).



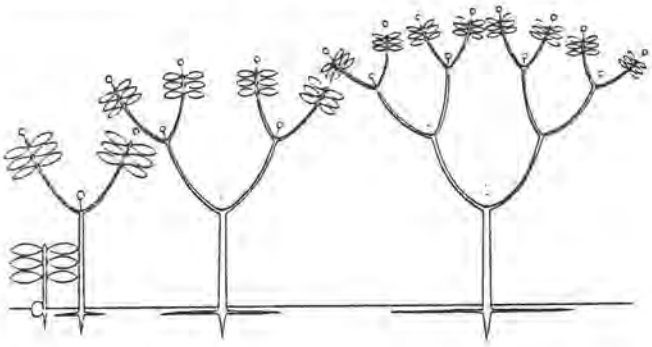
Le modèle de **CHAMBERLAIN:**

caractérisé par une succession de modules aboutissant à un tronc. La ramification, unique pour chaque module, s'opère juste sous la floraison de chaque module, elle est dite subterminale. Exemples: certaines Orchidées, Costus, ...



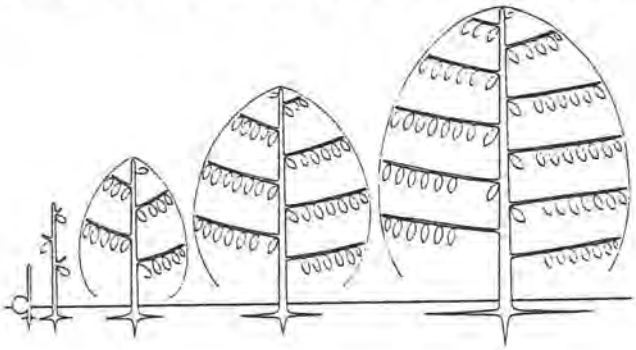
Le modèle de **LEEUWENBERG:**

caractérisé de même manière que le modèle de CHAMBERLAIN, mais avec au moins 2 ramifications subterminales. La plante exploite avec cette stratégie, l'espace en volume. Exemple: Faux-manioc, Frangipanier, ... Cette architecture est bien connue dans le contexte informatique: arbres binaires, ternaires. Elle est cependant absente dans la flore Européenne.



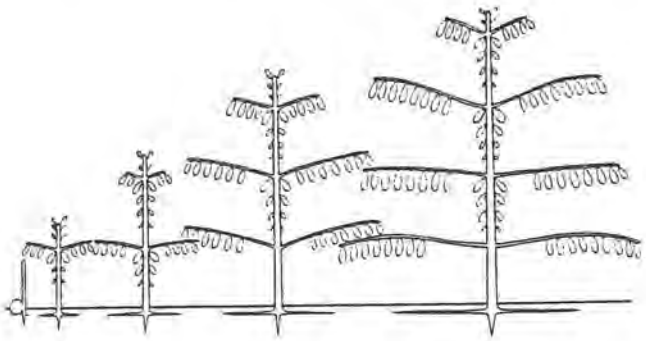
Le modèle de **ROUX:**

caractérisé par un système ramifié à croissance continue et monopodial où l'axe d'ordre 1 est orthotrope, les autres étant plagiotropes. Exemples: Caféier, certaines plantes de sous-bois..



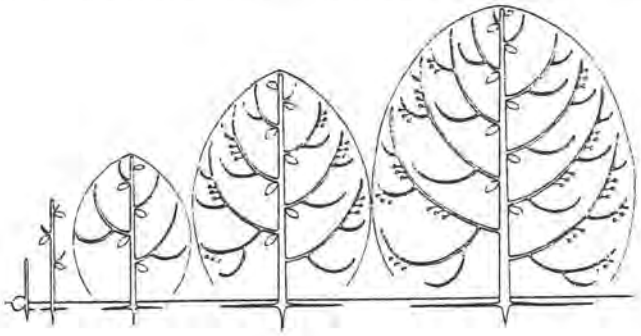
Le modèle de **MASSART:**

caractérisé de même manière que le modèle de ROUX, mais avec une croissance rythmique. Exemples: Epicea, Sapins, ...



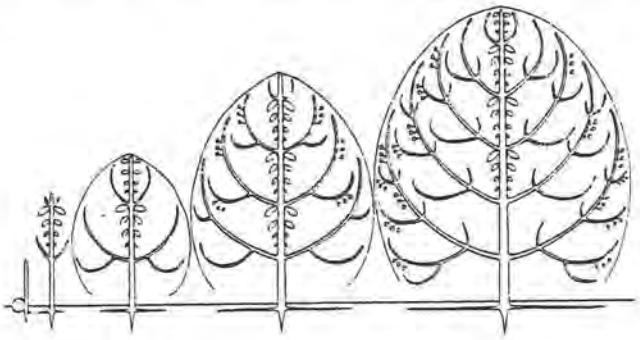
Le modèle d'**ATTIMS**:

caractérisé par un système ramifié à croissance continue et monopodiale où tous les axes sont orthotropes.



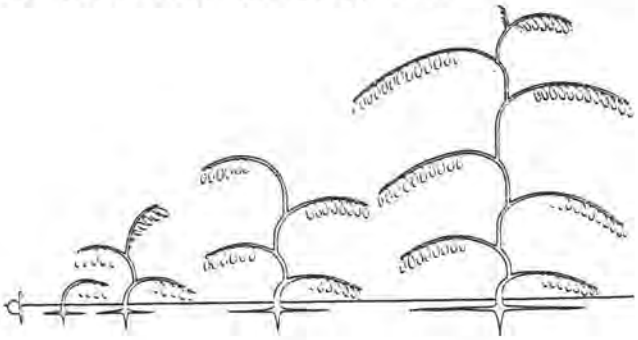
Le modèle de **RAUH**:

caractérisé de même manière que le modèle d'ATTIMS mais avec une croissance rythmique. Exemples: Peuplier, Pin parasol, Cerisier, ...



Le modèle de **TROLL**:

caractérisé par un système ramifié constitué d'axes mixtes et plagiotropes. La plante de développe en formant un tronc par duplication (voir 1.2.2.5 Réitération) des axes mixtes dans leur parties orthotropes. La partie plagiotrope des ces axes développe un système ramifié dans un plan suivant un autre modèle (RAUH, MASSART, ROUX...). Exemples: Acacias, Hêtres, ...



Cette sélection et description sommaire soulignent l'hétérogénité des modèles architecturaux .

On peut par exemple avoir du TOMLINSON de CORNER ou de HOLTTUM, du TROLL de MASSART ou de ROUX,... Elle montre de plus l'insuffisance du modèle à décrire une espèce particulière.

1.2.2.4. Le diagramme architectural

Le **diagramme architectural** décrit les caractères spécifiques d'une espèce végétale exprimant un modèle architectural particulier dans un milieu donné. L'élaboration du diagramme architectural nécessite l'observation de l'espèce, elle est d'autant plus fine que les observations le sont. Elle consiste en une description de caractères généraux de l'espèce, puis d'une description des caractères de chaque ordre.

Caractères généraux:
- modèle architectural
- âge de la plante
- type de croissance (rythmique/continue)
- ordre limite de ramification (en pratique de 1 à 5 ou 6)

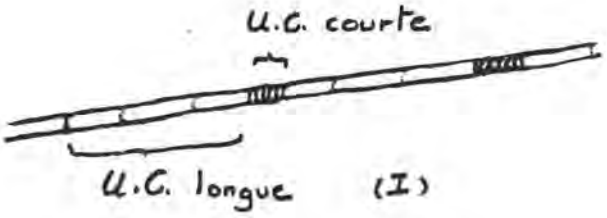
Caractères d'un ordre donné:

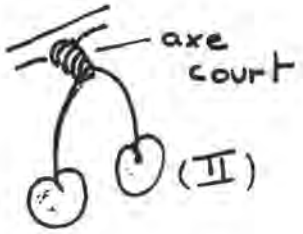
On décrit un axe moyen de chaque ordre, car chaque axe d'un ordre donné possède des caractères morphologiques, fonctionnels et biométriques propre à cet ordre. Nous détaillons ici un caractère particulier important dans la suite: la nature des unités de croissance constituant les axes.

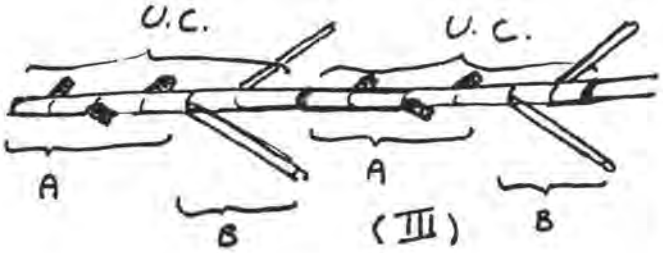
Unités de croissances courtes et longues.

On distingue les unités de croissance dites "courtes" des autres dites "longues". Elles sont généralement constituées d'un nombre réduit d'entrenoeuds de longueurs faibles (1 mm voire moins, figure I). La distinction n'est pas seulement de nature géométrique; dans certains cas, comme pour de nombreux arbres fruitiers, la sexualité ne se développe que sur des axes courts, c'est à dire uniquement constitués d'unités de croissance courtes (figure II).

De plus, à l'unité de croissance longue est généralement associé un partage définissant la nature des UC (courtes ou longues) issues par ramification (voir figure III).







A: zone à ramification d'axes courts

B: zone à ramification d'axes longs

La liste des autres caractères est non exhaustive et peut comporter:

- la présence et position de la sexualité, des feuilles
- le nombre d'axes par noeud,
- la tendance de développement (Orthotropie/plagiotropie),
- la vitesse d'élaboration de l'axe,
- la viabilité de l'axe, sa limite de développement,
- la description d'une unité de croissance,
- les angles de phyllotaxie et de branchement,
- l'élasticité de l'axe,
- ...

(voir la liste complète des paramètres au Ch.II, en 4.2.1)

Nous voyons que le diagramme architectural est un outil intéressant pour la représentation du végétal, car, pour un modèle architectural donné, il fournit des informations qualitatives mais surtout numériques aussi bien sur la topologie (ordre limite de ramification,..) que sur la géométrie (angles,..). Il est cependant insuffisant à décrire tous les végétaux; en effet, si de nombreuses herbes croissent suivant un modèle architectural, d'autres phénomènes interviennent chez la majorité des arbres; on y retrouve, sur le terrain, des répétitions totales ou partielles du diagramme architectural.

1.2.2.5. La réitération

La réitération est un proccesus mis en évidence depuis peu par **R.A.A. Oldemann (OLD74)**.

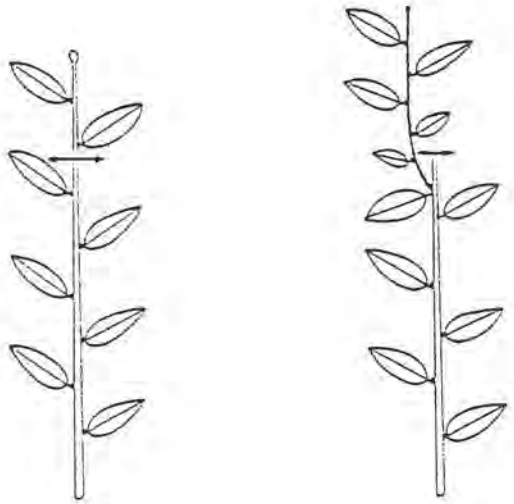
Définitions

La **réitération** est un processus morphologique consistant en une duplication complète ou partielle du diagramme architectural à localisation partiellement aléatoire. Son action conduit à l'apparition d'un **complexe réitéré** partiel ou total. Dans le cas d'un complexe réitéré **partiel**, seuls les ordres les plus élevés sont présents. La duplication s'effectue donc par nombre croissant d'ordre; ainsi, le complexe réitéré est **total** si l'on y retrouve l'ordre 1 du diagramme architectural.

On distingue communément la réitération traumatique de la réitération adaptative.

a) La réitération traumatique

Il s'agit de la régénérescence d'une partie lésée de l'organisme. L'axe régénéré possède les mêmes caractères morphologiques que l'axe lésé. Ce phénomène est naturellement très fréquent et marque peu le devenir de la plante, seules quelques cicatrices et déviations angulaires persistent au bout d'un certain temps. Son utilisation par l'homme est courante et diversifiée : taille, recépage... ; dans ce cas le traumatisme peut être violent et le développement des complexes réitérés (rejets), change considérablement le devenir de la plante.



b) La réitération adaptative

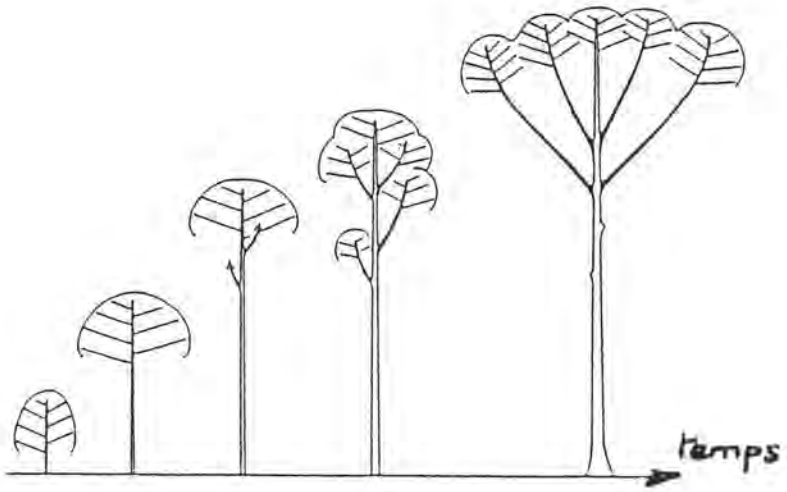
La réitération adaptative (non traumatique) est un processus intervenant durant le développement normal de l'individu dont elle constitue une étape génétiquement programmée. Son apparition correspond à un degré de maturation de l'individu en temps relatif par rapport à sa durée de vie.

Ce processus est un moyen d'accroître le système ramifié en établissant des branches maîtresses pour constituer une **cime**. Plus tard, ces branches maîtresses deviennent simplement un support pour de nombreux complexes réitérés; ceux-ci se comportent alors comme des individus isolés en concurrence: l'arbre est devenu une **colonie**.

C. Edelin (EDE84) met deux stratégies de constitution de cime en évidence:

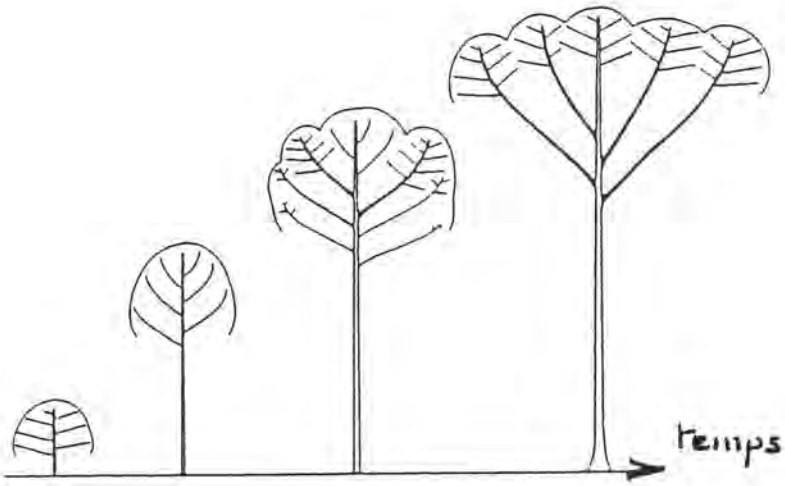
1) La réitération adaptative proleptique.

L'organisme porte de nombreux bourgeons qui, dès leur apparition, entrent en dormance, parfois définitivement. L'arbre jeune n'a pas la capacité de réitérer adaptativement. Durant plusieurs années, il croît en hauteur en gardant une structure conforme au diagramme architectural de son espèce. Soit à la suite de quelques tentatives discrètes mais significatives, soit soudainement, quelques bourgeons dormants entrent en croissance. Ils vont constituer des complexes réitérés totaux et établir les branches maîtresses de l'arbre adulte.



2) La réitération adaptative sylleptique

Dans ce cas, les complexes réitérés sont issus non plus de bourgeons en croissance mais de branches en croissance. Le processus intervient souvent après une transformation progressive de l'architecture de la plante, ou métamorphose architecturale, au cours de laquelle on assiste à la formation de branches de plus en plus ramifiées et orthotropes. Les réitérations, d'abord partielles, deviennent totales. Au terme de la réitération adaptative apparait l'infrastructure de la cime de l'arbre adulte.



1.2.2.6. Sénescence

Pendant de longues années, l'arbre adulte continue son développement par l'apparition de nombreux complexes réitérés sur les branches maîtresses. A ce stade, l'arbre est devenu une colonie où chaque complexe réitéré se comporte comme un individu isolé; il est en concurrence avec son environnement et spécifiquement avec les complexes voisins.

Plus tard, la sexualité devient envahissante. Dans un premier temps souvent latérale, elle gagne peu à peu les axes périphériques jusqu'à devenir terminale. Ceci implique alors le développement des axes en modules : la croissance monopodiale devient sympodiale. D'autres processus interviennent dans la sénescence comme la dégradation du support, l'affaissement de cime,... ils sont encore mal connus et en cours d'étude. D'importantes métamorphoses se produisent jusqu'à la mort de l'individu.

1.3 GÉNÉRALISATION DE L'APPROCHE ARCHITECTURALE

Une des originalité de l'approche architecturale est sa souplesse d'emploi dans des domaines multiples comme le laisse entendre **F. Hallé (HAL79)** : " Sur le plan théorique, les modèles architecturaux correspondent à la fois à des systèmes informatiques, des réseaux de tensions morphogénétiques, des dispositifs de captation de l'énergie lumineuse ... L'étude architecturale des animaux fixés montrerait probablement une relative diversité analogue à la diversité du règne végétal."

1.3.1. ORGANISMES FIXÉS

Une première approche architecturale des organismes fixés confirme l'hypothèse de **F. Hallé**. En effet, **J.M. Dauget (DAU86)** montre que :

" L'étude architecturale des colonies coralliennes avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour étudier l'architecture des plantes montre que les analogies observées sont en fait le résultat de processus de croissance fondamentalement identiques :

- la production d'axes et de systèmes d'axes ramifiés,
- l'organisation de ces sytèmes d'axes suivant des mêmes modèles de croissance,
- la réitération du modèle architectural, soit à la suite d'un traumatisme, soit naturellement au cours de la croissance de l'organisme,
- des variations physionomiques de même type liées aux fluctuations du milieu.

L'étude architecturale étendue à d'autres formes vivantes montre que ces caractéristiques se retrouvent également au sein des autres groupes animaux fixés, notamment les Hydraires, les Gorgones, les Antipathaires, les Eponges et les Bryozaires."

Dans ce même travail, J.M. Dauget souligne également d'autres analogies telles que les symétries, radiales pour les axes verticaux, dorsiventrales pour les axes horizontaux.

1.3.2. AUTRES CONTEXTES INTÉRESSÉS

Nous nous sommes intéressés jusqu'à présent au règne vivant se développant dans son milieu, dans un cas aérien, dans l'autre marin, à partir d'un point fixe (le sol en général). On peut tenter une approche architecturale dans d'autres règnes, par exemple minéral, ou dans d'autres espaces physiques ou encore abstraits. Il est certes hors de propos de mener ici de telles études, mais il peut être utile de citer quelques applications d'une telle approche.

Beaucoup de phénomèmes physiques naturels ou provoqués présentent en effet des aspects d'arbres ou d'arborescences. Ces phénomèmes, que **P. Stevens** (**STE78**) dit obtenus à partir de processus de "branchements" ou de "jonctions", se rencontrent tant à l'échelle microscopique comme la formation d'agrégats moléculaires (**JBK85**), de croissance de cristaux (**STO86**), que macroscopique comme la description de bassins fluviaux (**HOR45**), (**STR52**).

Des approches morphologiques spécifiques à ces échelles et au contexte d'étude existent mais peu d'entre elles s'appuyent sur une méthode homogène de description et d'appréhension. Deux outils à vocation générale se distinguent cependant. L'un, développé à la suite des travaux de **B. Mandelbrot** (**MAN75,77** et **82**), utilise des concepts résultant de la théorie des fractals; l'autre, développé par **J. Françon** (**FRA76** et **FRA84**), **G. Eyrolles** et **Viennot** (**EYR86** et **EVF86**), cherche à déterminer la combinatoire des phénomènes étudiés. Ces outils se développent, tant sur le plan théorique que sur les domaines d'application.

Nous suggérons ici, de généraliser l'approche architecturale par la mise en évidence, dans d'autres sciences que la Botanique, de processus de croissances, de systèmes d'axes ramifiés, de modèles architecturaux, de réitérations, qui, sans rejeter les outils existant, pourrait apporter plus de précision et de compréhension; elle permet en outre, de s'adapter à un contexte d'étude particulier tout en respectant une démarche et une description générale face aux phénomènes évoluant dans l'espace à partir d'un point fixé.

1.3.3. CONCLUSION

L'approche architecturale des végétaux en Botanique permet de décrire la physionomie et la croissance d'une espèce végétale grâce à des concepts généraux dynamiques et constructifs.

Cette démarche, jeune et en plein essor, reste cependant à développer sur les points suivants: sénescence et partie racinaire. Nous retiendrons qu'elle donne une connaissance suffisante du végétal en nous montrant :

- quels processus régissent l'architecture des végétaux et leur évolution au cours du temps
- comment se décrit une espèce végétale particulière à travers le diagramme architectural et la réitération.

Les concepts définis dans cette étude expriment des faits et des observations sur de multiples espèces; nous les assimilerons à des lois ou règles qui autorisent, toutefois, une combinatoire riche et variée. La description d'une espèce particulière dans cette combinatoire s'effectue par le détail de chaque ordre d'axe et par les modalités d'apparition de la réitération; on y retrouve à la fois des conditions d'expression des règles (une espèce suit un modèle architectural), mais aussi des paramètres fins, numériques (angles par exemple).

Le respect de cette approche est nécessaire à la simulation de croissance et à la représentation de végétaux. Notons cependant qu'il n'est pas suffisant: rien ne prouve que toutes les possibilités issues de la combinatoire générée par les concepts vus soient viables. Signalons de plus, que la conception d'un modèle de simulation selon cette démarche est réalisable car:

- l'élaboration de l'architecture est un processus discret s'opérant par ajouts successifs,
- l'architecture est controlée au fur et à mesure de son développement par des organisations hiérarchisées,
- les processus et entités élémentaires intervenant dans cette approche sont déduis d'observations directes sur le terrain, donc chiffrables,
- La description d'une espèce donnée, donc la simulation, est possible car aussi fine que l'on veut.

2. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

L'approche que nous allons exposer ici, bien que fort distincte de l'étude botanique, se montre complémentaire de celle-ci.

Cette modélisation est issue des travaux de **Philippe de Reffye** (REF79) sur l'architecture du Cafeier Robusta. Contrairement à d'autres études mathématiques, comme celles de **Fisher** et **Honda** sur le Terminalia (FIH77, FIH79, HTF82), cette approche n'est pas spécifiquement liée au végétal étudié. C'est donc tout naturellement en compagnie de P. de Reffye que cette modélisation fut poussée et élargie.

Aussi, après avoir brièvement rappelé les acquis de Ph. de Reffye, développerons nous les 2 volets de cette modélisation: la topologie puis la géométrie. Cette division est aujourd'hui classique dans la modélisation graphique; bien des auteurs la manipulent (EYR86), (OPP86), (LIE87), (SMI84),...

2.1 HISTORIQUE

Chez le Caféier Robusta, la production des graines est fonction de l'architecture de l'arbuste (la corrélation est supérieure à 90 %). Ce qui a amené Philippe de Reffye à étudier celle-ci de près, en essayant de la quantifier. Il développe dans un premier temps un modèle mathématique cinétique puis stochastique de mesure. Ce modèle, qui décrit la topologie de l'architecture du Cafeier fait appel à 3 principes généraux (la croissance, la mortalité, la ramification) qui définissent l'activité des méristèmes.

Pour des raisons de sélection, il modélise l'effet de la pesanteur sur le tronc puis les branches par la résistance des matériaux.

En intégrant de plus les données géométriques telles que les angles de branchement, et la distinction entre les axes orthotropes et plagiotropes, il réalise les premières simulations et représentations de végétaux (Caféier Robusta) sur un micro-ordinateur HP.....

Plus tard, à la suite d'une rencontre avec F. Hallé, il montre qu'il est possible d'écrire des programmes simulant le développement des modèles architecturaux.

Le modèle mathématique de mesure a, depuis, été employé avec succès en agronomie pour décrire le Cotonnier, le Litchee et le Sécropia.

Cette modélisation, originale tant sur le point de vue agronomique qu'informatique, en révélant de nombreuses potentialités, devint après développement, le fondement de nombreuses applications aussi diverses que l'image de synthèse, l'agronomie, la botanique, le paysagisme, ...

2.2 TOPOLOGIE DES VÉGÉTAUX

Un arbre est, de manière générale, l'historique de la trajectoire des bourgeons qui l'ont édifié. Il paraît dès lors naturel que pour simuler la croissance d'un arbre il faille simuler l'activité de ses méristèmes et en particulier celle de ses méristèmes terminaux. Les diverses réactions qui s'inscrivent dans cette activité décrivent ainsi principalement la topologie du végétal.

C'est certainement sur ce point que cette modélisation est particulière, la topologie des structures qu'elle décrit atteint une complexité et une diversité non égalée jusqu'à présent. Elle s'inscrit cependant dans une escalade logique nécessaire à la représentation réaliste des végétaux: des fractals (OPP86), à l'arbre binaire (AON85), jusqu'aux arbres combinatoire (EYR86), la topologie devient de plus en plus riche et prend une part de plus en plus importante.

Il nous est dès lors indispensable de définir avec précision les principes topologiques fondamentaux intervenant dans cette modélisation. On remarquera au passage qu'ils permettent également de décrire la topologie des corps d'autres phénomènes évolutifs fixés. Puis, avant d'aborder les problèmes géométriques, nous insisterons sur le rôle des relations entre ces divers principes à travers quelques exemples.

2.2.1 LES 3 PRINCIPES FONDAMENTAUX

Les propositions suivantes déterminent le caractère original de cette modélisation. Elles se justifient à posteriori, constituant en quelque sorte les "postulats" de cette démarche.

==========

L'activité d'un bourgeon est fonction du temps. Celui-ci est discrétisé en intervalles réguliers définissant ainsi des "tops d'horloge".

A chacun de ces tops, le méristème répond selon des règles qui lui sont propres par des actions qui peuvent éventuellement considérablement modifier son devenir.

Ces actions ne sont pas quelconques; elles s'inscrivent et s'expriment par les 3 principes dits "fondamentaux" suivants:

- la croissance,
- la mortalité
- la ramification.

==========

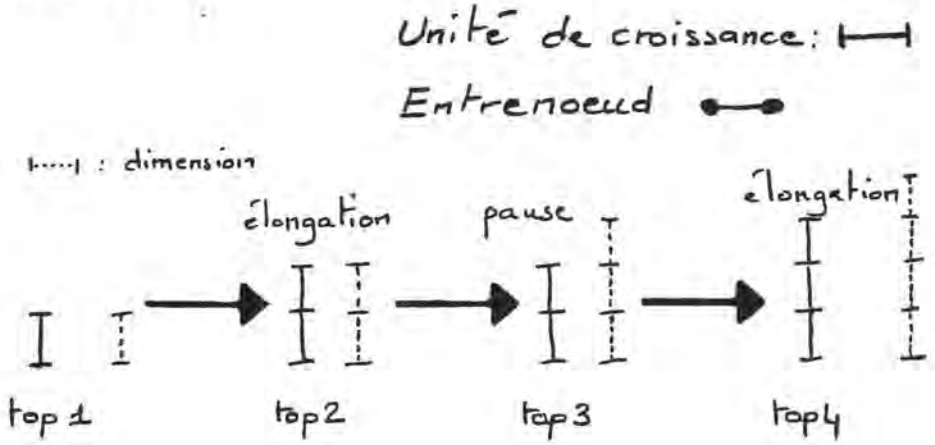
Suit la définition de ces principes ainsi que leur signification botanique.

2.2.1.1 La croissance

Définition: la **croissance** est un principe fondamental s'exprimant à intervalle de temps régulier sur un méristème terminal par deux processus exclusifs: l'élongation ou la pause.

La pause laisse le méristème terminal invariant et stable; aucune activité spécifique de croissance ne le caractérise, il dort. L'élongation consiste en la formation instantanée d'une nouvelle portion d'axe en prolongement et provoque donc le déplacement du méristème terminal qui reste généralement invariant.

On appelle **unité de croissance** le résultat de l'élongation, c'est une suite finie de **noeuds** séparés 2 à 2 d'entrenoeuds (voir justification botanique). On représente graphiquement ces concepts comme suit:



Par convention, le temps minimal entre 2 processus d'élongation successifs définit le pas de discrétisation du temps pour cet axe, c'est à dire l'intervalle entre 2 tops d'horloge consécutifs.

On appelle **âge** d'un élément quelconque du végétal le nombre de tops d'horloge nécessaires pour le réaliser depuis la graine. On appelle **dimension** d'un élément le nombre de tops d'horloge nécessaires pour le réaliser depuis le début de l'axe le portant; on nomme **portée** d'un noeud le nombre de tops nécessités pour aboutir au méristème terminal de l'axe portant le noeud. Pour le méristème terminal du tronc on a équivalence entre âge et dimension (si le tronc est formé d'un unique axe).

Signification botanique.

Le principe de croissance correspond bien à la notion de croissance botanique (voir 1.2.2.1). En effet, l'intervalle de temps relativement constant définissant les tops d'horloge peut être interprété comme le cycle de temps de l'unité de morphogénèse, et donc, la portion d'axe se formant comme l'unité de croissance (sans feuille cependant). On peut de même identifier les notions de noeud et d'entrenoeud, et l'état de pause d'un méristème à celui de dormance.

Le concept de dimension n'est pas connu dans le contexte botanique; on peut tout de même définir une relation simple entre la dimension et l'âge physique d'une plante. Par exemple, dans les régions tempérées, ne se développe en général qu'une seule unité de croissance par an; on peut donc assimiler l'intervalle de temps entre 2 tops consécutifs à un an et la dimension de l'arbre à son âge physique.

Remarques:

Le principe de croissance s'applique ici sur une unité de croissance, l' élongation engendre un nombre de noeuds fixé en un seul top. Le nombre de noeuds (dans une UC) diminue en général légèrement au cours des tops successifs sur l'axe: on dit qu'il y a un phénomène de **dérive**.

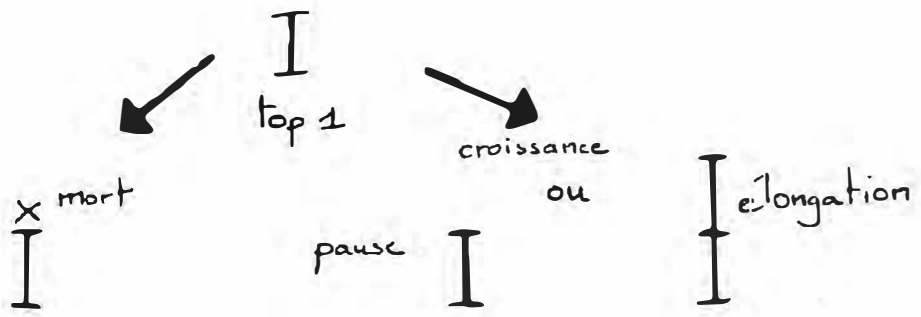
Dans le contexte botanique, l'élaboration des noeuds dans le méristème terminal s'effectue de manière périodique par le plastochrone; on peut donc généraliser ce principe en l'appliquant aux noeuds. Dans ce cas, le modèle ne sera pas controlé par les tops (le temps), mais par la formation des noeuds. Le modèle peut donc être approché par des entités géométriques (dont la primitive est le noeud) ou temporelles (dont la primitive est l'unité de croissance).

2.2.1.2 Mortalité

Définition : la mortalité est un principe fondamental s'exprimant sur un méristème terminal définissant son état: viable ou pas, à un top d'horloge donné.

Le processus de mortalité peut changer les caractéristiques du méristème; si, lors d'un top précis le méristème se trouve être non viable, celui-ci est dit mort et cet état est irréversible.

Le principe de mortalité est de plus, prioritaire sur les autres; on peut appliquer les principes de croissance ou (et) de ramification si et seulement si le méristème est viable.



Signification botanique.

Sous ce principe se rattache naturellement la mort du méristème terminal, terme masquant en fait plusieurs processus aboutissant à ce résultat, tels que:
- la transformation en fleur,
- la fin programmée d'un axe (dans ce cas le méristème terminal a une dimension maximale de vie; voir 2.2.3.1),
- l'accident, naturel ou provoqué (taille), ...

La mortalité, telle qu'elle est définie, se rattache à une unité de croissance, car elle est définie pour un top donné. Elle peut de plus être définie pour chaque noeud contenu dans l'unité de croissance pour modéliser des traumatismes fins, comme la destruction partielle de l'unité de croissance par des d'insectes ou d'oiseaux.

Remarque: l'état de mort d'un méristème n'est pas équivalent à un état de pause perpétuelle; ce qui se justifie botaniquement par le devenir de l'axe. En effet, dans le second cas, il restera vert et potentiellement actif, alors que dans le premier cas, il finira par tomber au bout d'un certain temps: on dit qu' il y a élagage.

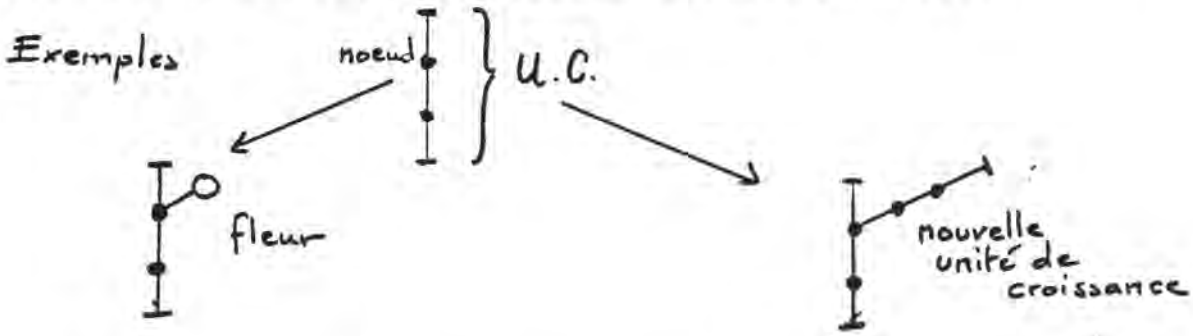
2.2.1.3 La ramification ou multiplication

Définition : la **ramification** ou encore multiplication est un principe fondamental s'exprimant à partir d'un méristème axillaire disposé sur un noeud et provoquant l'apparition d'un nouvel axe ou organe.

Ce principe, interne à l'unité de croissance, est foncièrement différent des 2 précédents car il ne s'applique pas à un méristème terminal mais à un méristème axillaire, et permet la création d'un nouveau bourgeon terminal ou d'un nouvel élément.

A ce titre tout noeud dispose d'autant de méristèmes axillaires qu'on le désire. Chacun de ces bourgeons peut ramifier en fonction de l'ordre, la dimension, la position du noeud dans l'unité de croissance, la nature du méristème:

- classique: il permet l'élaboration d'un axe d'ordre supérieur
- de réitération: il permet l'élaboration d'une réitération,
- structurel: il permet l'élaboration de tout autre objet, botanique ou non, tel que des feuilles, fleurs, palmes...



Les différentes natures de méristèmes sont nécessaires car:

- on ne sait pas modéliser les métamorphoses d'un bourgeon telle que la transformation d'un axe quelconque en axe réitéré,
- la définition (et la présence) des feuilles n'entre pas dans la définition de l'unité de croissance, de plus, certains organes sont suffisamment complexes pour être modélisés comme des plantes à part entière (cas des palmes, voir chapitre II, 1.3).

Dans le contexte botanique seules 2 natures de méristèmes sont concernées, les autres étant denuées de sens: les méristèmes axillaires pouvant être à l'origine d'axes et de réitérations et les méristèmes floraux (fleurs puis fruits).

2.2.2 EXEMPLE DE GENERALISATION

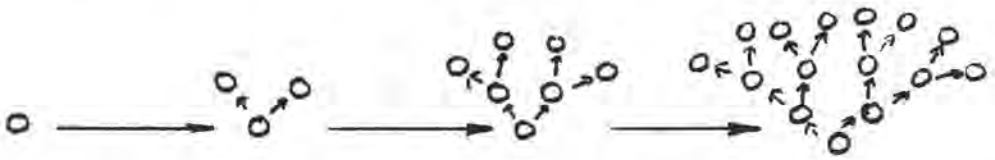
Si l'on considère les 3 principes fondamentaux en dehors du contexte botanique, on peut étendre le domaine d'application à d'autres phénomènes évoluant dans l'espace à partir d'un point fixé (ou source). (REF80)

A titre d'exemple, on peut s'intéresser aux phénomènes engendrés par les principes de mort et ramification seulement. Selon leur importance et indépendance, l'application de ces deux principes fera apparaître des systèmes à topologies fort diverses:

a) il y a multiplication et pas de mort

c'est la réaction en chaîne, à chaque top d'horloge, on assiste, chaque fois que cela est possible, à l'apparition de nouveaux éléments;

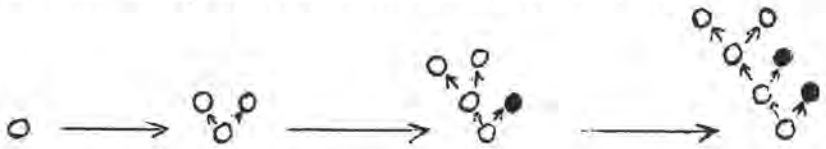
o → o : multiplication



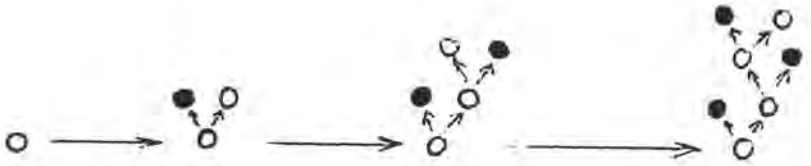
b) il y a multiplication et mort corrélées

la réaction en chaîne est partiellement stoppée (I), elle est typique du développement d'une jeune colonie bactérienne; le contrôle devient total (II) si, à chaque top, on a pour chaque noeud terminal, un unique élément ramifié viable.

(I)



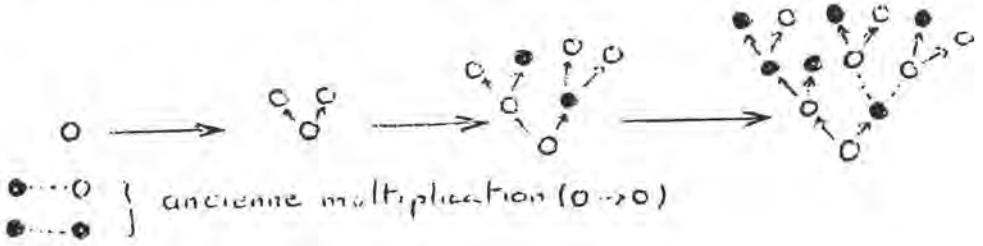
(II)



● : mort

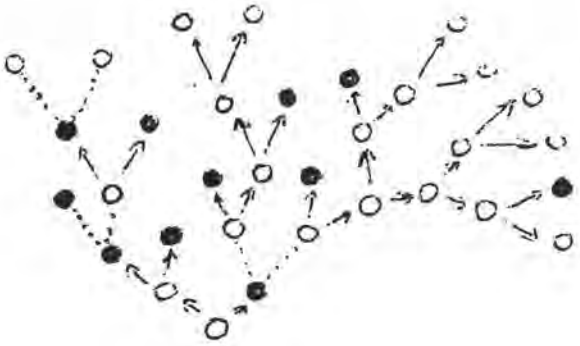
c) multiplication et mort apparaissent indépendamment

on obtient dans ce cas un ensemble de colonies dont la viabilité est fonction du rapport des 2 principes.



d) cas général

on obtient généralement une structure où l'on pourra localement mettre en évidence l'un des cas précédents; ce mode de développement caractérise les rhizomes (structure souterraine de nombreuses herbes).



On peut de même s'intéresser au cas où seules la croissance et la multiplication sont prises en compte, et l'on retrouverait des structures proches des réseaux cristallins.

L'exemple ci-dessus nous montre une caractéristique que nous exploiterons (plus loin en 2.2.3): la topologie des phénomènes générés dépend essentiellement des relations que l'on peut établir entre les trois principes.

Remarque:

D'autres possibilités de généralisation existent; comme le souligne P. Lienhardt, ce modèle est linéaire (LIE87). On peut développer des modèles surfaciques (LIE87 et LIF87) voire volumiques, où les éléments atomiques ne sont pas des portions d'axes mais des portions de surfaces, voire des portions de volumes.

2.2.3 RELATIONS ENTRE LES PRINCIPES : EXEMPLES

De nombreuses relations entre les 3 principes en fonction de l'ordre, la dimension, le temps,... sont possibles. Nous verrons ici quelques cas significatifs et très usités.

2.2.3.1 Détermination de la dimension d'un axe

a) Cas général

La dimension DIM(axi) d'un axe d'ordre i est facile à déterminer, c'est le nombre de tops necessaires à sa réalisation, c'est à dire la différence entre l'âge de la plante AGET, et l'âge d'apparition AGE(ni) du premier noeud de cet axe.

DIM(axi) = AGET - AGE(ni)

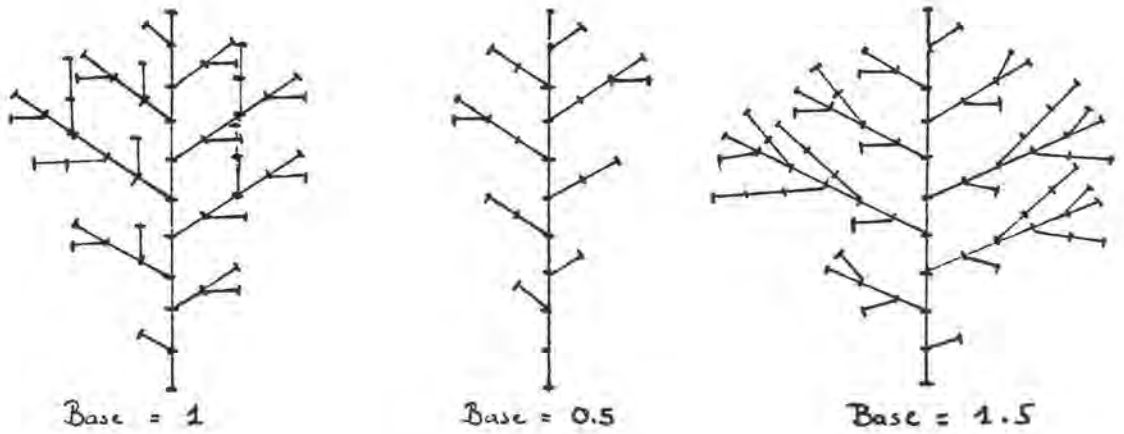
axi : axe issu du noeud ni

b) L'effet de base

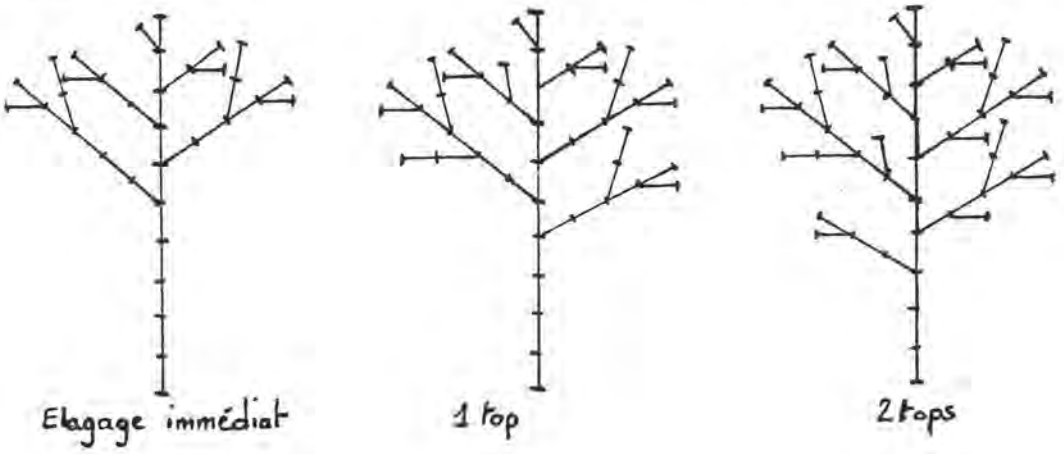
L'effet de base est une contrainte topologique se traduisant par la limitation de la dimension de tout axe d'ordre i > 1 en fonction de la dimension du noeud d'ordre i-1 noté nip dont il est issu. Cette limitation ne peut donc intervenir que lorsqu'il y a ramification. Si l'on note la dite fonction BASE, cette contrainte définira une dimension maximale DIMAX(axi):

DIMAX(axi) = Minimum (DIM(axi),BASE(AGE(ni)-AGE(nip)))

En pratique la fonction BASE est ramenée à une multiplication par une constante.

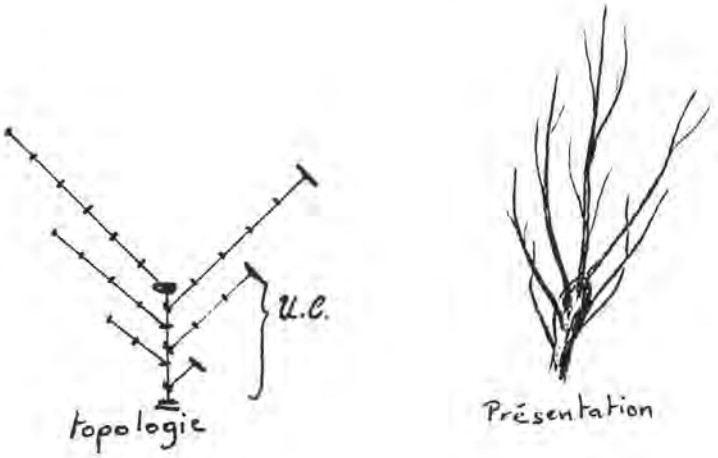


Le principe de ramification contrôle donc ici celui de mort; ce qui permet de changer considérablement la topologie du végétal. L'ajout de l'élagage (chute des axes) en fonction d'un retard de 0, 1 ou 2 tops d'horloge permet en sus d'autres combinaisons.



c) Effet de base sur UC

l'effet de base sur l'unité de croissance (UC) est également une contrainte topologique. Elle définit une limitation de dimension pour un ensemble d'axes issus par ramification de la même unité de croissance; cette limitation est indexée sur le rang de chaque noeud dans l'unité de croissance. En pratique, ceci revient à privilégier certains axes, ce qui est conforme à la réalité botanique et que l'on connaît sous le nom de "dominance".



2.2.3.2 La croissance sympodiale

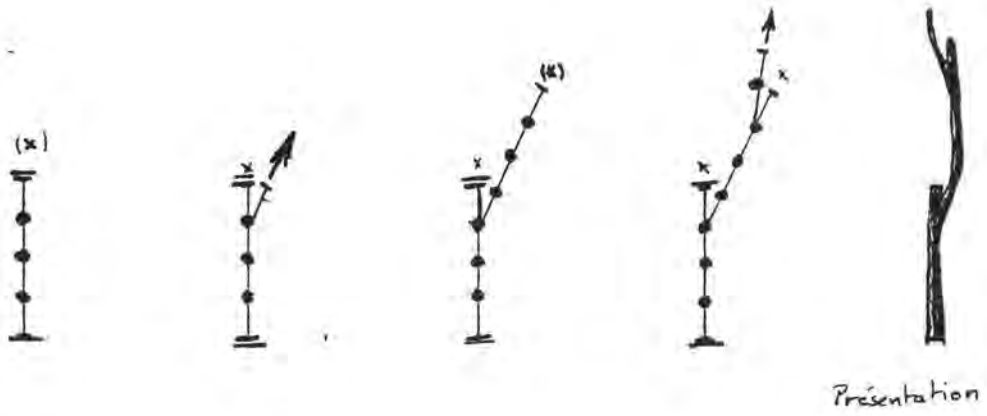
La croissance sympodiale est un mode d'élaboration d'axes faisant intervenir une combinaison des 3 principes. La constitution d'un tel axe s'opère en 3 phases:

a) fabrication d'un certain nombre d'unités de croissance, par croissance,

b) mort du méristème terminal,

c) ramification à partir d'un noeud situé sous le méristème terminal; le nouvel axe ayant les mêmes caractéristiques morphologiques que le précédant.

Le même processus s'engage alors sur le nouvel axe formé, comme si l'axe entier progressait par une succession de réitérations traumatiques.



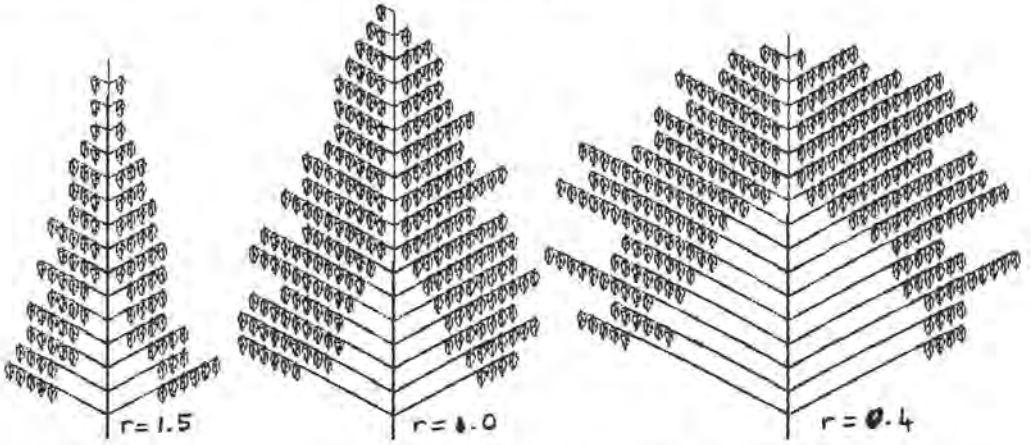
2.2.4 EXPRESSION DES PRINCIPES TOPOLOGIQUES

2.2.4.1 Rapport de rythme

Nous avons vu que la topologie de l'architecture d'un végétal se décrit par les 3 principes régissant l'activité des méristèmes. Ces principes sont définis pour des tops d'horloge définis pour chaque axe formé. Or, tous les axes d'un même ordre ont les mêmes caractères morphologiques (voir 1.2.2.4), donc même cycle de l'unité de morphogénèse, donc même horloge. Ce n'est plus le cas pour des ordres différents pour de nombreuses espèces annuelles et tropicales, chaque ordre possède son horloge.

Définition: On appelle **rapport de rythme** d'un ordre le rapport formé par l'intervalle d'horloge séparant deux tops consécutifs de cet ordre sur l'intervalle d'horloge de l'ordre 1.

Le rapport inverse détermine donc la vitesse relative de l'élaboration des axes d'un ordre donné.



(r représente le rapport de rythme des axes d'ordre 2).

Remarques:

- l'horloge étant constante sur chaque ordre, le rapport de rythme est constant. On peut néanmoins simuler des variations relatives d'horloge soit en utilisant des rapports de rythmes non constants, soit en utilisant le principe de croissance. Ce dernier cas est illustré ci-dessus, où les axes d'ordre 2 subissent des pauses de plus en plus longues; leur croissance est alors appelée une **croissance amortie**.

- seuls les rapports de rythmes interviennent dans la modélisation, ce qui permet de ne considérer que les périodes d'activité des méristèmes (printemps et étés, par exemple).

2.2.4.2 Expression mathématique des principes

On peut exprimer les principes topologiques de diverses manières.

L'utilisation de grammaires, suggérée par les croquis et familière en informatique, n'a cependant pas été retenue pour les raisons suivantes:

- le modèle manipule des concepts très proches de la réalité physique des végétaux, il doit donc intégrer des fonctions concrètes, proches de mesures faites sur le terrain; ceci est d'autant plus vrai que la modélisation est précise, et notamment dans le contexte agronomique,
- on veut également pouvoir représenter et contrôler la variabilité à l'intérieur d'une même espèce, il faut donc une part d'aléatoire dans la simulation,
- l'alphabet ainsi que les productions nécessaires à la simulation d'une plante particulière seront lourds et complexes car les principes sont dépendants de l'ordre, la dimension, la nature, la position,.... des méristèmes; c'est un travail qui reste à faire.

Nous avons, de ce fait, gardé l'expression probabiliste des principes de Ph. de Reffye. Chaque principe suit donc une loi de probabilité que l'on peut définir sur le terrain à partir de mesures simples (comptage d'entre-noeuds, de feuilles,...) et d'outils classiques en probabilité et statistique: analyse de variance, test du X2, test du maximum de vraisemblance, etc. On trouve (**REF79**, **CRJ87**) des lois uniformes, amorties.

La variabilité inter-espèce peut ensuite être rendue lors de la simulation grâce a des techniques dites "de Monte-Carlo".

Le principe en est simple: l'activité d'un méristème se définit par la confrontation des lois probabilistes décrivant les principes topologiques avec un ou plusieurs nombres aléatoires. Selon le résultat de ces confrontations, divers processus pourront s'enclencher: mort, pause, élongation...

Le modèle topologique que nous avons décrit est donc un modèle stochastique.

2.3 GÉOMÉTRIE : IMPORTANCE DES GRADIENTS PHYSIQUES

De nombreux paramètres géométriques interviennent dans l'architecture du végétal, certains sont simples à mettre en évidence (phyllotaxie), d'autres nécessitent une modélisation poussée (équilibre élastique de la plante). Peu d'auteurs ont développé ce dernier point; **Aono** et **Kunii** (**AOK84**) utilisent des "attracteurs et inhibiteurs" définis empiriquement et **B. Reeves** (**REE85**) modélise la courbure d'herbes par des paraboles. Comme nous le verrons la modélisation de l'effet de la pesanteur est particulièrement détaillée dans notre approche; elle s'inspire des résultats de la résistance des matériaux en physique (**COU70**).

Les gradients physiques jouent un rôle prépondérant dans l'expression de ces paramètres; c'est pourquoi nous détaillerons les principaux effets dûs à la pesanteur qui induit :

- l'équilibre, la flexion, le flambage des axes,
- la distribution spatiale des axes,
- des combinaisons avec d'autres gradients (vent,pluie,...).

D'autres grandeurs géométriques seront ensuite détaillées, telles que les épaisseurs et longueurs des axes.

Enfin, nous mettrons l'accent sur un point particulier et difficile, la corrélation entre la géométrie et la topologie de l'architecture d'un végétal, en l'illustrant par un cas particulier.

2.3.1 EFFETS DÛS A LA PESANTEUR

2.3.1.1 Flèche et résistance des matériaux

La modélisation de l'effet de la pesanteur et de l'équilibre de la structure architecturale est une tâche très complexe. Lorsque les végétaux ont, comme le caféier, une architecture simple, on peut obtenir une modélisation complète de l'équilibre de la plante, mais, dans la majeure partie des cas, il faut se contenter de décrire le phénomène sur chaque axe séparement.

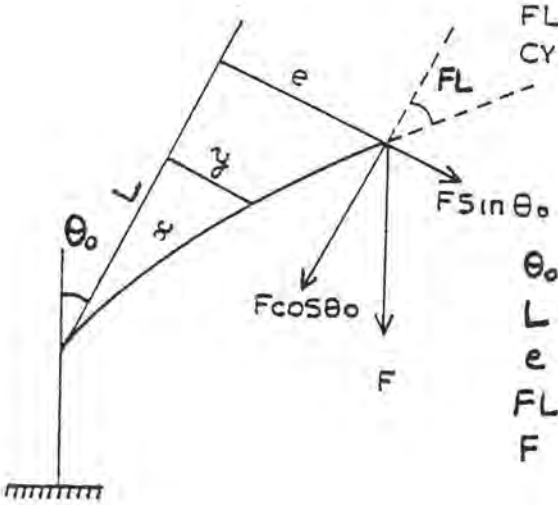
On utilise, pour cela, les méthodes classiques en résistance des matériaux et principalement les concepts de flexions faibles et fortes sur des poutres cylindriques encastrées. On montre ainsi (REF79) que pour une poutre de longueur L, de rayon R, un coefficient d'élasticité Y, une force appliquée F, on obtient un angle de flèche FL tel que:

$$L = K \int_{\theta_0}^{FL} \frac{d\theta}{\left(\cos(\theta+\theta_0) - \cos(FL+\theta_0)\right)^{1/2}} \qquad K = \sqrt{\frac{YI}{2F}}$$

avec

$$I = \frac{\pi R^4}{4}$$

FLEXION D'UNE BARRE CYLINDRIQUE ENCASTRÉE



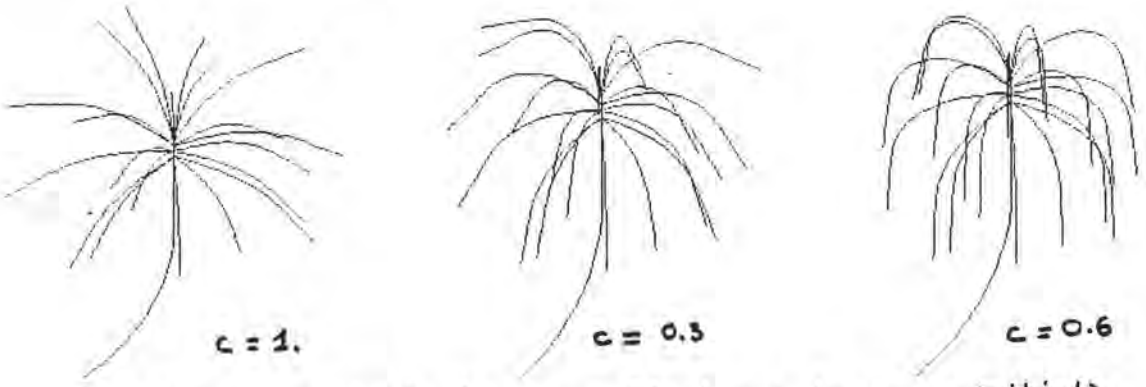
θ_0 : angle d'insertion
L : longueur de la barre
e : flèche
FL : angle flèche
F : force de flexion

Pour une flèche FL donnée sur un axe de longueur L, l'angle Fi appliqué pour chaque portion d'axe i de longueur l vaut :

$$Fi = (1/K) * (\cos(O_i + O_0) - \cos(FL + O_0))^{0.5}$$

L'effet de la variation de diamètre (la conicité) peut également être prise en compte (REF76).

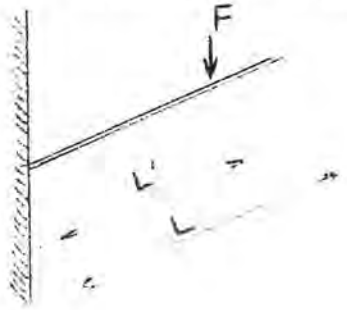
Dans ce cas la variable K, dépendante du rayon n'est plus constante. Ceci revient à déterminer la flèche d'une poutre conique. La simulation s'effectue en discrétisant l'axe en portions de rayon constant. Exemple:

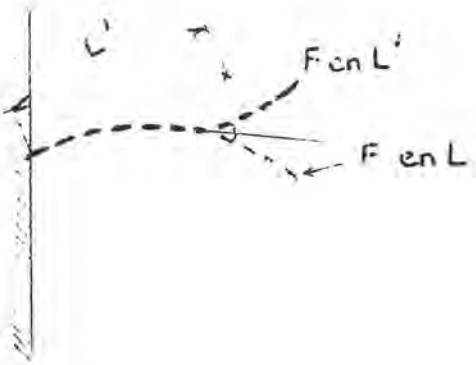


(c : rapport du rayon final sur le rayon initial)

D'autres phénomènes peuvent être facilement simulés comme le déplacement du point d'application de la force F.

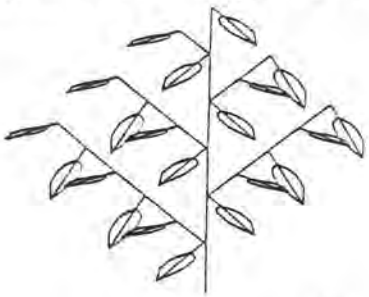
Dans le cas (général), où la force F ne s'applique pas en bout d'axe (en L) mais en L', on peut considérer que la flèche FL reste inchangée mais que les angles Fi changent de signe dès que la portion d'axe i se trouve en L': il y a redressement, ce qui se vérifie bien en pratique.



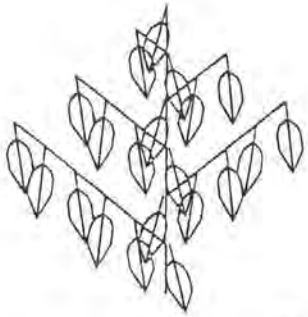


Le fléchissement est un moyen rapide (mais purement physionomiste) de simuler la flexion; il s'exprime seulement en fonction de l'angle d'encastrement ANG et d'un angle de fléchissement maximal FLMAX:

FLEC = FLMAX * (1. + COS(ANG))



45°



90°

Note: on remarque que la modélisation de l'effet de la pesanteur sur un axe nécessite:

- de définir la longueur de la branche pour calculer la flèche,
- d'appliquer à chaque portion d'axe un angle que l'on détermine en fonction de la flèche.

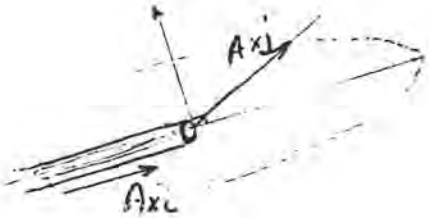
Ces deux conditions peuvent se montrer contradictoires si l'on construit l'axe petit à petit.

2.3.1.2 Disposition des axes. Orthotropie et plagiotropie

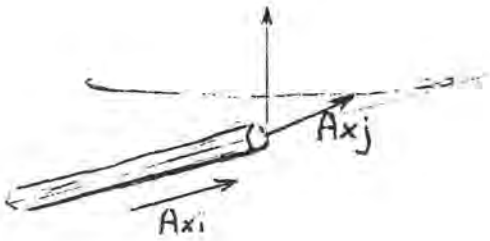
Dès leur apparition, les axes ont une tendance soit orthotrope soit plagiotrope. Dans le premier cas leur direction de croissance est opposée à la pesanteur, dans le deuxième cas orthogonale à celle-ci (voir 1.2.2.3).

On construit un axe orthotrope Axj à partir d'un axe Axi en faisant tourner Axi autour d'un vecteur orthogonal à Axi (I). On obtient de même un axe plagiotrope en faisant tourner Axi autour d'un axe vertical (II). L'angle défini entre les deux axes est appelé **angle d'insertion.**

(I)



(II)



L'angle d'insertion se définit à partir d'une ramification. Il n'a pas une valeur constante pour tout le végétal. Il est spécifique à la nature du méristème axillaire et donc au phénomène qu'il provoque:

- l'apparition d'un axe d'ordre k sur un axe d'ordre k-1,chaque ordre ayant un angle qui lui est propre,
- la réitération traumatique,
- la réitération adaptative,
- l'apparition d'une fleur (donc d'un fruit).

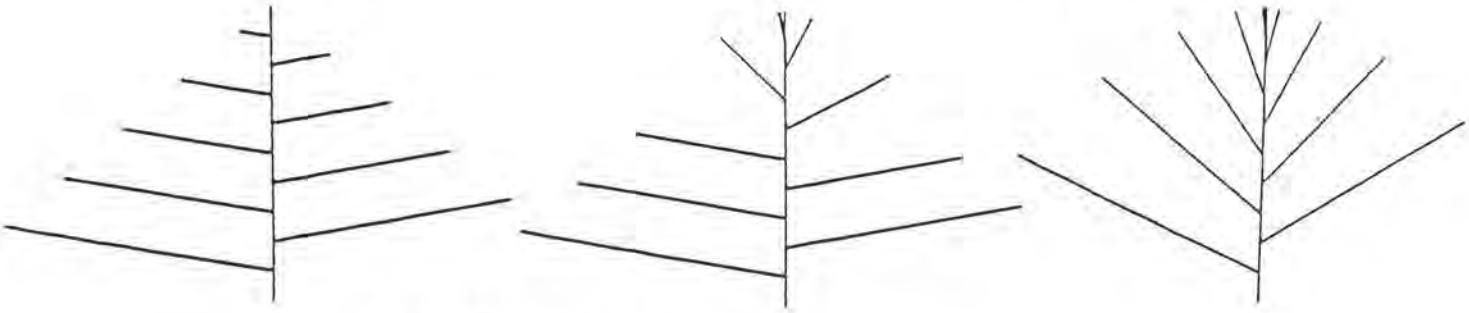
La tendance de développement est naturellement plus accentuée sur les axes jeunes et en bout d'axe; elle peut également être plus spécifique avec un redressement très accentué (comme chez le Pin) ou, au contraire une tendance très plagiotrope (chez le Cèdre). Ces cas peuvent facilement se modéliser selon le même principe par la définition:

- d'une zone (définie en nombre d'unités de croissance) dans laquelle le caractère de tendance géométrique sera "lissé",
- de l'angle final par rapport à l'horizontale, caractéristique.

Exemple 1: Variation de l'angle d'insertion

angle final: 10°

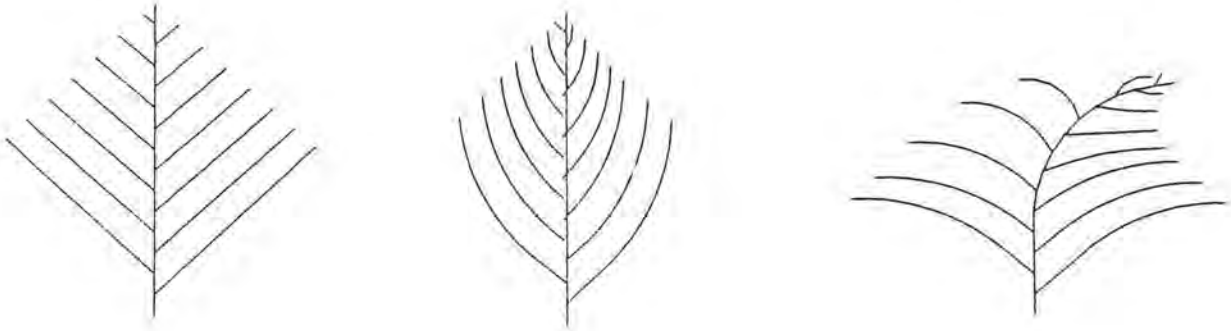
zone: 0 zone: 5 zone: 10



Exemple 2: Redressement

angle final: 90° angle final: 0°

zone: 0 zone: 10 zone: 10

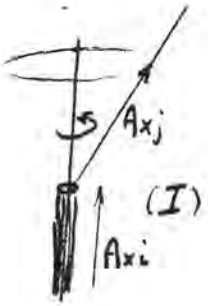


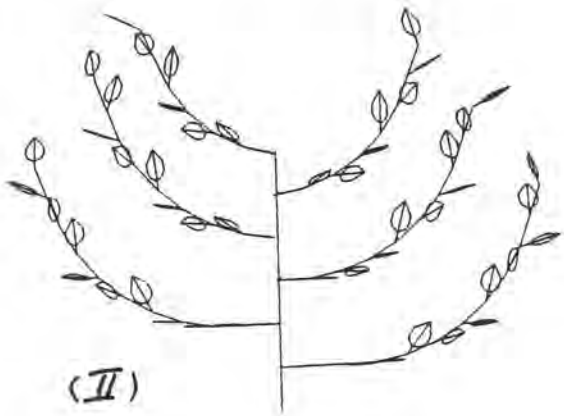
Phyllotaxie:

Nous utilisons une règle de phyllotaxie simple correspondant à un angle constant d'insertion des feuilles autour d'un axe. Pour modéliser l'effet de la phyllotaxie, il suffit alors de faire tourner chaque axe Axj d'un angle constant autour de Axi (Fig. I). Dans le cas plagiotrope, il n'y a rien à faire, l'axe est bien positionné par son insertion.

Pour bien représenter des axes mixtes, la phyllotaxie doit être spiralée dans les parties orthotropes et distique dans les parties plagiotropes. Dans ce cas, nommé **pseudoplagiotropie** (Fig. II) si l'on note PHYL l'angle de phyllotaxie, ANG l'angle que fait l'axe Axi avec le plan horizontal, l'angle autour de Axi sera:

Arctan (Tan(PHYL)*Sinus(ANG)) + pi/2 si **ANG > 0**
et **0** sinon.





Type d'insertion

On appelle type d'insertion d'un axe (ou d'un autre élément), l'ensemble des caractères définissant la nature géométrique de son insertion sur l'axe porteur. Ces caractères sont:

- la tendance générale de développement (orthotropie/plagiotropie)
- le comportement en axe mixte (pseudoplagiotropie)
- une caractérisation générale des angles d'insertion et de phyllotaxie (courant, aléatoire, fixe...)

(voir le détail au chapitre II en 3.2.1)

2.3.1.3 Extension à d'autres gradients physiques

On peut, à loisir, voir l'effet d'autres gradients physiques, tels que le vent, la lumière,... La modélisation de ces phénomènes est cependant longue et difficile, car ces gradients modifient non seulement la géométrie du végétal mais également sa topologie (voir 2.3.3).

Deux applications seules ont été développées sur un point purement physionomique; le vent et la torsion.

a) effet du vent

L'effet est ici purement physionomique; des études en cours (voir Chap. IV, 1.1.1) développent ce point. La direction du vent est définie pour l'instant par un vecteur VENT et son intensité par la norme de VENT (comprise entre 0 et 10).

La direction de développement V d'un élément est modifiée comme suit:

$$V_{vent} = V + C1*VENT/(\text{âge de l'élément}) + C2*VENT$$

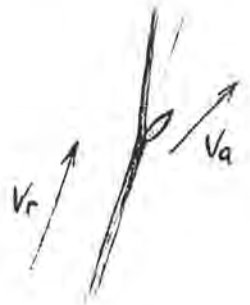
C1 et C2 sont 2 coefficients constants sauf dans le cas où les éléments sont des feuilles ou organes sexués; la valeur de C2 est alors choisie aléatoirement.

b) torsion

Dans ce cas, ce sont les axes eux-mêmes qui définissent le gradient physique. Les jeunes rameaux porteurs de bourgeons subissent une "contre poussée" due à la présence des méristèmes axilaires et feuilles. L'effet est facile à rendre par simple somme vectorielle; il n'est cependant utile que sur les portions d'axe jeunes.

Ct: coefficient de torsion (0. à 1.)
Vr: direction du rameau porteur
Va: direction du méristème axillaire

$$Vr_{torsion} = Ct * Va + Vr$$

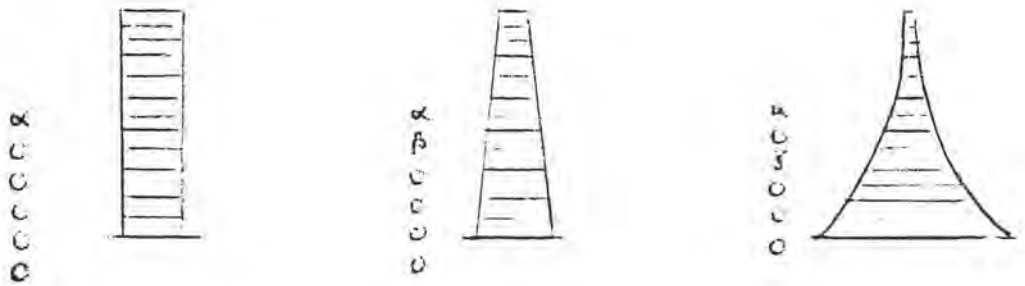


2.3.2 LONGUEUR ET ÉPAISSEUR DES AXES

Longueur: la longueur d'un axe est fonction du nombre d'unités de croissance le constituant. Chaque entre-noeud a, pour un ordre donné et pour une position définie dans l'unité de croissance, une longueur que l'on peut supposer fixe. On pose de même que tous les entrenoeuds d'une unité de croissance courte (voir 1.2.2.4) ont la même longueur pour tout le végétal.

Épaisseur: devant la multiplicité des cas, tant dans la nature que dans la littérature, il a été impossible de formuler pour l'instant un modèle simple de croissance en épaisseur. Nous décrivons l'activité cambiale avec 6 coefficients qui sont:
- constant (rayon du méristème terminal d'un axe d'ordre 1),
- linéaire (accroissement fonction de l'âge),
- quadratique (" " du carré de l'âge),
- de taille (bourrelets consécutifs à une taille),
- de ramification (rapport entre 2 ordres consécutifs),
- de réitération (rapport entre 2 réitérations successives).

Exemples



2.3.3 CORRÉLATIONS ENTRE LA GÉOMÉTRIE ET LA TOPOLOGIE

Si, de manière évidente, la topologie détermine un bon nombre de paramètres géométriques, dans certains cas, ce sont des critères géométriques qui fixent l'évolution de la topologie de l'architecture du végétal. Il suffit que le végétal se développe dans un milieu comportant des gradients physiques distribués de manière non homogène, comme le vent, la lumière, des obstacles; on verra alors apparaître des **tropismes** cherchant soit à exploiter, soit à éviter les champs de ces gradients.

Pour la modélisation de tels phénomènes, la principale difficulté réside dans la définition de ces champs, surtout s'ils sont dépendants du végétal lui-même: gêne entre branches, influence de l'ombre de l'arbre sur lui-même, ... De telles études sont en cours à l'INRA (AMR87 sur la lumière) et au CIRAD sur la gêne.

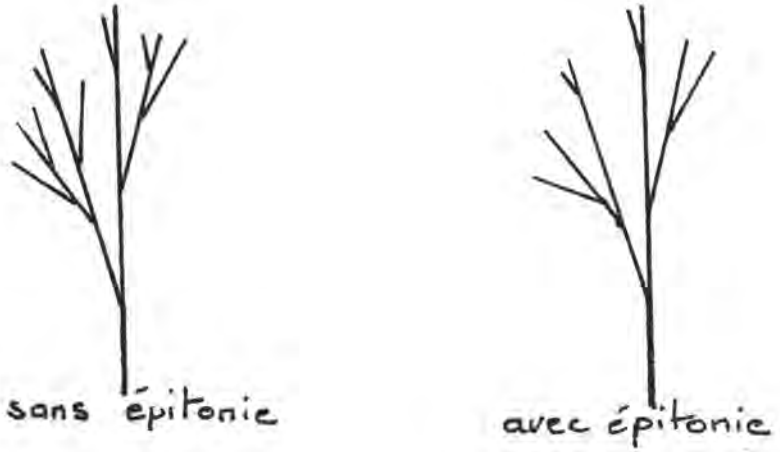
Deux cas simples ont cependant été traités:

a) la présence d'obstacles simples

on compare dans ce cas, les coordonnées du méristème en cours d'évolution à un ou plusieurs plans représentant ainsi l'obstacle, la viabilité du méristème est alors fonction du résultat de cette confrontation.

b) le phénomène d'**épitonie**

l'épitonie est un processus permettant un développement optimal de l'architecture du végétal; il consiste à privilégier les axes extérieurs. Le gradient est donc ici la direction des axes principaux, la viabilité du méristème est cette fois dépendante de la confrontation des directions de développement.



3. CONCLUSION

L'architecture d'une plante, structure de son corps, est le résultat de l'activité de ses bourgeons (élagage mis à part). Cette structure, constituée d'axes, est évolutive au cours du temps: elle croît et se ramifie de manière irréversible et organisée.

La croissance est un phénomène discret s'opérant sur les extrémités de la structure matérialisés par les méristèmes terminaux. Ceux-ci forment régulièrement des portions d'axes jeunes qui n'évolueront plus.

La ramification est également un phénomène discret qui permet d'accroître le nombre d'axes; elle s'opère dans des zones privilégiées de la structure, conformément à des modèles architecturaux, et, lorsque la plante a atteint un degré de maturation suffisant, conformément à des stratégies de répétitions. Le degré de ramification détermine pour chaque axe des caractéristiques topologiques et géométriques distinctes, on peut, par exemple, ainsi avoir des troncs orthotropes (verticaux) et les axes issus de celui-ci plagiotropes (horizontaux).

La modélisation de l'élaboration de cette structure est formulée de manière stochastique par la définition au niveau topologique de 3 principes: la croissance, la mortalité et la ramification. La mortalité permet non seulement de modéliser des accidents dans l'architecture du végétal, mais également de gérer les autres principes dans l'organisation du développement.

La géométrie du végétal, outre ses caractères habituels (angles, épaisseurs,...) fait appel à la théorie physique de la résistance des matériaux pour modéliser les courbures des branches, les redressements, flambages... Elle peut également influer sur le développement topologique de la structure du végétal par des phénomènes tel que celui de la gêne. L'effet de rétroaction de la géométrie sur la topologie est un point important qui reste cependant encore à développer.

Le modèle mathématique est suffisant pour simuler par programme la croissance d'une plante particulière; la généralisation au règne végétal nécessite le respect de la modélisation botanique. Nous verrons, dans le chapitre suivant, comment s'expriment ces deux modélisations complémentaires pour permettre la représentation et la simulation de croissance des végétaux sur un calculateur.

CHAPITRE II

SIMULATION DE CROISSANCE DE L'ARCHITECTURE DES VÉGÉTAUX

REMARQUE GÉNÉRALE

La simulation utilise presque tous les concepts décrits dans le chapitre précédent. Aussi ne redéfinirons-nous pas les termes utilisés ici et définis dans la modélisation botanique et mathématique.

1. CHOIX D'UNE MÉTHODE DE SIMULATION

1.1. TRADUCTION DE LA MODÉLISATION

Deux approches sont possibles compte tenu du chapitre précédent. En effet, la traduction peut s'appuyer sur l'une ou l'autre des modélisations, par une approche qui, dans un cas sera conceptuelle, et, dans l'autre, procédurale.

Une approche conceptuelle permettrait de définir un végétal et sa dynamique de croissance à partir de la modélisation botanique, sans nécessairement définir le détail. Elle devrait permettre de manipuler des concepts de haut niveau. Dans ce cas, la géométrie n'interviendrait que dans la définition du détail car elle ne s'applique qu'aux entités axes et noeuds.

Un végétal se construira donc par la définition des complexes réitérés le constituant; on décrira ensuite un complexe réitéré par le diagramme architectural; à partir de celui-ci on déterminera les caractères de chaque axe d'ordre donné; la notion d'axe sera ensuite élaborée par la définition des unités de croissance le constituant; enfin, on décrira l'unité de croissance par les noeuds et entrenoeuds.

Une approche procédurale, au contraire, décrirait la plante à partir de la modélisation stochastique, donc par le détail. Élaborée à partir des principes de mortalité, croissance et ramification sur chaque noeud, la simulation serait alors controlée pas à pas par les concepts botaniques de plus haut niveau.

Dans ce cas, le végétal se construira à partir de la définition de l'activité des noeuds; ceux-ci seront ensuite organisés en unités de croissance; une succession d'unités de croissance définira un axe; l'organisation des axes créera un système ramifié respectant le diagramme architectural; celui-ci pourra ensuite être dupliqué formant ainsi un ensemble de complexes réitérés.

Nous avons retenu pour l'instant l'approche procédurale pour des raisons historiques, de transportabilité, de programmation et en vue d'incorporation du logiciel dans d'autres contextes de simulation. Le facteur déterminant de ce choix reste cependant le manque de précision des concepts botaniques de très haut niveau (stratégie de la réitération, équilibre général de la plante). La méthode procédurale, bien que lourde, permet un contrôle des concepts au fur et à mesure qu'ils sont pris en compte dans la simulation; elle permet de modifier plus facilement les concepts de haut niveau.

Nous avons donc choisi une approche procédurale de la simulation, c'est à dire constructive, dont les primitives sont des processus intervenant sur un noeud. Dans la majorité des cas c'est un ensemble de noeuds formant un système ramifié qu'il faut gérer tant sur le plan topologique que géométrique. Il va de soi que la structure sous-jacente à l'organisation de ces noeuds pour la simulation est un arbre au sens informatique du terme. Cette structure arborescente évolue, il est donc important de la définir.

1.2 DÉFINITION DE LA STRUCTURE ARBORESCENTE DE LA SIMULATION

1.2.1 IMPOSSIBILITÉ D'UNE RÉELLE SIMULATION

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'on peut déterminer le développement d'un végétal par l'activité de ses méristèmes. Ceux-ci évoluent de manière organisée, corrélée et non séquentielle. En effet, dans le cas général, de nombreux processus interviennent en même temps sur de nombreux noeuds.

Pour réaliser une simulation de croissance calquée sur l'évolution naturelle, il faudrait traiter tous les noeuds en parrallèle. L'idéal serait de disposer d'une machine parallèle MIMD ou chaque processeur simulerait l'activité d'un noeud. Cela est utopique pour le moment, au vu du nombre de processeurs nécessaires pour la simulation de la majorité des arbres (le nombre de noeuds pouvant atteindre le million ou plus).

Deux possibilités s'offrent alors:
- simuler le parallèlisme, en utilisant des outils classiques de la simulation tels que des échéanciers,
- générer le végétal, noeud par noeud, à un âge donné fixé par avance.

Nous ne détaillerons ici que la deuxième solution, la première étant en cours d'étude donc non encore opérationnelle. Nous ne simulerons donc pas la croissance d'un végétal au sens strict du terme, mais un représentant d'âge quelconque de ce végétal. Nous verrons par la suite que cette simulation permet néanmoins d'obtenir le même végétal à différents stades de son évolution; la réalisation d'animations est donc possible mais elle nécessite autant de simulations que d'étapes de croissance qui seront à visualiser dans la séquence animée.

Si, de plus, nous supposons que les caractères morphologiques et géométriques d'un noeud ne dépendent que des noeuds précédents, ce que nous admettrons(*), il ne devient plus nécessaire de gérer l'ensemble des noeuds décrivant un végétal, mais seulement la suite des noeuds ayant ramifié et décrivant le chemin de la graine au noeud que l'on traite. Autrement dit la gestion des noeuds peut se faire comme une simple gestion d'arbre (informatique) en mode préfixé. Ce type de gestion a donc été retenu car simple à manipuler et nécessitant peu de ressources en mémoire.

(*) Cette hypothèse valable à priori dans le cas général, est fausse dans certains contextes comme la sénescence ou à la suite de traumatisme violent. Nous n'avons malheureusement pas encore de concept botanique suffisemment vaste pour décrire "l'équilibre" inhérent à l'architecture d'un végétal.

Nous verrons que cette implantation pose cependant un certain nombre de problèmes et ne permet pas de simuler certains phénomènes. A titre d'exemple, la gêne entre axes ne peut être simulée.

1.3. EXTENSIONS A PLUSIEURS ARCHITECTURES

Conformément à la modélisation botanique, les noeuds forment des unités de croissance, celles-ci définissant à leur tour des axes. Ces axes se développent suivant une organisation appelée structure.

Définition: on appelle **structure** ou **organe procédural** une organisation de noeuds, d'unités de croissance et d'axes respectant des caractères topologiques et géométriques constants pour un ordre donné.

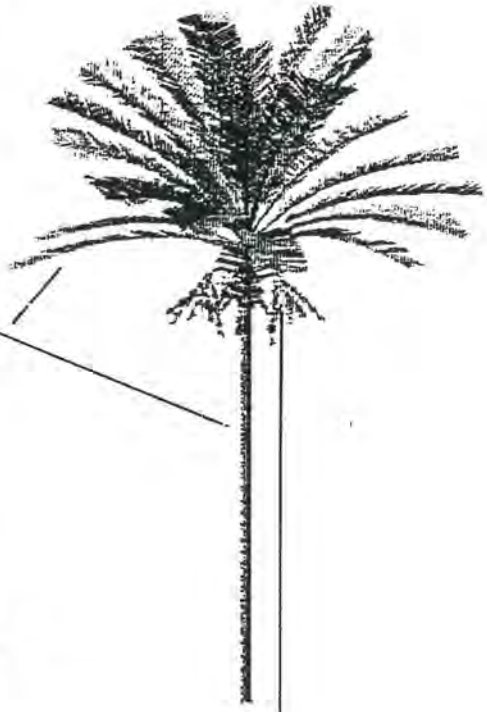
En d'autres termes, une structure traduit le diagramme architectural (voir modèlisation botanique 1.2.2.4) et les réitérations d'une architecture végétale.

Dans certains cas, nous utilisons plusieurs structures pour décrire un végétal. Ceci nous permet de décrire des éléments divers et variés dans un végétal. On peut ainsi décrire un palmier avec 4 structures distinctes:

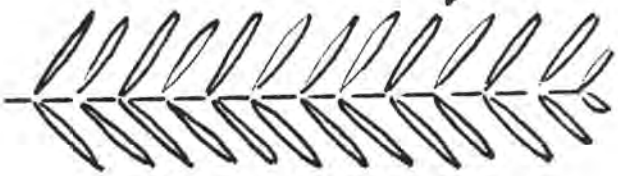
- la première décrivant la suite des noeuds proprement dite, c'est à dire l'unique axe le constituant: le tronc ou stipe;
- la deuxième décrivant une palme avec son rachis et ses folioles; la palme est alors considérée en soi comme un axe feuillé;
- la troisième décrivant l'architecture d'une inflorescence; rien n'empêche en effet de décrire le système ramifié que définit une inflorescence par les concepts de modélisation;
- la dernière décrivant une fleur de cette inflorescence; dans ce cas on considère que la fleur est un arbre formé d'un unique axe et portant des verticilles d'éléments divers comme les sépales, les pétales, le pistil, les étamines...

(voir figures pages suivantes)

structure 1: le stipe du palmier

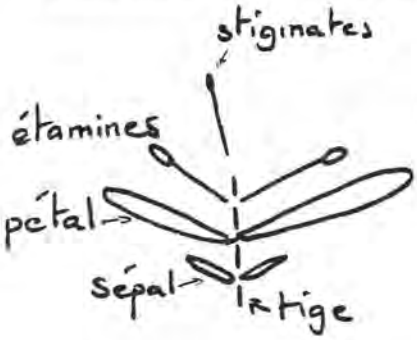


structure 2: la palme



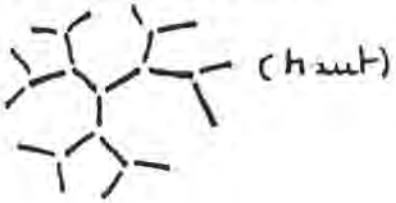
structure 3: l'inflorescence

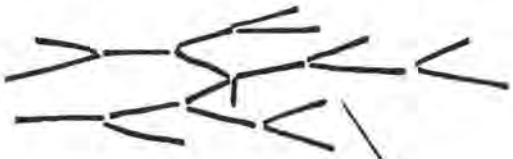
structure 4: la fleur



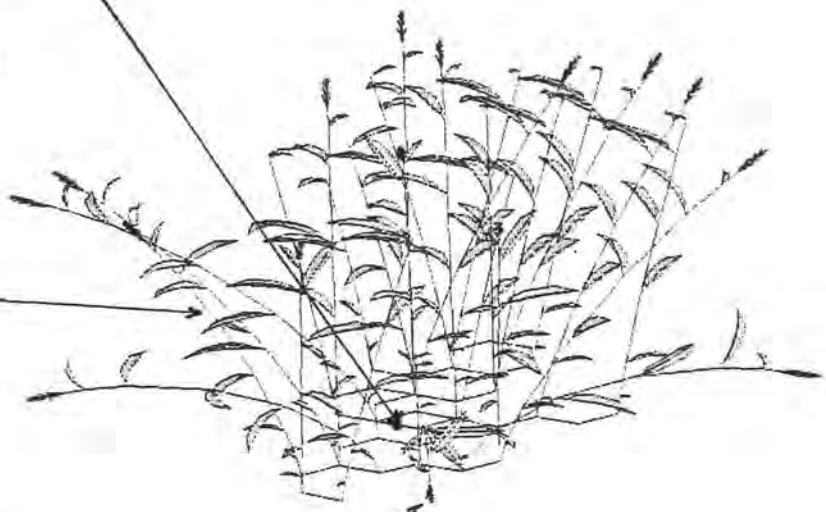
Nous décrivons de même les herbes avec plusieurs structures. L'une souterraine, le rhizome, à partir de laquelle se ramifieront d'autres comme les tiges.

structure 1: rhizome





structure 2: tige



structure 3: épis

Cette démarche n'est apparemment pas justifiée botaniquement car les organes (feuilles, fleurs) sont préfabriqués par les méristèmes donc générés en un top d'horloge à partir d'un noeud. Mais, comme nous l'avons vu au chapitre précédent (en 2.2.1.1) pour les unités de croissance, on peut considérer que les organes sont constitués également par des processus discrets plus fins comme celui de l'action du plastochrone dans l'élaboration des noeuds.

L'ordre préfixé nous permet de plus de définir une dimension (un âge) locale pour une structure; cette structure peut être développée hors de son contexte sauvegardant ainsi la cohérence du temps au niveau du **végétal**. Il est cependant indispensable de définir une nature botanique ou autre à chaque structure: elle peut représenter un ensemble d'axes (branches), une feuille, une fleur, un fruit ou d'autres objets comme une boule de verre d'un sapin de Noël.

Une telle approche possède cependant des limites. Seuls les objets à structure linéaire peuvent être générés ce qui exclue les limbes des feuilles; il faudrait incorporer à ce niveau de détail les travaux de **P. Lienhardt** (**LIE87**).

Dans la majorité des cas, il n'est cependant pas nécessaire de définir une structure complexe pour simuler la présence de feuilles ou de fleurs. On se contente de définir la topologie et la géométrie d'un unique noeud. Une telle structure, réduite à un unique noeud et entrenoeud est appelée **organe simple** ou encore un **organe fixe**. Un organe simple n'aura par conséquent pas de caractères topologiques particuliers si ce n'est sa nature et son âge, ses caractéristiques géométriques seront par contre plus importantes.

2. TOPOLOGIE: LE MOTEUR DE CROISSANCE

Nous allons ici décrire brièvement un moteur de croissance à vocation générale, que nous détaillerons ensuite dans le contexte botanique.

2.1. GÉNÉRALITÉS

2.1.1. Définition

On appelle **moteur de croissance** un algorithme ou programme décrivant l'évolution de la topologie d'un ensemble de noeuds issus d'un noeud fixe et organisés par les 3 principes fondamentaux que sont la mortalité, la croissance et la ramification.

C'est par analogie au moteur d'inférence que nous avons choisi le terme de "moteur de croissance". Il est en effet divisé en 2 fonctions spécifiques: d'une part le moteur proprement dit, ayant une fonction générale d'organisation, indépendant du domaine d'application, et, d'autre part, les lois ou règles, plus particulièrement spécifiques au contexte d'étude, décrivant les principes fondamentaux ainsi que les concepts de plus haut niveau.

Cette définition est volontairement vague afin de désigner sous le terme "moteur de croissance" diverses expressions de celui-ci, indépendamment du choix de description des principes fondamentaux (grammaires, probabilités...) et du choix de l'organisation des noeuds (structure arborescente préfixée, infixée...).

Nous ne décrirons cependant dans la suite de ce chapitre que des expressions relatives aux choix retenus en 1. dans la méthode de simulation. Signalons tout de même que d'autres traductions sont à l'étude (simulation en parallèle avec une structure arborescente définie par ordre).

2.1.2 Expression générale du moteur de croissance

2.1.2.1 Expression générale du moteur proprement dit

Le moteur proprement dit est indépendant du contexte d'étude, il traduit la gestion de la structure des noeuds. On retrouvera donc ici un algorithme proche d'un classique parcours d'arbre en ordre préfixé.

Le principe de cet algorithme repose pour chaque noeud sur des tests. On appelle test (de viabilité, de croissance...) la confrontation entre un nombre aléatoire et une probabilité définie par l'ensemble des règles qui décrivent le principe concerné (viabilité, croissance...). Chaque noeud subit en séquence les tests suivants:

- le test de viabilité,
- si le noeud est viable, le test de croissance,
- enfin si le noeud est viable et n'est pas en pause, des tests de ramifications.

Dans le cas ou il y a ramification, un nouveau noeud est créé et traité; dans le cas contraire, on traite le noeud suivant sur le même axe.

Diverses natures de ramifications peuvent être traitées; nous distinguons les cas suivants:

- le nouvel axe formé possède des caractéristiques topologiques et géométriques différentes de celui dont il est issu. Exemple: la ramification botanique classique.
- le nouvel axe formé possède les mêmes caractéristiques que celui dont il est issu. Exemple: la réitération traumatique.
- le nouvel axe possède les mêmes caractéristiques que celui issu de la graine. Exemple: la réitération adaptative.
- le nouvel axe est de nature distincte. Exemple: l'apparition d'une inflorescence, on change de structure.

La description suivante est itérative, elle utilise donc une gestion classique de pile initialisée par un premier noeud appelé graine. Elle s'inspire de l'expression d'une simulation classique du type "Monte-Carlo" (NAB66).

```
MOTEUR
  Empiler le premier noeud "la graine"
  Tant que (la pile n'est pas vide) faire
     mêmeaxe <- vrai
     on affecte le sommet de la pile au noeud courant
     Tant que (mêmeaxe) faire
        proba <- LOIS(viabilité)        //viabilité du noeud
        Si (rnd > proba) alors          //rnd: nombre aléatoire
            On dépile                   //le noeud est mort
            mêmeaxe <- faux
          sinon
            proba <- LOIS(croissance)  //élongation du noeud
            Si (rnd < proba) alors
                // tests de ramifications
                Pour (chaque nature de ramification) faire
                   proba <- LOIS (ramification,nature)
                   Si (rnd < proba) alors
                      On empile un nouveau noeud
                      mêmeaxe <- faux  //dû à l'ordre préfixé
                   Fin Si
                Fait
            Fin Si
        Fin Si
     Fait
  Fait
```

Remarques:

- Dans la simulation nous utilisons le principe de viabilité dual de celui de mortalité. Au niveau probabiliste, on a : probabilité de viabilité = 1 - probabilité de mortalité.
- Dans un contexte purement graphique et informatique, il est intéressant d'avoir une définition récursive du moteur de croissance. Celle-ci n'a pas été développée pour des raisons d'une part de convivialité afin de permettre l'intervention de non-informaticiens, et, d'autre part pour des raisons purement techniques (voir 4.).
- Le moteur génère des noeuds dans un ordre préfixé compte tenu du fait que l'on génère un objet d'âge donné, c'est à dire de dimension donnée et finie. Cette implantation nécessite donc le contrôle dans les lois de la dimension de chaque noeud, c'est à dire le contrôle du temps.

2.1.2.2. Expression générale des lois

Deux fonctions doivent être décrites dans les lois. L'une gère la dimension des noeuds en exploitant le principe de viabilité (c'est à dire de mortalité), l'autre décrit à partir des principes fondamentaux les règles spécifiques au contexte d'étude (botanique ou autre).

Nous décrivons ici le principe des lois que nous détaillerons plus loin dans le contexte botanique.

LOIS:
  Cas de la viabilité:
    On détermine l'âge et la dimension du noeud
    On détermine l'âge limite de développement du noeud
    Si (l'âge du noeud > l'âge limite) alors
            la probabilité de viabilité du noeud est nulle
        sinon
            la probabilité de viabilité du noeud est fonction
            des caractères topologiques et géométriques du noeud
    Fin Si
  Cas de la croissance:
  Cas de la ramification:
    Dans ces deux cas les probabilités sont fonction des
    caractères spécifiques des noeuds, en particulier de
    leur dimension, leur ordre...

Remarques:
- la détermination de l'âge limite de développement est une estimation; l'âge limite est toutefois borné par l'âge limite donné de la simulation.
- on peut simuler dans une certaine mesure l'élagage. Pour cela nous comparons dès l'apparition d'un noeud son âge limite de développement à l'âge limite de la simulation; on peut alors décider si l'ensemble des axes issus de ce noeud subira un élagage. Dans ce cas, on ne simulera pas le développement de cet ensemble en donnant une viabilité nulle au noeud dès son apparition. On peut également empêcher la ramification si la dimension du nouvel axe à former est supérieure à un seuil caractéristique de l'ordre de l'axe porteur. Cette opération simule un ébranchage.

2.1.3. Caractère général du moteur de croissance

Les descriptions données ci-dessus du moteur montrent de manière explicite l'indépendance du contexte d'étude dans l'expression du moteur proprement dit et, si l'on fait abstraction de la gestion de l'âge des noeuds (principalement liée au caractère préfixe de la simulation), les lois expriment les contraintes spécifiques au domaine d'étude; c'est donc leur précision qui définit la rigueur de la simulation.

La notion d'axe apparaît naturellement dans le moteur proprement dit, elle définit le résultat de l'activité d'un noeud terminal. Comme nous le verrons dans la suite d'autres concepts d'organisation des noeuds peuvent êtres définis au niveau des lois (unité de croissance par exemple).

2.2. APPLICATION DU MOTEUR DE CROISSANCE AUX VÉGÉTAUX

Nous allons maintenant décrire plus explicitement un moteur de croissance appliqué au contexte botanique. Nous détaillerons pour ce faire le moteur proprement dit, puis les principales lois qui permettront de simuler une palette végétale vaste et variée allant de la fougère aux arbres taillés en passant par des herbes, des palmiers, des arbres fruitiers...

2.2.1. Expression du moteur proprement dit

L'expression du moteur proprement dit diffère peu de celle du moteur général (voir 2.1.2.1). Pour des raisons d'optimisation en temps de calcul, la totalisation des noeuds traités et réalisés par unité de croissance et par axe ainsi que la définition de la nature et du nombre de noeuds par unité de croissance sont traités dans le moteur. Nous détaillerons l'aspect ramification, et décrirons les informations caractérisant un noeud.

```
MOTEUR
  Empiler le premier méristème "la graine"
  Tant que (la pile n'est pas vide) faire
     mêmeaxe <- vrai
     le méristème courant est défini par le sommet de la pile
     Tant que (mêmeaxe) faire
        Si (on est en début d'U.C) alors
            LOIS (unité de croissance) //détermine la nature
            de l'U.C. et le nombre de noeuds la constituant //
            nombre de tests subis dans l'U.C. <- 0
        Fin Si
        proba <- LOIS(viabilité)        //viabilité du méristème
        Si (rnd > proba ou si le noeud est marqué "mort") alors
            On dépile                   //le méristème est mort
            mêmeaxe <- faux
          sinon
            on incrémente:
                - le nombre de tests subis de l'axe
                - le nombre de tests subis dans l'U.C.
            proba <- LOIS(croissance) //élongation du méristème
            Si (rnd < proba) alors
                on incrémente le nbre de tests réalisés de l'axe
                on créé un entrenoeud supplémentaire
                    (réalisation géométrique)
                // test de ramifications
                Pour (chaque nature de ramification) faire
                   proba <- LOIS (ramification,nature)
                   Si (rnd < proba) alors
                      On empile un nouveau méristème en début
                      d'axe et en début d'UC.
                      mêmeaxe <- faux   //dû à l'ordre préfixé
                   Fin Si
                Fait
            Fin Si
        Fin Si
     Fait
  Fait
```

Remarques:
- le terme de test s'applique ici spécifiquement au test de croissance; il est dit réalisé s'il conduit à la formation d'un entrenoeud.
- le nombre de tests réalisés sur un axe est le nombre de noeuds, donc d'entrenoeuds réalisés sur cet axe.
- A l'intérieur d'une unité de croissance, il n'y a pas de pause (voir 2.2.2), il y a réalisation d'un entrenoeud si le noeud est viable.

Ramifications

Pour chaque nature de ramification, exceptée la réitération traumatique, on peut avoir des verticilles (plusieurs axes de même nature par noeud). Il faut donc tester la possibilité de ramification pour chaque élément du verticille. Chaque noeud peut de plus supporter plusieurs organes distincts fixes ou procéduraux.

Les diverses ramifications engendrent des noeuds de même nature, formant des entrenoeuds, exception faite de la ramification provoquant l'apparition d'un organe fixe. Seules les réitérations traumatiques et adaptatives proleptiques sont traitées ici.

```
RAMIFICATIONS:
//Réitération traumatique
    proba <- LOIS (réitération traumatique)
    Si (rnd < proba) alors
       Empiler un nouveau méristème de même structure et
                                    de même ordre
       Marquer le noeud porteur comme "mort"
    Fin Si

//Réitération adaptative
Pour (chaque noeud axillaire de réitération adaptative) faire
    proba <- LOIS (réitération adaptative)
    Si (rnd < proba) alors
       Empiler un nouveau méristème de même structure et
                                    d'ordre 1
    Fin Si
Fait
```

(Suite >>>)

```
//Ramification classique
Pour (chaque noeud axillaire de ramification classique) faire
    proba <- LOIS (ramification classique)
    Si (rnd < proba) alors
       Empiler un nouveau méristème de même structure et
                              d'ordre immédiatement supérieur
    Fin Si
Fait

//Organes
Pour (chaque organe de la structure) faire
    proba <- LOIS (ramification de structure)
    Si (rnd < proba) alors
       Si (c'est un organe procédural) alors
            Empiler un nouveau méristème de structure distincte
                                        et d'ordre 1
          sinon
            Empiler un nouveau méristème de même structure
                                          de même ordre
            Marquer la nature du nouveau méristème
       Fin Si
       Si (c'est une floraison terminale) alors
            Marquer le noeud porteur "mort"
       Fin Si
    Fin Si
Fait
```

Informations topologiques de chaque méristème:

Le moteur proprement dit n'utilise que peu d'informations topologiques; la majorité d'entre elles sont nécessaires à la définition des probabilités, d'autres, comme la portée en nombre de noeuds sont nécessaires à la géométrie (voir 3.)

Les informations de nature topologique à définir et à initialiser lors de l'apparition d'un nouveau méristème sont:

- un numéro de structure
- son ordre de réitération traumatique
- son ordre de réitération adaptative
- son ordre de ramification classique
- la dimension du méristème
- l'âge du méristème

- la portée en nombre d'U.C. de l'axe issu du méristème
- la portée en nombre de noeuds de l'axe issu du méristème
- le nombre d'U.C. realisées par le méristème
- la nature (courte ou longue) de la dernière U.C. testée
- le nombre de noeuds de la dernière U.C. testée
- le nombre de tests subis dans l'U.C.
- le nombre de tests subis de l'axe
- le nombre de tests réalisés de l'axe
- la nature du méristème (terminal, floral, ou "feuille")
- le rang dans le verticille
- le prédécesseur (c'est le noeud père)
- l'état (viable ou pas) du méristème

Des caractéristiques géométriques sont de plus nécessaires.

(voir 3.)

2.2.2. Expression des lois

L'ensemble des lois permet de définir les probabilités de viabilité, croissance et ramification d'un noeud et de gérer l'organisation des noeuds en unités de croissance et en axes. La définition de ces lois s'appuie sur la modélisation botanique et mathématique vus au chapitre 1. Nous ne redéfinirons pas, par conséquent, les divers termes définis lors de la modélisation.

2.2.2.1. Caractères de l'unité de croissance

a) Détermination de la nature de l'unité de croissance

<u>Si</u> (l'on traite la première U.C. du méristème) <u>alors</u>

La nature est fonction de la position du noeud dans l'unité de croissance de l'axe précédant

<u>sinon</u>

La nature est fonction de l'ordre du méristème et est définie par une probabilité pour chaque ordre d'être soit courte, soit longue.

Elle peut être modifiée par couplage avec l'U.C. précédente de l'axe

<u>Fin Si</u>

b) détermination du nombre de noeuds dans l'unité de croissance
Il est fonction de l'ordre du méristème et de la nature de l'unité de croissance.
Lorsqu'il y a dérive, ce nombre suit une loi exponentielle décroissante en fonction du nombre d'U.C. déja réalisées par le méristème.

2.2.2.2. Viabilité

Si (le noeud est interne à l'unité de croissance) alors
    la probabilité de viabilité est fonction de l'ordre de l'axe et simule les accidents à l'intérieur de l'U.C.
  sinon
    // on est en début d'U.C.
    Si (on est dans la première U.C. du méristème) alors
        On va définir l'âge limite de développement (AGELIM) de l'axe en cherchant le minimum de:
        - l'âge du végétal (AGEVEG)
        - l'âge limite de l'axe s'il est sympodial
        - l'âge limite dû à l'effet de base
        - l'âge limite dû à l'effet de base dans l'U.C.
        - l'âge de taille
        On va ensuite estimer la dimension du nouvel axe c'est à dire le nombre d'unités de croissance susceptibles d'être formées en fonction du rapport de rythme et de la probabilité de pause. Ceci nous permet de définir la portée en nombre d'U.C. de l'axe puis d'évaluer la portée en nombre de noeuds de l'axe.
    Fin Si
    //Elagage
    Si (AGEVEG - AGELIM > temps d'élagage) alors
        la probabilité de viabilité est nulle
      sinon
        // Cas général
        la probabilité est fonction de l'ordre du méristème
    Fin Si
    La portée en U.C. de l'axe est décrémentée d'une unité.
Fin Si
La portée en noeuds de l'axe est décrémentée d'une unité.

2.2.2.3. Croissance

Si (le noeud est interne à l'unité de croissance) alors
    La probabilité de croissance est certaine et vaut 1.
  sinon
    La probabilité est fonction de l'ordre de l'axe. Elle peut être soit constante, soit amortie en fonction du nombre d'U.C. réalisées.
Fin Si

2.2.2.4. Ramifications

a) la ramification classique

```
Si (l'ordre du noeud < l'ordre maximal de ramification) alors
    Si (l'axe n'est pas un axe court floral) alors
        // élagage (ébranchage)
        Si (l'âge du noeud porteur < âge limite de ramif.) alors
            la probabilité de ramification est fonction de
             l'ordre du noeud, de la nature de l'U.C. et de la
             position du noeud dans l'U.C.
          sinon
            // on est sur une portion d'axe ébranchée
            la probabilité de ramifier est nulle
        Fin Si
      sinon
        la probabilité est nulle
    Fin Si
  sinon
    la probabilité est nulle
Fin Si
```

b) la réitération

La réitération traumatique se traite de la même façon que la réitération adaptative, si ce n'est que la probabilité de réitérer traumatiquement n'est fonction que de l'ordre du noeud.

```
Si (ordre de réit. adap. < ordre maxi de réit. adap.) alors
    Si (l'âge du noeud appartient à l'intervalle d'âge
                          d'apparition de la réitération) alors
        Si (le noeud appartient à une U.C. courte) alors
            la probabilité de réitérer est fonction de l'ordre
            du noeud et de la position du noeud dans L'U.C.
          sinon
            la probabilité est nulle
        Fin Si
      sinon
        la probabilité est nulle
    Fin Si
  la probabilité est nulle
Fin Si
```

c) Organes

```
Si (l'âge du noeud appartient à l'intervalle d'âge
                          d'apparition de l'organe) alors
    la probabilité d'apparition de l'organe est fonction de la
    structure seule.
    Si (l'organe est fixe et de nature florale) alors
        Si (la sexualité est terminale et
            le noeud n'est pas en fin d'U.C.) alors
            la probabilité est nulle
        Fin Si
    Fin Si
 sinon
    la probabilité est nulle
Fin Si
```

2.2.3. EXEMPLE

On peut voir en Annexe, la liste des paramètres à définir pour obtenir la simulation topologique et géométrique d'un caféier. Les paramètres intervenant y sont décrits et chiffrés.

3. GÉOMÉTRIE

3.1. LIENS AVEC LA TOPOLOGIE

Le moteur proprement dit fait appel à la simulation géométrique dès qu'un noeud a vu son test de croissance réalisé, juste avant qu'il ne subisse les tests de ramifications. La géométrie suit donc l'organisation préfixée des noeuds. Dans le cas général, chaque noeud va matérialiser un élément particulier constructif du végétal: un constituant.

Définition:

On appelle **constituant** un élément atomique défini de manière topologique et géométrique par la simulation. A chaque constituant est associé un nombre (de 1 à 49) caractéristique de la nature du constituant; ce nombre est appelé un **identifiant**.

La détermination de l'identifiant se fait dans le moteur proprement dit en fonction du numéro de structure et de la nature du constituant. Exemples:

Constituant:	Identifiant:
entrenoeud de la structure 1	1
feuille "	2
fleur "	3
fruit "	4
entrenoeud de la structure 2	11
fleur de la structure 4	33

La détermination de la géométrie de chaque constituant, donc de chaque noeud, nécessite les informations suivantes:

- le type d'insertion (voir Chapitre I, en 2.3.1)
- l'angle d'insertion
- la direction principale de développement
- la flèche ou la flexion de l'axe matérialisé par le méristème
- l'origine géométrique du méristème

Ces informations, bien que typiquement géométriques, sont définies et initialisées dans le moteur proprement dit sous la tâche "Empiler le nouveau méristème formé".

Le moteur proprement dit fait appel à deux procédures géométriques. On distingue en effet le début d'un axe des autres cas pour déterminer la direction de développement ainsi que la flèche appliquée au nouvel axe ou organe. Pour chaque noeud sont ensuite définis les caractères géométriques propres à sa nature et à son ordre.

L'effet de rétroaction (Chapitre I, 2.3.3) de la géométrie sur la topologie s'exprime par le processus de viabilité, il agit cependant avec un retard d'un noeud; la géométrie est en effet traitée après la topologie. Ceci se justifie en général du point de vue pratique car le nombre de noeuds définissant un axe est important.

Dans la cas du coupage, la probabilité de viabilité est rendue nulle si l'origine du noeud traité appartient à un volume dit "non-viable". La définition de ce volume reste simple car limité à trois plans.

Dans le cas de l'épitonie, la probabilité de viabilité est affaiblie en fonction de la direction de développement du méristème et de celle de l'axe porteur. Cette clause ne prend effet qu'en début d'axe et pour des ordres supérieurs à 2.

3.2. ASPECTS GÉOMÉTRIQUES TYPIQUES

3.2.1. EN DÉBUT D'AXE

La détermination de la direction principale de développement du nouvel axe ou organe formé suit un certain nombre d'étapes que nous détaillons ci-dessous.

L'insertion du nouvel axe.

L'insertion du nouvel axe s'effectue en fonction de la direction de l'axe porteur et d'un type d'insertion spécifique des caractéristiques du nouvel élément. Les types d'insertions traduisent à la fois le mode d'insertion et la distribution du nouvel axe. Ils sont au nombre de 9 et offrent les possibilités suivantes:

- angle d'insertion courant, phyllotaxie spiralée;
- angle d'insertion courant, phyllotaxie distique;
- prolongement de la direction de l'axe porteur;
- angle d'insertion par rapport à la verticale, phyllotaxie spiralée;
- angle d'insertion courant, phyllotaxie aléatoire;
- angle d'insertion aléatoire, phyllotaxie spiralée;
- angle d'insertion et phyllotaxie aléatoires;
- angle d'insertion courant, pseudoplagiotropie.

On définit les vecteurs constituant l'axe de rotation et le vecteur de référence selon le type d'insertion sélectionné (voir chapitre 1 en 2.3.1). Après une éventuelle modification de l'angle d'insertion par introduction d'un facteur aléatoire, on effectue la rotation du vecteur de référence autour de l'axe de rotation.

Phyllotaxie

On définit l'angle de distribution du nouvel axe formé selon le type d'insertion par la phyllotaxie, le rang de cet axe dans le verticille et un facteur aléatoire. La direction principale de développement du nouvel axe est obtenue par rotation du vecteur trouvé précédemment autour de l'axe porteur.

D'autres opérations de caractère géométrique sont réalisées:

La torsion:

la direction de l'axe porteur est modifiée en fonction de la direction du nouvel axe et de la portée de celui-ci.

La détermination de la flèche:

Elle s'effectue par un algorithme spécialisé et détermine un angle de flèche en fonction de la portée de l'axe. Pour les organes dits "fixes" l'angle de flèche est déterminé par le fléchissement.

L'initialisation de l'origine de l'axe:

L'origine de l'axe est initialisée par la position du noeud ayant ramifié sur l'axe porteur.

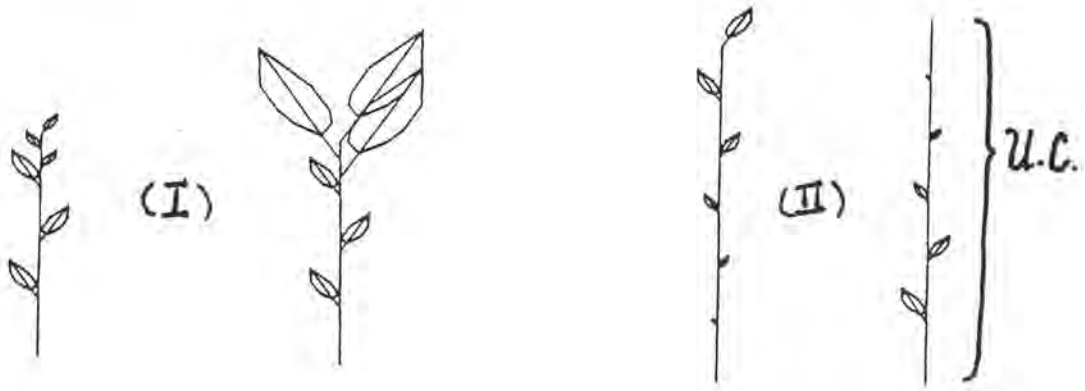
3.2.2. GÉOMÉTRIE POUR CHAQUE NOEUD

3.2.2.1. Direction de croissance

La direction de croissance de chaque noeud est définie par rotation de la direction de développement du noeud précédent du même axe autour d'un axe horizontal orthogonal à l'axe. L'angle de rotation se détermine par les tâches suivantes:
pour un entrenoeud:
- le calcul de l'angle de flèche à appliquer à un entrenoeud,
- le changement de signe de cet angle si le noeud traité se trouve au delà du point de redressement de l'axe,
- le redressement orthotropique en fin d'axe,
- l'effet du vent.

3.2.2.2. Facteurs d'échelle

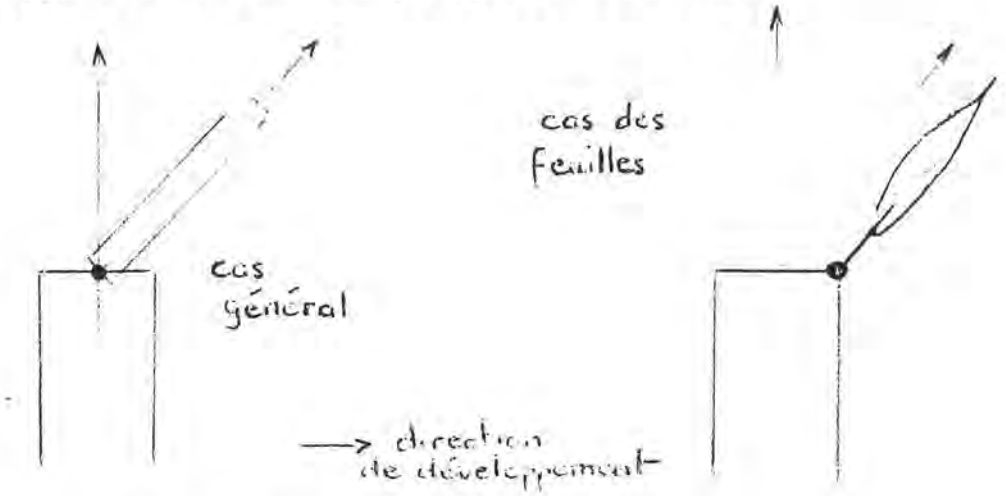
Selon la nature du constituant 1 ou 2 facteurs d'échelle lui sont associés.
Pour un entrenoeud, il faut déterminer sa longueur qui est soit une donnée fonction de la position du noeud dans l'UC soit une constante s'il appartient à une UC courte. Il faut également définir son épaisseur c'est à dire son activité cambiale en fonction de son âge à chacune de ses extrémités.
Pour un organe fixe, nous ne définissons qu'un unique facteur d'échelle fonction du constituant. Il peut être corrélé à la longueur de l'entrenoeud porteur (fig. I) ou à la position du noeud d'attache dans l'UC de l'axe porteur (fig. II).



3.2.2.3. Autres caractères géométriques

Il reste à déterminer pour chaque constituant une direction normale, orthogonale à la direction principale de développement. Elle est fonction du type d'insertion de l'axe portant le constituant.

Selon la nature du constituant, on peut être ramené à redéfinir l'origine de celui-ci; les organes fixes comme les feuilles apparaissent sur la périphérie des axes.



3.2.2.4. Résultat de la simulation

Pour chaque constituant sont sauvegardées les informations suivantes:

- l'identifiant du constituant,
- son ordre,
- son âge,
- une matrice de transformation (3,4),
- 2 facteurs géométriques non linéaires.

La construction de la matrice de transformation s'obtient en définissant une direction secondaire orthogonale aux directions principales et normales du constituant. Chaque direction est corrigée par les facteurs d'échelle. La dernière colonne précise l'origine du constituant.

Les facteurs géométriques permettent des transformations non linéaires, ils décrivent généralement les épaisseurs à chaque extrémité du constituant, c'est à dire l'activité cambiale pour un entrenoeud.

Dans de nombreux cas, les entrenoeuds de même ordre sont regroupés par une opération de simplification (voir Chapitre 3 en 1.1.3.2)

La liste des constituants est de plus complétée par un résumé qui spécifie:

- l'encombrement général du végétal: celui-ci est déterminé par les origines des constituants,
- le nombre de constituants distincts générés, et, pour chacun d'entre eux:
  * un libellé explicite,
  * l'identifiant qui lui est associé,
  * le nombre de constituants générés.

4. ASPECTS INFORMATIQUES

4.1. CONDITIONS TECHNIQUES

La version de base est écrite en fortran. La programmation est structurée en modules indépendants, ce qui a facilité la traduction en langage C par la Société d'Étude en Systèmes Automatiques (SESA) pour adapter le logiciel à un contexte purement graphique et interactif. Le logiciel est transportable et indépendant de l'environnement, il a été installé sur Data Général, Vax, IBM. Une version micro bidimensionnelle est de plus en cours d'élaboration.

Volumes:

Le logiciel nécessite un mini-ordinateur, l'espace mémoire nécessaire à son fonctionnement est voisin de 800 Koctets pour environ 3000 lignes de programme source. Le résultat de la simulation peut atteindre un volume important. La place occupée par une liste de constituants peut atteindre plusieurs mégabytes avec une centaine de milliers de constituants.

Le nombre de paramètres nécessaires à la simulation d'un végétal est très variable car dépendant de la complexité de son architecture. Une dizaine de paramètres suffisent à décrire un palmier mais l'on peut arriver à plusieurs centaines pour décrire un végétal utilisant plusieurs structures complexes comme certaines herbes. (voir exemple en Annexes).

Performances:

Le temps nécessaire à la simulation d'un végétal est très variable. Comme le montre le tableau ci-dessous c'est le nombre de noeuds simulés qui définit principalement le temps de calcul.

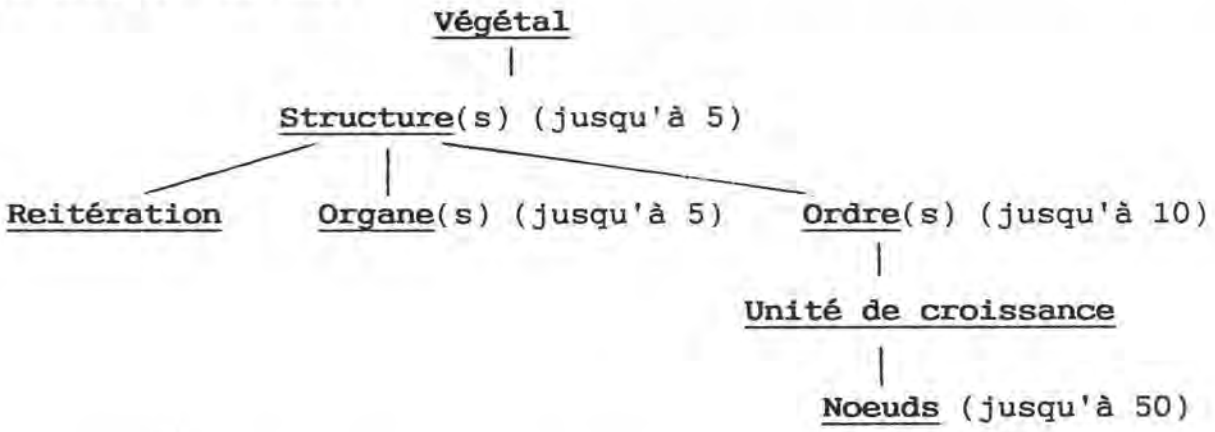
	temps CPU (en secondes)		nbre de
	topologie	total	noeuds
Caféier	4 s	20 s	2000
Pin de 15 ans	45 s	200 s	85000
Saule pleureur	130 s	540 s	350000

(performances moyennes sur le Data Général MV 10000SX).

4.2. STRUCTURES DE DONNÉES

4.2.1. DESCRIPTION D'UN VÉGÉTAL

Les paramètres décrivant un végétal sont hiérarchisés selon le croquis suivant:



Les différents paramètres peuvent être saisis à partir d'un programme de saisie interactif respectant cette hiérarchie.

Détail des paramètres par structure:

- libellé de structure
- indicateur de réitération
- indicateur d'arbre fruitier (les axes courts sont floraux)
- indicateur de taille
- indicateur de rhizome (arbre souterrain)
- indicateur de coupage (géométrique)
- ordre maximal de ramification
- nombre d'organes de la structure
- valeur de l'effet de base
- valeur de l'effet de base sur UC
- temps d'élagage (temps séparant la chute de la mort d'un axe)
- activité cambiale (6 paramètres)
- angle de redressement orthotropique
- nombre de noeuds sur lesquels s'effectue le redressement
- angle minimum d'insertion
- nombre d'UC sur lesquelles varie l'angle d'insertion
- longueur des entrenoeuds courts

Détail des paramètres pour la réitération:

- zone d'âge d'apparition de la réitération adaptative
- zone d'âge d'apparition de la réitération traumatique
- ordre maximal de réitération adaptative
- ordre maximal de réitération traumatique
- retard au démarrage de la réitération
- nombre de réitérations classiques par noeud
- type d'insertion de la réitération adaptative
- type d'insertion de la réitération traumatique
- angle d'insertion de la réitération adaptative
- angle d'insertion de la réitération traumatique

Détail des paramètres pour un organe:

- zone d'âge d'apparition de l'organe
- nature de l'organe
- indicateur du type d'organe: fixe ou procédural
- probabilité d'apparition de l'organe
- nombre d'organes par noeud
- type d'insertion
- angle d'insertion
- flexion de l'organe
- facteur d'échelle
- indicateur de couplage de l'échelle sur l'axe porteur

Détail des paramètres pour un axe d'ordre donné

- nombre d'axes par noeud
- retard en nombre d'UC au démarrage de l'axe
- probabilité de viabilité
- probabilité de croissance
- rapport de rythme
- probabilité de réitération traumatique
- âge d'apparition de la floraison
- âge limite de ramification (élagage par ébranchage)
- module de Young (coefficient d'élasticité du bois)
- point d'application de la flèche
- conicité
- valeur de la torsion
- type d'insertion
- angle de branchement
- angle de phyllotaxie

Détail des paramètres de gestion des unités de croissance

- zone de partage de l'UC
- probabilité d'avoir une UC courte
- couplage de la nature de l'UC
- nombre limite d'UC
- nombre limite d'UC par taille
- probabilité de ramification dans une UC courte
- probabilité de viabilité interne à l'UC
- nombre de noeuds dans une UC longue
- nombre de noeuds dans une UC courte
- coefficient de dérive du nombre de noeuds dans une UC

Détail des paramètres pour un noeud (dans une UC longue)

- probabilité de ramification
- probabilité de réitération
- longueur de l'entrenoeud

4.2.2 AUTRES STRUCTURES DE DONNÉES

Les données externes à la simulation sont peu nombreuses et sont:

- l'âge du végétal
- l'initialisation des séquences aléatoires
- la force et la direction du vent.

La structure interne est définie par une gestion de pile dont nous avons déja détaillé les paramètres topologiques (en 2.2.3) et géométriques (en 3.1)

4.3. GÉNÉRATEURS ALÉATOIRES DE LA SIMULATION

4 générateurs aléatoires indépendants sont utilisés dans la simulation. 2 pour la topologie et 2 pour la géométrie. Ils sont nécessaires pour permettre l'animation. Nous le justifions ci-dessous.

4.3.1. ALÉATOIRE POUR L'ANIMATION

Il est intéressant pour certaines applications, de ne simuler que l'évolution des axes principaux d'un végétal, par exemple tous les axes d'ordre 1 et 2. Si nous utilisons un unique générateur aléatoire pour tout le végétal, nous n'aurons qu'une unique séquence de nombres quelque soit son ordre de ramification. Comme nous construisons le végétal en ordre préfixé, à moins de n'utiliser que des probabilités certaines (valant 0. ou 1.), le devenir d'un même axe sera différent selon le degré de ramification (voir exemple 1). La même remarque est valable lorsqu'on simule l'évolution d'un même végétal à des âges consécutifs (voir exemple 2).

La solution consiste donc à attribuer à chaque axe, donc à chaque niveau de la pile une initialisation distincte du générateur de nombres aléatoires.

Il faut de plus éviter que le comportement des axes d'un même ordre soit corrélé ; c'est à dire qu'il faut éviter de trouver une séquence de nombres aléatoires identique dans des axes (à quelques noeuds près). Ceci nécessite donc que la détermination du nombre aléatoire initial d'un axe soit effectuée par un autre générateur.

Il est de plus gênant d'utiliser les mêmes générateurs pour la topologie et la géométrie que l'on voudrait indépendantes (à l'exclusion des phénomènes rétroactifs).

Pour ces raisons, 4 générateurs sont employés. Ils sont activés lors de chaque appel de LOIS.

Exemple 1:

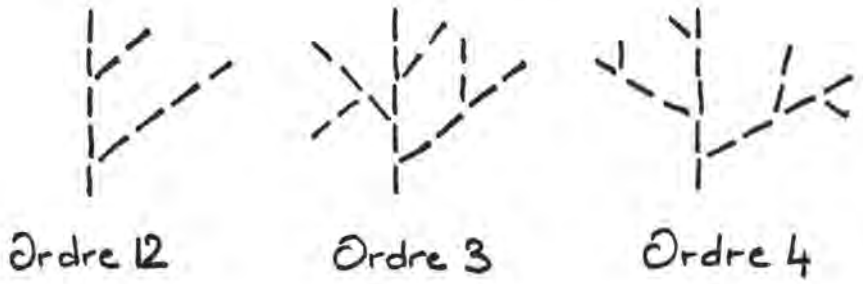
probabilité de viabilité et de croissance : 1.0

probabilité de ramification : 0.55

Séquence des nombres aléatoires:

.5, .7, .3, .8, .4, .5, .9, .3, .6, .7, .2, .9, .1, .9

Dans ces figures on ne teste que la ramification jusqu'à l'ordre indiqué pour un individu de dimension 5.



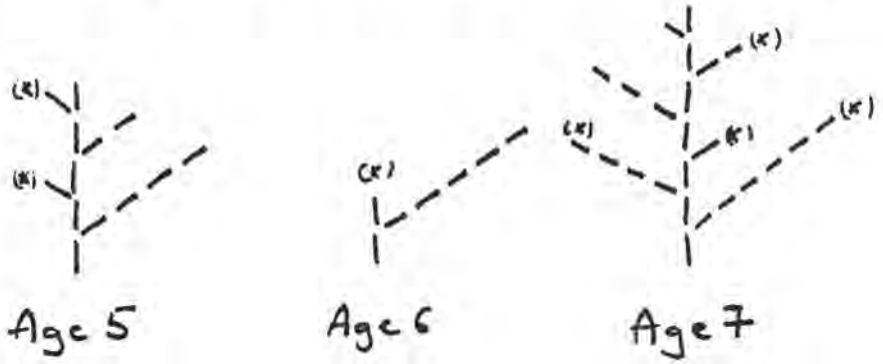
Exemple 2: (mêmes données)

probabilité de croissance et ramification : 1.0

probabilité de viabilité : 0.85

on garde la même séquence aléatoire que ci-dessus.

Dans ces figures on ne teste que la viabilité jusqu'à l'âge (la dimension) indiqué pour un ordre de ramification maximal de 2.



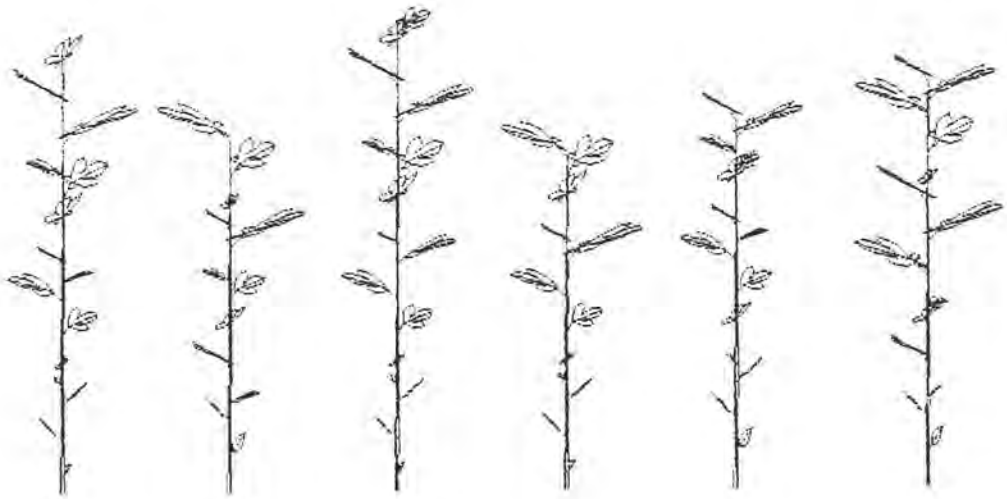
Ceci permet une utilisation souple de la simulation; on peut en effet relancer des simulations en ne modifiant que des aspects particuliers de l'architecture du végétal sans la bouleverser. On peut ainsi effectuer les opérations suivantes:

- changer la géométrie pour une même topologie,
- augmenter ou diminuer les ordres de ramification et de réitération,
- ajouter ou supprimer des organes fixes ou procéduraux,
- tailler des structures.

Exemple: développement de rejets sur un arbre taillé:

4.3.2. ALÉATOIRE POUR LA VARIABLITÉ

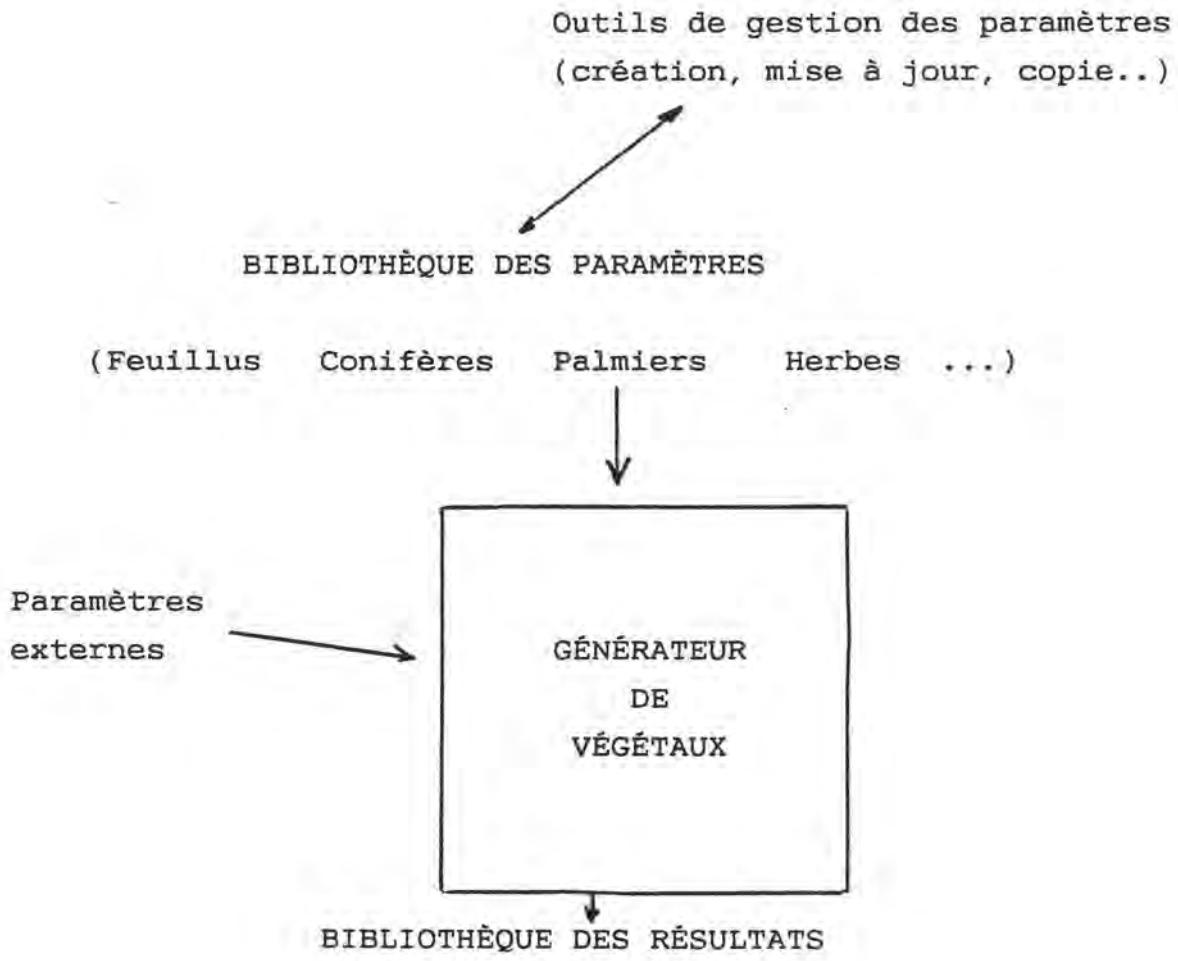
L'initialisation de la séquence des nombres aléatoires est un paramètre de simulation. Il permet d'obtenir des représentants distincts de même âge ou non à partir des mêmes paramètres architecturaux. La figure suivante illustre 6 pieds tirés aléatoirement à partir des mêmes paramètres.



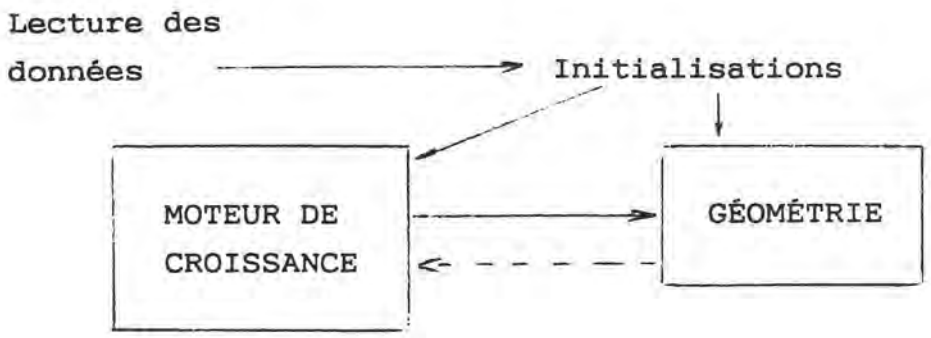
4.4. SCHÉMA GÉNÉRAL DU LOGICIEL

Le moteur de croissance et la géométrie associée constituent le générateur de végétaux.

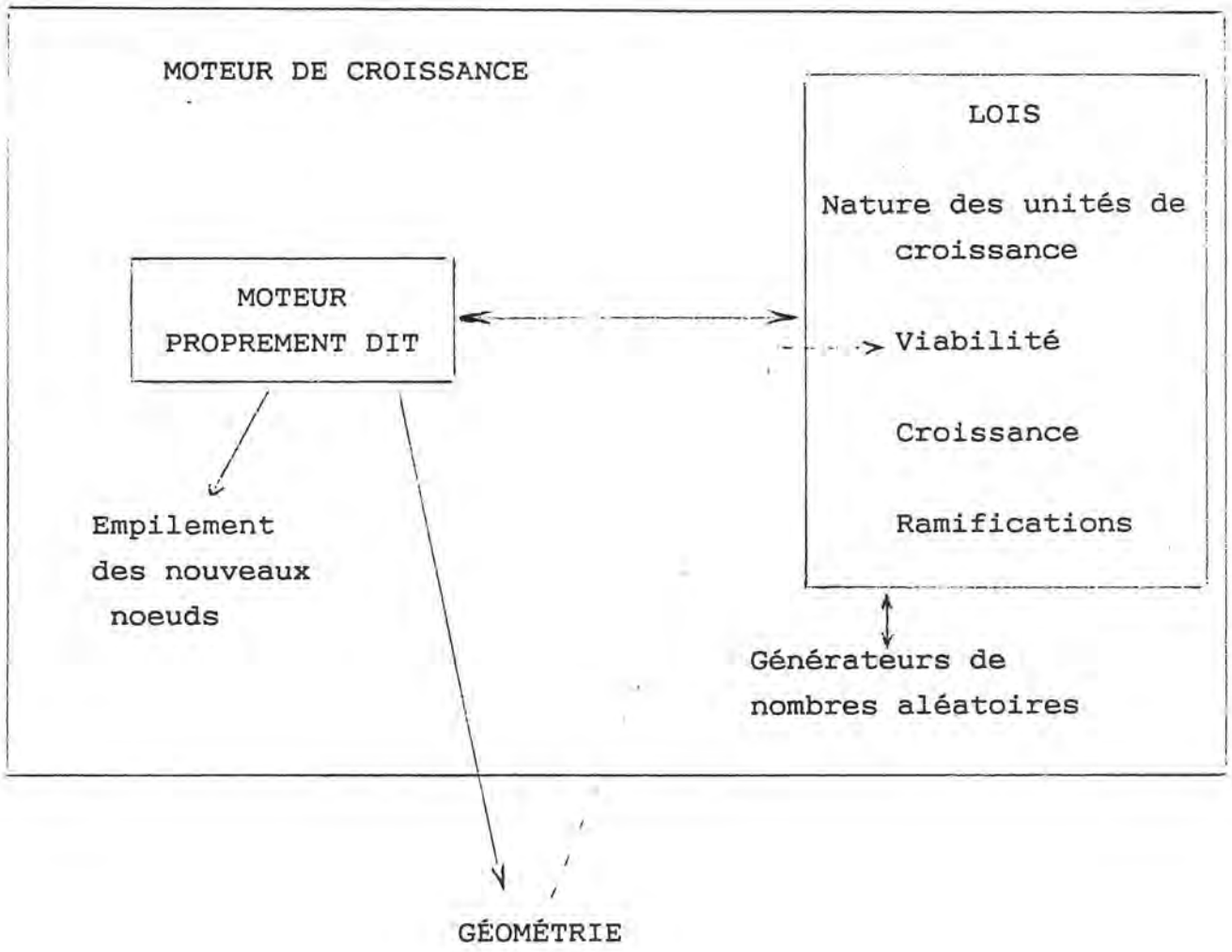
Les paramètres nécessaires à la simulation d'une plante particulière sont implantés dans un fichier. Ceux-ci sont gérés par une bibliothèque, constituant ainsi une mini-flore numérisée.



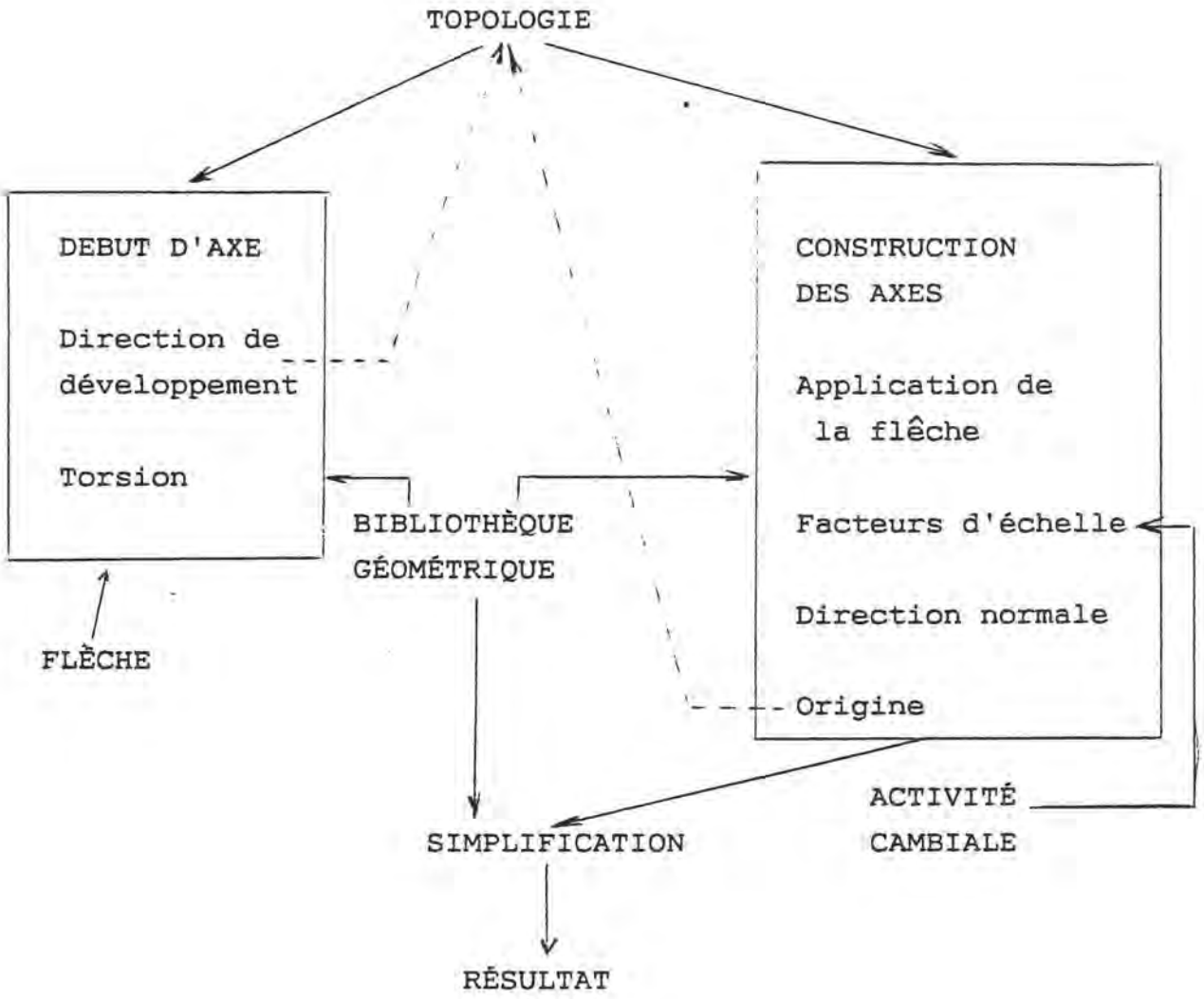
Le générateur de végétaux:



4.4.1. TOPOLOGIE



4.4.2. GÉOMÉTRIE



(Ligne élastique)

La Bibliothèque géométrique contient les modules utilitaires suivant :

- Rotation d'un vecteur autour d'un axe dans l'espace
- Produit scalaire de 2 vecteurs
- Produit vectoriel de 2 vecteurs
- Projection d'un vecteur sur un plan défini par sa normale
- Normalisation d'un vecteur

CHAPITRE III

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous aborderons plus particulièrement l'aspect graphique de l'application. Bien que l'on puisse traiter la visualisation avec la simulation, nous avons préféré rendre les 2 tâches indépendantes. Les raisons principales de ce choix sont :

- Le temps de calcul nécessaire à une simulation n'est pas négligeable, il peut atteindre quelques minutes sur un mini-ordinateur pour une plante, ce qui devient inacceptable pour un ensemble d'une dizaine de végétaux;
- Le changement des caractéristiques de vues, telles que la position de l'observateur ne doivent pas nécessiter une nouvelle simulation;
- On voudrait également avoir une grande souplesse de représentation d'un même végétal, par des habillages divers (ex. avec ou sans feuilles, fleurs..), ou mettre en évidence certaines parties du végétal (les axes d'ordre 1 par ex.).
- De plus, si l'on veut réaliser des scènes, il faut gérer non seulement un ensemble de végétaux, mais aussi d'autres objets graphiques comme des bâtiments, nuages,...et autres.
- Enfin, pour des raison de transportabilité, la simulation doit être indépendante des caractéristiques graphiques (définition, type de représentation, couleurs...) de l'image que l'on désire créer.

L'indépendance des tâches "Simulation" et "Graphisme" sous-entend des structures de données adéquates pouvant d'une part recevoir des résultats de simulations et, d'autre part, s'intégrer dans une chaîne de visualisation à vocation générale.

De la définition d'une scène jusqu'à l'obtention d'une image couleur point par point, il a fallu écrire une chaîne de visualisation, qui, bien que surfacique et "classique", présente quelques particularités. Aussi détaillerons nous dans un premier temps les structures de données qu'elle manipule, puis les grandes lignes en insistant sur les caractères originaux des traitements.

1. STRUCTURES DE DONNEES

Dans le cas présent, nous avons défini une structure de données originale pour caractériser les végétaux et plus généralement des objets procéduraux. Nous détaillerons donc particulièrement la notion de **ligne élastique**, structure caractérisant un végétal à l'issue de la simulation, puis les primitives qui s'y rattachent : les **formes**. Nous expliciterons ensuite les autres structures de données plus classiques employées dans la chaîne graphique.

1.1 LA NOTION DE "LIGNE ELASTIQUE"

1.1.1 DÉFINITION

On appelle **ligne élastique** la structure de données qui, à partir d'une liste de constituants (entre-noeuds, feuilles, ...) et leurs caractères topologiques et géométriques tridimensionnels décrit un végétal à l'issue de la simulation.

```
ligne_élastique : { liste de constituants };

Constituant :
  {
    informations topologiques :
        identifiant (feuille, fruit, ..) ;
        numéro d'ordre du constituant ;
        âge du constituant;
    informations géométriques:
        matrice de transformation 3*4;
        2 facteurs géométriques non linéaires;
  }
```

Signification des informations:

L'identifiant est un numéro caractérisant le constituant; les plus usités sont: 1 et 11 pour les entrenoeuds, 2 et 12 pour les feuilles, 3 et 13 pour les fleurs, 4 et 14 pour les fruits...

Le numéro d'ordre corespond à l'ordre de ramification du constituant. Si celui-ci n'est pas un entrenoeud, son ordre est défini par l'ordre de l'axe dont il est issu.

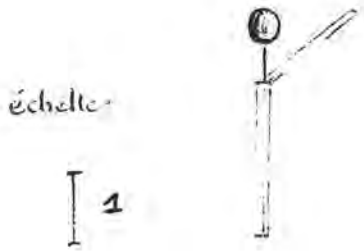
L'âge du constituant est exprimé en nombre de tops.

La matrice de transformation définit les directions principales, secondaires et normales du constituant, les facteurs d'échelle selon ces 3 directions et la position absolue du constituant (l'origine du végétal étant en 0.,0.,0.).

Les facteurs géométriques définissent des variations d'échelle selon la direction principale du constituant. Ils gèrent ainsi le recollement des entrenoeuds: voir Ch.II,3.2.3.2.

A une ligne élastique est associé un résumé caractéristique de celle-ci. Il comprend la liste des constituants distincts intervenant ainsi que l'encombrement géométrique de l'ensemble.

Exemple:



Ligne élastique :

1	1	2	0.	0.2	0.	0.
			0.	0.	0.2	0.
			2.	0.	0.	0.
1	2	1	1.5	0.	0.2	0.
			0.	0.2	0.0	0.
			1.0	0.	-.2	2.
3	1	1	0.	1.	0.	0.
			0.	0.	1.	0.
			1.	0.	0.	2.

Résumé :

2	Nombre de constituants
0.	min en X
0.	min en Y
0.	min en Z
1.5	max en X
1.	max en Y
3.	max en Z

Entre-noeud	1	nombre: 2
Fleur	3	nombre: 1

1.1.2 OPÉRATIONS ÉLÉMENTAIRES

On peut distinguer 3 principaux opérateurs sur une ligne élastique: la sélection, la simplification, et la visualisation.

1.1.2.1 Opérateur sélection

Toutes les informations décrivant un constituant peuvent être considérées comme des critères de sélection possibles. En pratique, identifiant, ordre et position sont le plus couramment utilisés.

Exemple : Si l'on s'intéresse aux feuilles naissantes sur des branches d'ordre 3 et plus et à une altitude supérieure à 10, la condition que doit vérifier un constituant sélectionné s'exprime ainsi:

Identifiant = 2 et ordre > 2
et âge <= 1 et matrice de transf.(3,4) > 10.

Nous verrons lors de l'attribution des formes à une ligne élastique dans une scène donnée (voir 1.3), comment s'effectue en pratique la sélection. Dans le cas de coupage (Clipping), l'opérateur de sélection permet de refuser rapidement des constituants hors d'un cône de vue; les informations géométriques fournies par la matrice de transformation définissant une enveloppe maximale d'occupation pour le constituant (voir 2.2.1).

1.1.2.2 Opérateur simplification

Dans de nombreux cas, on peut regrouper des constituants de caractères analogues en un seul; cette tâche est réalisée par l'opérateur simplification. Elle permet, par exemple, de décrire un tronc rectiligne par un unique constituant au lieu de plusieurs dizaines, voire centaines. Dans ce cas un constituant peut décrire un axe entier si celui-ci est rectiligne.

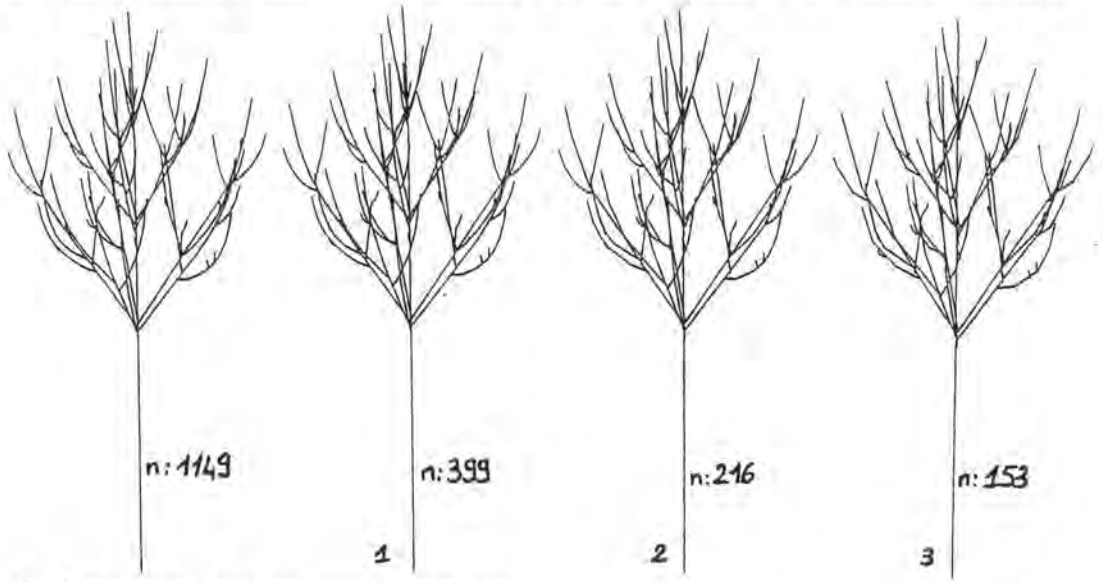
La simplification s'effectue par fusion de constituants vérifiant les conditions suivantes :

- mêmes identifiants,
- mêmes ordres,
- directions principales de développement proches: ceci peut s'exprimer par un produit scalaire des 2 directions supérieur à un certain seuil,
- l'origine de l'un est celle du bout de l'autre: on tolère en fait un certain seuil.

Si tel est le cas, les deux constituants sont considérés comme un seul, ayant:

- l'origine du premier,
- la direction principale de développement étant la somme des directions principales des constituants,
- toutes les autres caractéristiques du premier constituant (c'est à dire le plus âgé) à savoir : l'identifiant, l'ordre, l'âge.

L'opérateur simplification est principalement utilisé dans le logiciel de simulation, les figures suivantes nous montrent son effet sur 3 niveaux de seuils; la première figure montre la ligne élastique non simplifiée. (n spécifie le nombre de constituants).

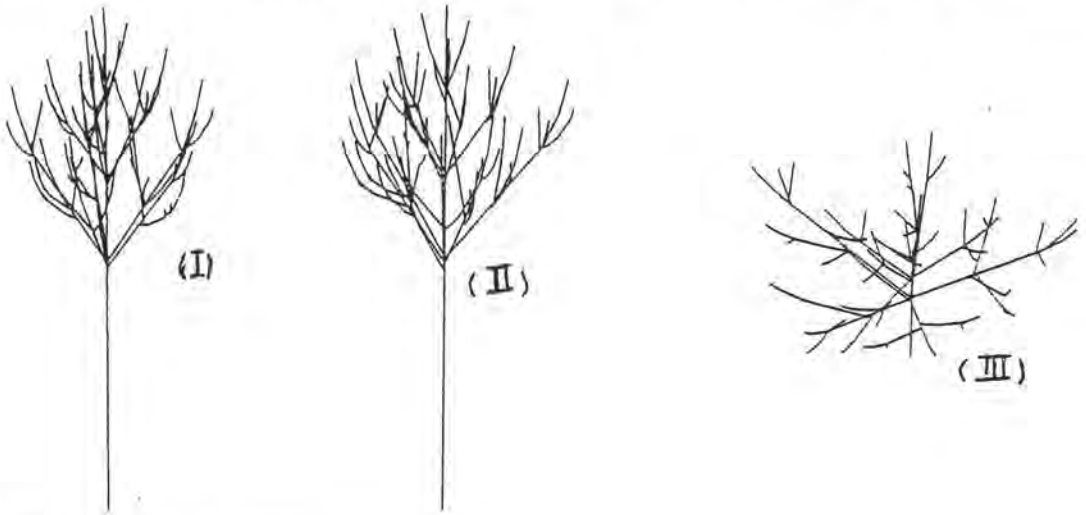


1.1.2.3 Opérateur de visualisation

A partir de la ligne élastique, toutes sortes de visualisations sont possibles; il suffit de rattacher à chaque identifiant une forme définie par des primitives graphiques (voir 1.2).

L' opérateur de visualisation est un outil permettant une représentation rapide et simple d'un végétal en utilisant une forme minimale: le trait, défini par son origine (0,0,0) et son extrémité (1,0,0). A chaque constituant est alors appliquée la matrice de transformation aux coordonnées de la forme sélectionnée. Deux rotations sont implantées: l'une autour de la verticale, l'autre en altitude. Par une projection, on se ramène ensuite à un tracé 2D (voir figures). L'opérateur visualisation est développé sous le contexte GKS (**EKP84**), ce qui permet sa transportabilité.

Exemple: pas de rotation (fig. I), rotation de 30° autour de l'arbre (fig. II, III), rotation de 80° en altitude (fig. III)



1.1.2.4 Autres opérateurs

D'autres opérateurs ont été développés d'usage moins fréquent. Citons parmis eux:

- l'opérateur **Tri** qui peut s'utiliser pour la visualisation en utilisant "l'algorithme du peintre", (tri sur les origines et directions des constituants),
- l'opérateur **Somme** qui permet de faire l'union de 2 lignes élastiques ...Il permet la fusion des 2 listes avec des corrections géométriques: mise à l'échelle et translation.

1.1.3 INTÉRET

Une telle structure permet un grand nombre de manipulations et de représentations.

Une même ligne élastique peut donner une infinité de représentations, car à chaque constituant peut être associée une forme (voir 1.2) quelconque. Elle permet également de décrire tout objet tridimensionnel construit à l'aide de constituants primitifs. Notons de plus qu'une ligne élastique peut être considérée comme un constituant, et que l'on peut ainsi, récursivement, élaborer des objets aussi complexes qu'on le souhaite.

La sélection de certains constituants ou de certains caractères topologiques ou géométriques permet de nombreuses opérations de haut-niveau comme le coupage sur tout un végétal (on connait l'encombrement de celui-ci dans le résumé), ou sur chacun de ses constituants.

1.2 FORMES

Primitives graphiques associées à la ligne élastique, les formes constituent les objets élémentaires traités en entrée dans la chaîne graphique. Aussi les définirons-nous précisément avant de voir les outils permettant leur construction.

1.2.1 DÉFINITION

On appelle **forme** un objet de topologie et géométrie fixe, non procédural, construit par des primitives à caractères graphiques tridimensionnels: points, segments de droites et polygônes.

Une forme est, de manière générale, constituée d'un ensemble de polygones ayant chacun d'eux des caractéristiques propres; ce qui peut s'exprimer par une description du type:

Forme :

- nombre de faces
- liste de faces

Face :

- nombre de sommets
- indicateur de dimension (voir 1.2.2 ci-dessous)
- type de représentation (filaire ou surfacique)
- index de couleur
- liste des coordonnées des sommets

1.2.2 CARACTÉRISATION D'UNE FACE

Le concept de face tel qu'il est utilisé dans la chaîne graphique regroupe un ensemble de coordonnées ayant mêmes attributs et en particulier même couleur.
Sous le terme face se distinguent en fait 4 cas:

a) la face correspond à une facette d'un volume:
dans ce cas l'indicateur de dimension vaut 3, et le type de représentation peut être filaire ou surfacique;

b) la face correspond à une facette d'un objet plan:
l'indicateur de dimension vaut alors 2 et le type de représentation est filaire ou surfacique;

c) la face correspond à un ensemble de segments de droites:
l'indicateur de dimension vaut 1, les coordonnées sont regroupées par paires définissant ainsi des segments de même index de couleur, la représentation est filaire;

d) la face correspond à un ensemble de points:
l'indicateur de dimension vaut 0, la représentation est filaire et les coordonnées définissent un nuage de points de même index de couleur.

1.2.3 CONSTRUCTION

1.2.3.1 Contraintes d'élaboration

Les formes doivent répondre à des contraintes soumises d'une part par la structure ligne élastique et, d'autre part, par la chaîne de traitement graphique.

- Contraintes dues à la ligne élastique:
la ligne élastique est indépendante des formes rattachées aux constituants; il faut donc que toutes les formes s'inscrivent dans un même volume unitaire, aient les mêmes axes principaux, possèdent une même origine.Si la forme possède une symétrie radiale, l'axe sera matérialisé par Ox; si elle est plane, la normale au plan sera Oz.

- Contraintes dues à la chaîne graphique:

La chaîne graphique ne peut traiter qu'un nombre fini de faces (30000), elles-mêmes définies par un nombre fini de sommets (5000). Notons de plus, que dans le cas (général) où une face correspond à un polygone, celui-ci doit être convexe, plan, et ses sommets listés dans le sens trigonométrique.

1.2.3.2 Outils de conception de formes

a) Formes à symétrie radiale

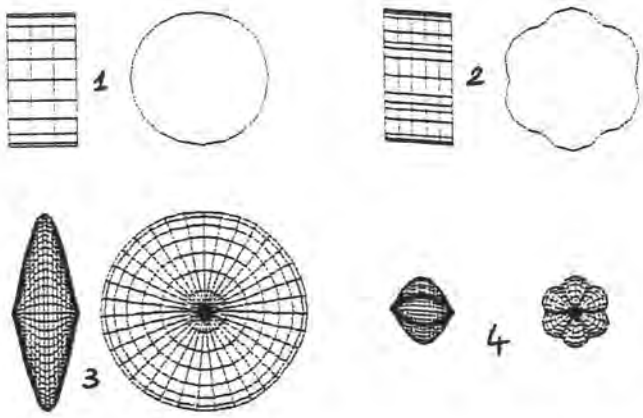
Un petit programme semi-graphique permet de construire des solides de révolution. Ses principaux paramètres sont :

- le rayon et la description de sa variation,
- le nombre de cannelures et leur rayon,
- les pas de discrétisation en longueur et circonférence.

Exemples:

1: cylindre
2: cylindre cannelé
3: solide de révolution
4: fruit à lobes

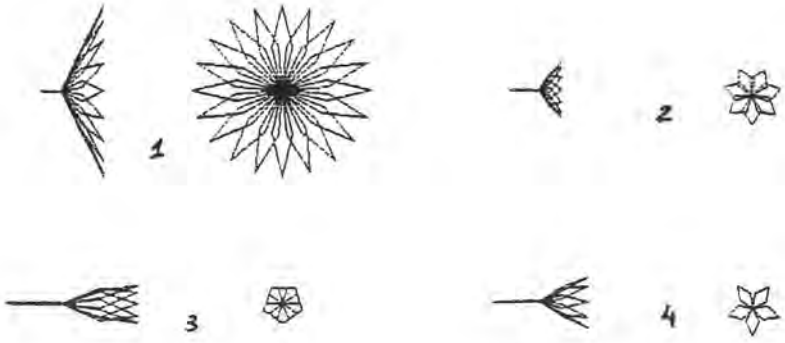
2 vues par forme:
- vue du coté
- vue du dessus



Un programme analogue, permet la construction de petites fleurs, très simples. Ses principaux paramètres sont:

- le nombre de pétales, leur largeur, leur longueur,
- l'angle d'ouverture des pétales,
- la longueur de la tige.

Exemples:

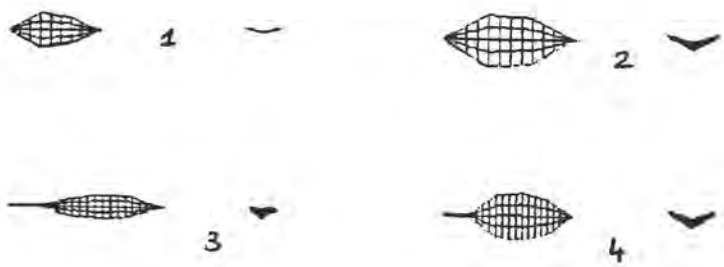


b) Formes planes: feuilles

Dans le même ordre d'idées, un programme de construction de formes planes a été écrit. Ses principaux paramètres sont :

- la description d'un contour,
- un rayon de courbure,
- un angle dit de gouttière,
- un pas de discrétisation sur les 2 axes concernés (Ox et Oy).

Exemples:



c) Formes pixels.

On appelle **forme pixel** une forme définie par une image de faible définition (160 * 160 points par ex.). Cette forme sera définie par des points ou des traits (si plusieurs points de la même couleur se succèdent) dans un plan. Un semblant de volume peut être rendu en décrivant une forme par 2 plans orthogonaux. De telles formes sont très utiles pour générer rapidement tout un ensemble de végétaux, mais ne peuvent pas être employées pour des vues aériennes ou rapprochées.

Exemples:

1.3 SCÈNES

1.3.1 DÉFINITION ET DESCRIPTION

Définition: On appelle **scène** une structure de données décrivant un ensemble d'objets à partir d'une liste d'attributs se rapportant à une ou plusieurs lignes élastiques.

Les attributs d'une ligne élastique sont d'une part des grandeurs géométriques:

- facteur d'échelle,
- angle de rotation sur elle-même,
- position dans l'espace;

et, d'autre part, les formes et index de couleurs associées à chaque identifiant.

Description:

Scène :

nombre d'objets
liste d'attributs pour chaque objet;

Liste d'attributs:

nom de ligne élastique
facteur d'échelle
angle de rotation
position en X, Y, Z
nombre de constituants distincts
liste des formes pour chaque constituant;

Liste des formes (pour un identifiant):

numéro d'identifiant
1er index de couleur
nom de la forme détaillée
2ème index de couleur
nom de la forme simplifiée
3éme index de couleur
nom de la forme très simplifiée;

A chaque identifiant sont associées 3 formes. La 1ére sera affectée à l'ordre 1, la 2éme à l'ordre 2, la dernière aux ordres ultimes (voir la justification de ce choix en 2.1). A chaque forme est attribué un index de couleur; s'il est nul, l'identifiant ne sera pas représenté.

Exemples de liste des formes (constituant entre-noeud)

index:	forme:	
1	entn107	Tout est
1	entn105	représenté
1	entn103	
1	entn107	Les axes d'ordre 2
0	entn105	sont absents. Ceux
2	entn103	d'ordre 3 et plus sont
		de couleur distincte.

1.3.2 CONSTRUCTION D'UNE SCÈNE

La constitution d'une scène avec ses listes d'attributs est une tâche laborieuse, c'est pourquoi il a été utile de concevoir des générateurs de scènes.

1.3.2.1 Scène minimale : un seul végétal

Pour des paramètres de vues standards (voir 1.4), un programme réalise la scène par défaut pour une ligne élastique donnée. En fonction du résumé de celle-ci, il génère : les positions et facteurs d'échelles nécessaires pour voir le végétal en entier, les formes et couleurs attribuées par défaut selon les numéros d'identifiants. Les paramètres en entrée sont le nom de la ligne élastique et un indicateur feuillus/conifères (le programme de simulation ne différencie en effet pas les entités feuille et aiguille).

Toutes les scènes présentant des végétaux isolés dans la suite de l'exposé ont été générées par ce programme.

1.3.2.3 Scène complexe : un mini-éditeur de paysage

Nous avons conçu un mini-éditeur de paysage à vocation générale. Il permet, selon les besoins, de générer une scène ou une ligne élastique couvrant de grandes surfaces avec de nombreux éléments végétaux sans définir pour chacun d'eux sa position exacte dans l'espace.

Son principe est simple. Pour chaque élément végétal (ou autre) appartenant au paysage à représenter, on définit des zones rectangulaires auxquelles on affecte une probabilité de présence. Il est ainsi facile de réaliser une forêt; il suffit de définir une même zone pour chaque espèce.

A chaque élément végétal (espèce) sont attribués des caractères géométriques:
- un facteur d'échelle,
- une plage de variation de l'échelle,
- un angle de rotation de l'élément sur lui-même,
- une plage de variation de cet angle,
- un libellé explicite,
- un indicateur de la nature de l'élément; il peut être défini par une ligne élastique et dans ce cas il apparaîtra dans la définition de la scène, ou être défini par un constituant auquel on associera généralement une forme pixel. Dans ce dernier cas le générateur produira non seulement une scène mais aussi une ligne élastique dont chaque constituant sera un arbre.

Pour chaque espèce, dans chaque zone sont définies les informations suivantes:
- l'origine de la zone
- le nombre d'éléments en X et en Y,
- le pas de la plantation en X et en Y,
- la probabilité de présence de l'espèce dans la zone.

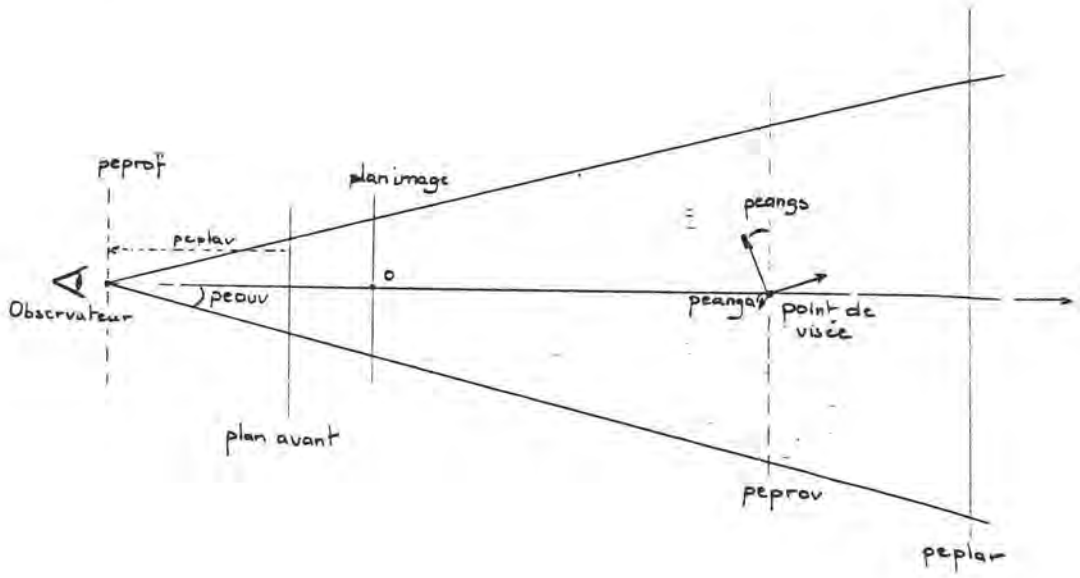
Ce mini-éditeur nous a ainsi permis de générer des paysages complexes tel que celui d'une ville (Chapitre IV, en 1.1.2). Il reste cependant à le développer dans un contexte graphique 3D et intéractif.

1.4 PARAMETRES DE VISUALISATION

Les paramètres de visualisation sont classiques (GIL78) et comportent:

- la distance de l'observateur au plan image : peprof,
- la distance du plan image au point de visée : peprov,
- l'angle en altitude : peanga,
- l'angle au sol : peangs,
- la position de l'observateur : petsl,
- la direction d'éclairage : peecl,
- l'angle d'ouverture : peouv,
- l'abscisse du plan avant : peplav,
- l'abscisse du plan arrière : peplar,
- un facteur de zoom : pezoom.

Schéma



Remarques:

- La fenêtre de vue est de taille fixe (de coté 1), l'angle d'ouverture ne restreint le champ de vision que s'il est suffisamment petit;
- les angles provoquent la rotation de l'observateur autour du point de visée (en fait c'est la scène qui tourne, l'observateur restant fixe... voir 2.2.1);
- les longueurs sont exprimées en mètres.

Les paramètres standards sont :

Distance au plan image	1.5
Distance de visée	50.0
Angle en altitude	0.0
Angle au sol	0.0
Position de l'observateur	0.0 0.0 1.70 (hauteur des yeux)
Direction d'éclairage	1. -1. -2.
Angle d'ouverture	45.
Plan avant	0.0
Plan arrière	999999.0
Facteur de zoom	1.0

1.5 IMAGES

1.5.1 CODAGE D'UNE IMAGE

1.5.1.1 Résolution et Définition

On appelle **résolution** d'une image le couple de nombres entiers exprimant le nombre de points par ligne et par colonne d'une image carrée de coté unitaire et, **définition** d'une image le nombre de points par ligne et colonne d'une image rectangulaire quelconque.

Résolution et définition de l'image sont deux paramètres intervenant dans la chaîne graphique; celle-ci peut ainsi générer des images adaptées à de multiples supports et besoins. Les valeurs les plus usitées sont :

- résolution de 512 par 512, même définition, pour des images de mises au point à destination du Tektronix 4107,
- résolution de 1024 par 1024, même définition, pour une utilisation générale,
- résolution de 160 par 160, même définition, pour constituer des "formes pixels" (voir 1.2.3.3).

1.5.1.2 Codage des points de l'image

Principe: l'image est décrite par une succession d'index de couleur à partir de l'origine de l'image (coin inférieur gauche), puis colonne par colonne. Pour optimiser la place mémoire, les index successifs de même valeur sont regroupés.

Par convention, 255 valeurs d'index sont possibles (de 0 à 254), l'index 255 étant réservé à l'indicateur de regroupement. Sous ces conditions, une image 1024 * 1024 occupe :

- pour un végétal seul : environ 75 K,
- pour un paysage : de 400 à 600 K

Exemple

Le regroupement sur cette image de faible définition met les index de même valeur en évidence (traits).

(Silhouette d'un peuplier)

1.5.2 OPÉRATEURS

Un certain nombre d'opérateurs on été conçu pour manipuler des images. Nous avons déja vu (1.2.3.3) un outil permettant de convertir une image en forme, et nous décrirons l'opérateur "somme"; l'opérateur visualisation sera décrit en 2.3.

1.5.2.1 Opérateur somme

Cet opérateur a été conçu pour effectuer des opérations "arithmétiques" simples sur des images de mêmes résolutions et définitions. Les opérations, non commutatives, sont:

- la somme: les index à valeur non nulle écrasent les index précédants; elle permet de produire une séquence d'image avec un fond fixe calculé une fois pour toutes (exemple : ciel et sol des paysages urbains),
- la différence: les index à valeur non nulle écrasent les index précedants par la couleur du fond (index 0); elle permet des images particulières comme des ombres chinoises ou des vues à contre-jour.

1.6 STRUCTURE DE TRAVAIL

Elle est classique dans le contexte graphique. Il s'agit d'une table linéaire constituée de points.
A chaque point sont associés une profondeur et un index de couleur; c'est une structure du type Z-buffer.

Le seul opérateur particulier sur cette structure est un outil compactant l'image lors de sa sauvegarde sur disque. (voir 1.5.)

2. TECHNIQUES INFORMATIQUES ET GRAPHIQUES

2.1. CHAÎNE DE VISUALISATION

2.1.1. PRINCIPE

L'organisation générale de la chaîne est:

Pour chaque ligne élastique, définition d'une matrice de transformation selon les paramètres de vue

Pour chaque ligne élastique, extraction des constituants visibles

Définition des constituants retenus par des primitives graphiques: les faces

Définition d'index de couleur par un modèle d'illumination

Projection perspective et coupage

Remplissage des polygônes

La principale difficulté dans l'organisation de cette chaîne réside dans le fait que le volume des informations décrivant une scène est très important. Il n'est pas envisageable de traiter une base de données graphique de plusieurs centaines de millions de polygones dont une infime partie serait seule visible.

2.1.2. EXPRESSION GÉNÉRALE DE LA CHAÎNE

Grâce à la description hiérarchique de la scène en lignes élastiques, constituants, formes, faces, on peut à chaque niveau de cette organisation réduire de manière de plus en plus précise le nombre des polygones à discrétiser.

De plus, le modèle d'illumination est très simple car il traite chaque face de manière indépendante; ce qui nous permet de traiter en séquence toute la hiérarchie définissant une scène. On en déduit l'expression générale du logiciel de visualisation:

```
Pour (chaque ligne élastique de la scène) faire
   Déterminer la matrice de transformation caractérisant la
   ligne élastique en fonction des paramètres de vue.
   Si (la ligne élastique est dans le champ du vue) alors
      Charger en mémoire les formes associées aux constituants
      Pour (chaque constituant sélectionné) faire
         Appliquer la matrice de transformation de la
         ligne élastique à celle du constituant
         Si (le constituant est visible) alors
            Attribuer la forme adéquate associée
            Pour (chaque face de la forme) faire
               Appliquer la matrice de transformation
               aux coordonnées de la face
               Si (elle est visible) alors
                  Faire la projection perspective
                  Discrétiser et remplir la face
               Fin Si
            Fait
         Fin Si
      Fait
   Fin Si
Fait
Sauvegarder l'image
```

On remarque de plus que cette expression est très bien adaptée à chaque niveau de la hiérarchie à un traitement numérique en parallèle.

2.2. ASPECTS ORIGINAUX

2.2.1. CRITÈRES DE SÉLECTION

Nous allons ici exposer les conditions que doit vérifier chaque niveau hiérarchique pour qu'il entre dans le champ de vue de l'observateur.

Ligne élastique

L'encombrement absolu d'une ligne élastique est connu, il est défini par un parallélépipède rectangle décrit dans son résumé. Il est nécessaire de définir les transformations qui permettent de savoir si le parallélépipède entre dans le champ de vue.
A cette fin on construit une matrice de transformation géométrique caractéristique de la ligne élastique et des paramètres de vue de la scène. L'observateur reste donc fixe, c'est l'ensemble de la scène que l'on déplace et fait tourner. La définition de la matrice, que l'on appliquera ensuite à chaque constituant, s'obtient en appliquant les transformations suivantes sur la matrice identité:

a) transformations de la ligne élastique (attributs)
- rotation autour de la verticale
- facteur d'échelle
- translation

b) transformation de la scène
- translation du point de visée à l'origine
- rotation autour de la verticale
- rotation autour de l'horizontale
- translation au point de visée
- translation de l'obervateur à l'origine.

L'application de cette matrice (3,4) aux coordonnées définissant l'encombrement de la ligne élastique permet alors de savoir si elle entre dans le champ de vue de la scène.

Constituant

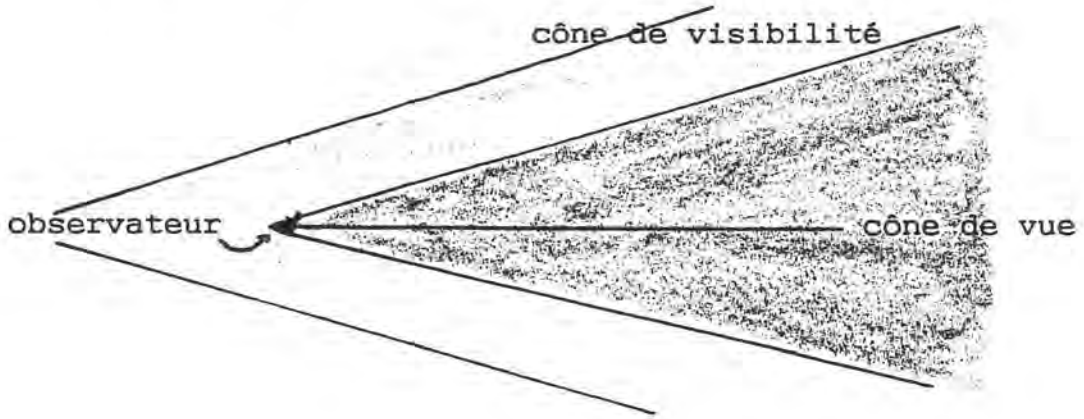
Nous avons vu que le nombre de faces dans une scène est élevé et, même en se limitant aux constituants visibles, reste important à traiter surtout dans un paysage (de 500000 à 1000000). Cela n'est en fait pas surprenant car les objets à manipuler sont de topologies et géométries complexes. Le nombre élevé des constituants a cependant l'avantage que l'encombrement de chacun d'eux est très réduit. On peut alors admettre certaines contraintes simplificatrices et permettre ainsi d'utiliser des algorithmes performants.L'examen des caractères topologiques permet de rejeter le constituant s'il n'est pas retenu pour la représentation.

Nous avons vu que 3 formes, de complexité (nombre de faces) décroissante, sont généralement associées à un constituant. L'affectation de chaque forme est réalisée en fonction de l'ordre du constituant pour les raisons suivantes:

- les axes d'ordres élevés sont nombreux et d'encombrement plus faible que les autres,
- l'affectation en fonction de l'encombrement du constituant et de sa distance à l'observateur nécessite un calcul qui serait en général plus coûteux que d'attribuer une forme détaillée.

En général, la sélection suivante donne des résultats satisfaisants: les entrenoeuds sont décrits par des parallélépipèdes dont le nombre de faces vaut 15 à l'ordre 1, 9 à l'ordre 2 et 3 au delà.

En considérant que l'encombrement d'un constituant est réduit, le test de visibilité est simple. On applique la matrice de transformation à son origine, et on dit que le constituant n'est pas visible si son origine n'est pas comprise dans un cône, dit de visibilité, contenant le cône de vue. Le cône de visibilité possède le même angle d'ouverture que celui de vue mais est translaté vers l'observateur (voir figure ci-dessous).



On élimine également le constituant situé devant le plan avant ou au delà du plan arrière en fonction de son origine.

Remarque:

Cette sélection est sommaire et très approchée; elle se justifie par la petite taille des constituants. Ses effets sont catastrophiques si l'encombrement du constituant devient important ou si l'on se rapproche considérablement. La méthode est exploitable pour des constituants ayant un angle solide d'un degré ou moins, ce qui est, en général, notre cas.

Faces

Le terme de face défini précédemment (en 1.2), peut décrire un polygone plan et convexe appartenant à un solide. Dans ce cas, il est inutile de traiter les faces dont la normale est orientée dans la même direction que celle du regard; elles ne sont pas visibles. La détermination de la normale pour chaque face, nécessaire pour l'illumination, permet d'en réduire le nombre.

Enfin, après application de la projection perspective, les faces dont les coordonnées sont externes à la fenêtre de vue sont rejetées. Cette opération peut exclure à tort certaines faces notamment dans les coins de la fenêtre de vue, mais un coupage classique serait trop coûteux en temps.

2.2.2. DISCRÉTISATION DES FACES

Nous avons, pour des raisons de performances, simplifié le traitement des faces en adoptant les hypothèses suivantes:

- tous les points d'une face sont à distance constante de l'observateur,
- tous les points d'une face ont le même index de couleur
- si une face décrit un polygone, celui-ci est simple et convexe.

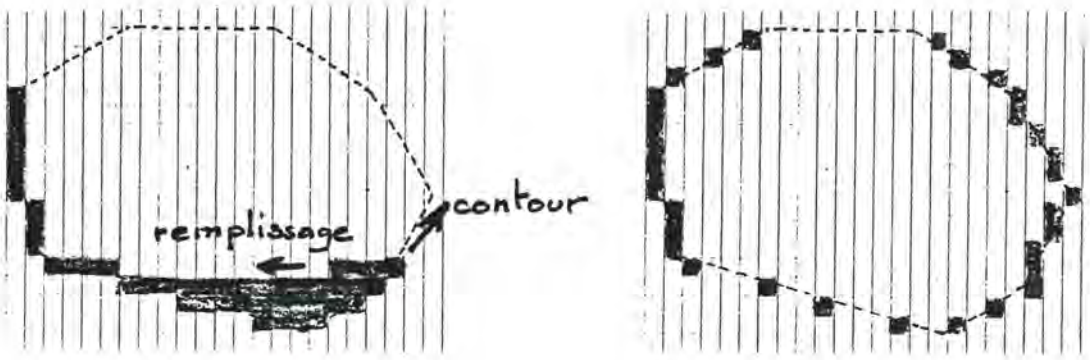
De ce fait, quelques algorithmes particuliers ont été développés et sont décrits ci-après.

2.2.2.1. Remplissage d'un polygône

L'algorithme présenté ici permet de tracer et remplir d'une même couleur un polygône simple et convexe défini par ses coordonnées bidimensionnelles entières et sa profondeur.

Son principe est simple et s'inspire du traditionnel algorithme incrémental de Bresenham (BRE65) de tracé de droite. Étendu aux segments de droites, il permet de définir le contour du polygône.

Le remplissage s'opère ligne par ligne en exploitant le fait que le polygône soit simple et convexe.
Il s'effectue en même temps que la définition du contour. En effet, comme le polygône est simple et convexe, dès qu'une ligne contient deux points du contour, on peut remplir la ligne entre les deux points (Figure I).



(I) Remplissage (II) Contour simplifié

Il suffit donc d'avoir une table contenant pour chaque ligne la position du premier point rencontré lors de la définition du contour.

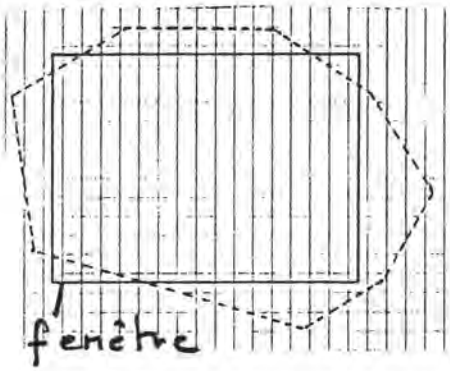
En exploitant le fait que le contour est formé de points consécutifs, on peut optimiser l'algorithme en ne définissant que les points du contour pour lesquels il y a variation de ligne (figure II).

Nous avons de plus étendu les possibilités de l'algorithme en y intégrant le coupage.

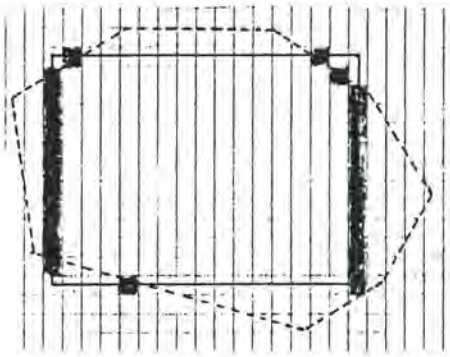
Le principe est simple:

- on ignore tout point du contour en dessous et au dessus de l'image,
- on rabat tout point extérieur à la fenêtre sur le coté le plus proche de celle-ci.

Exemple:



Polygône à traiter



Contour simplifié défini

Lors du remplissage, l'affectation des points dans la table décrivant l'image vérifie le test de profondeur typique du Z-buffer.

Remarque:

Nous avons également développé un algorithme sur le même principe, en déterminant pour chaque point sa profondeur exacte. Celui-ci s'est montré statistiquement 50 à 100 fois plus lent. Aussi, pour traiter des polygones de taille respectable, on procède à un découpage de ceux-ci. Ce point reste cependant à développer en utilisant, par exemple, les possibilités cablées d'un matériel performant.

2.2.2.2. Index de couleurs et modèle d'illumination

Index de couleurs

Pour des raisons techniques et de transportabilité les couleurs ne sont pas définies explicitement. Elles le seront lors de la visualisation sur un support où l'utilisateur définira une palette de son choix.

Nous avons vu (en 1.3) qu'à chaque forme est associé un index de couleur.

Celui-ci détermine une teinte à laquelle correspondent 9 index distincts dans l'image. L'attribution d'un index à une face est fonction du modèle d'illumination et d'une texture.

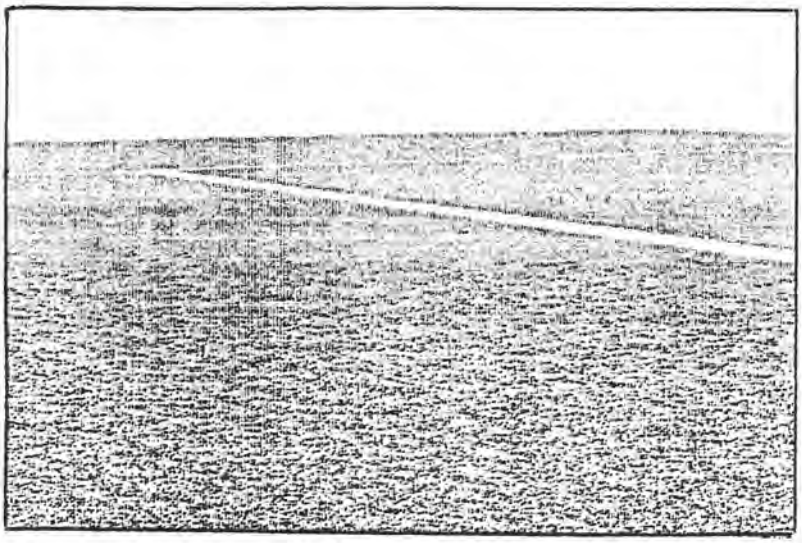
Modèle d'illumination

Il est simple; il attribue un index de couleur par face. l'index est défini par la valeur du produit scalaire entre la normale à la face et la direction d'éclairage. Nous avons limité le nombre d'index à 8. Si l'on note PS la valeur du produit scalaire et IND la valeur de l'index de la forme défini dans la scène, l'index de la face vaut: (IND - 1) - PS/8 + 1
Si le produit scalaire PS est positif, deux cas se présentent:
- si la face décrit un objet plan, on ne différencie pas le haut du bas de l'objet, PS est changé de signe;
- si la face est dite de dimension 3 (objet solide), PS est rendu nul.

Texture

Elle est simple et de type aléatoire. Chaque point de la face possède une probabilité de voir son index décrémenté d'une unité. Cette probabilité est fonction de la profondeur seule du point.
Exemple:

(croisement en rase campagne)



2.3. VISUALISATION

Un programme de visualisation standard permet la visualisation d'images de définition et résolution quelconque sur un support au choix.

Il n'utilise, en outre, que 3 ordres graphiques : le positionnement, le tracé relatif et l'affectation d'un index de couleur.

```
lig=col=ligp=colp=0 : entiers
index, indexp : couleurs
lire defx,defy /définition de l'image/
Tant que (on est pas fin de fichier) faire
     lire un index
     Si (index = 255) alors
           lire nombre_de_points
           lire l'index
        sinon
           nombre_de_point = 1
     Fin Si
     Pour (i=1 au nombre_de_point) faire
            point
     Fait
Fait


point :
    Redéterminer index
    Si (index > 0) alors
        Si (lig = defy) alors
            indexp = 0
            lig = 0,  col = col + 1
        Fin Si
        Si (index = indexp) alors
            Tracer (colp,ligp)
            Couleur (index)
            Aller (col,lig)
        Fin Si
        indexp = index, colp = col, ligp =lig
    Fin Si
    lig = lig + 1
```

L'algorithme autorise une visualisation des images sur des écrans graphiques n'ayant pas une palette de 255 couleurs.

La redétermination de l'index dans point permet en effet de réduire le nombre de classes d'index dues à l'illumination (9 par forme). La figure II montre un exemple n'utilisant qu'une seule classe par forme (pas d'illumination). On peut également redéfinir l'index en fonction de l'éclairage seul, pour des illustrations en noir et blanc (2 classes dans la figure III), ou n'utiliser qu'un unique index (figure I).

L'attribution des couleurs à chaque index s'effectue par le choix d'une palette de couleurs. Dans le cas général où l'on exploite tous les index de l'image, il faut définir 9 variations de couleurs pour une forme. Elles sont obtenues par interpolation en définissant la couleur de l'index le plus faible (sombre) et celle de l'index le plus élevé de la forme (éclairement maximum).

2.4. CONDITIONS TECHNIQUES

L'application graphique est développée en langage C. Son exécution nécessite près de 4 Mégaoctets de mémoire centrale pour une image de 1024*1024 points. Elle fait appel aux mêmes outils géométriques que la simulation (rotation dans l'espace, produit vectoriel...).

Performances:

L'algorithme de remplissage permet la définition de 10000 polygones par seconde (coupage compris). Le traitement complet dans la chaîne graphique permet d'obtenir la réalisation d'environ 1250 polygones à la seconde soit en moyenne 150 constituants sur le Data Général 10000 SX.

Dans ces conditions le calcul d'une image nécessite de 10 seconde à quelques minutes pour un végétal seul et peut demander une demi - heure pour un paysage. A titre d'exemple, le traitement graphique du cotonnier page précédante) nécessite entre 25 et 30 secondes.

Grâce au regroupement par colonnes des index de même valeur, l'encombrement mémoire des images est faible: 75 K pour le cotonnier, jusqu'à 700 K pour un paysage.

L'essentiel de cette application a été développé avec des moyens graphiques faibles, comme le montrent les illustrations proposées jusqu'ici. De nombreux points sont actuellement en développement grâce à l'acquisition d'une station graphique performante.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS, PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous évoquerons rapidement les principaux résultats issus de ce travail et les conclusions tirées. Les travaux en cours ainsi que les perspectives qu'ouvre cette simulation seront ensuite précisés.

1. RÉSULTATS

Le résultat de ce travail est en soi simple à définir. Son aboutissement est concrétisé par un produit fini, opérationnel et transportable constitué:
- d'un générateur de végétaux permettant une variété, un réalisme et une fidélité non encore égalés à ce jour;
- d'un logiciel de visualisation simple, efficace, général et indépendant de tout contexte graphique.

D'ores et déjà, un certain nombre d'applications aussi bien en botanique et agronomie qu'en synthèse d'images exploitent cet outil.

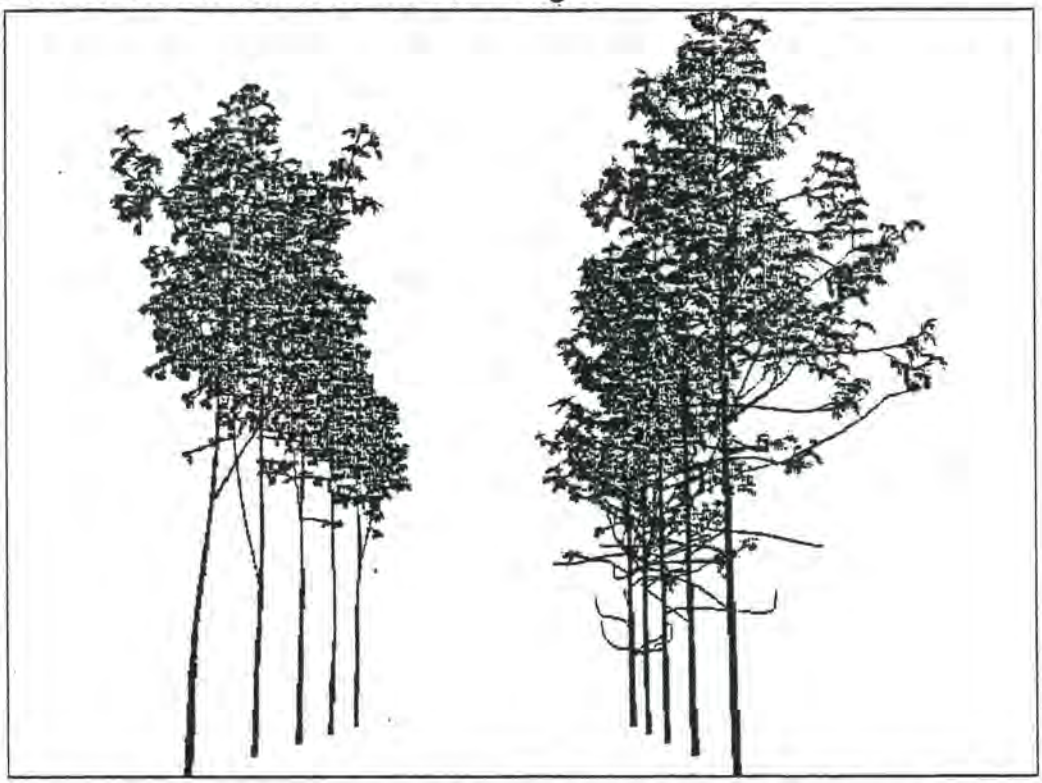
1.1. APPLICATIONS BOTANIQUES ET AGRONOMIQUES

La fidélité à la botanique permet d'exploiter scientifiquement les ressources du générateur de végétaux et les images des végétaux simulés.

1.1.1. APPLICATION À LA RECONNAISSANCE DES CLONES

À la demande de l'IRCA (Institut de Recherche sur le CAoutchouc), une mini-flore architecturale de différents clones d'Hévéa a été réalisée. Elle permet aux exploitants des plantations de reconnaître à partir des simulations les différents clones sur le terrain. Cette flore, uniquement réalisée à partir de dessins et photographies, a conduit, grâce à son succès, à un programme de recherche visant à modéliser l'effet destructeur du vent sur les plantations.

Les illustrations suivantes présentent 2 rangées constituées chacune d'un clone distinct du même âge.



Dans ce cas, l'application illustre l'intérêt pédagogique des images produites; outre les caractères distinctifs des deux clones, on voit également s'exprimer la variabilité au sein d'un même clone.

1.1.2. APPLICATIONS EN SIMULATION

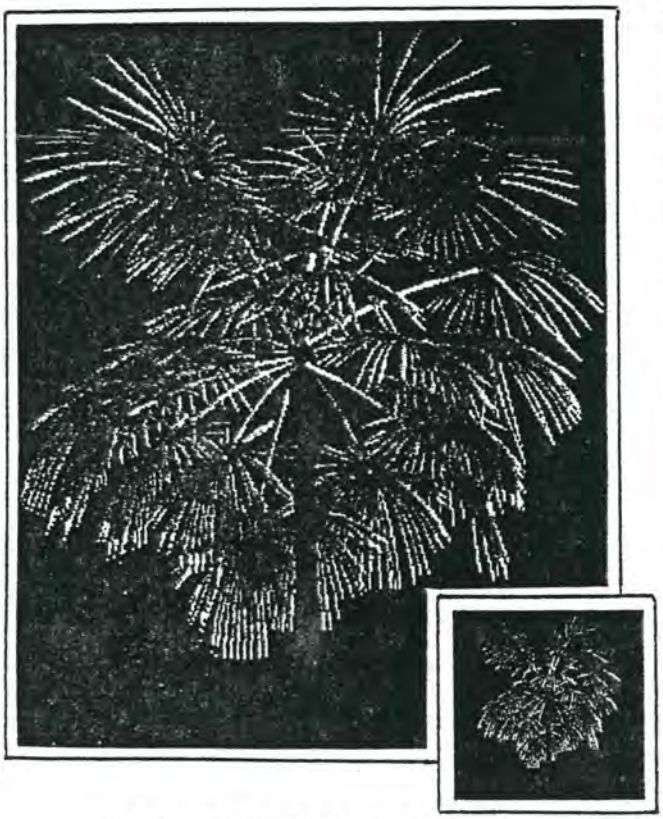
Dans certains contextes, la possibilité de simuler l'évolution d'un végétal et d'y intervenir (taille) permet de nombreuses applications. Bien que nous ne disposons pas encore d'outils en animation, deux essais prometteurs ont été réalisés.

Le premier a consisté en la réalisation d'un film pédagogique à vocation scientifique. Y sont représentés la croissance du Caféier (200 étapes de croissance pour 1 minute 30 de film), des animations tridimensionnelles sur un peuplier et un certain nombre de plantes.

Référence: Les Films du Centaure, réalisateur: P. de Roubaix

On trouvera sur la page suivante quelques séquences issues de ce film.(Voir également le Caféier en Annexes en 1.2)

Détail de taillis (rejets de souche)



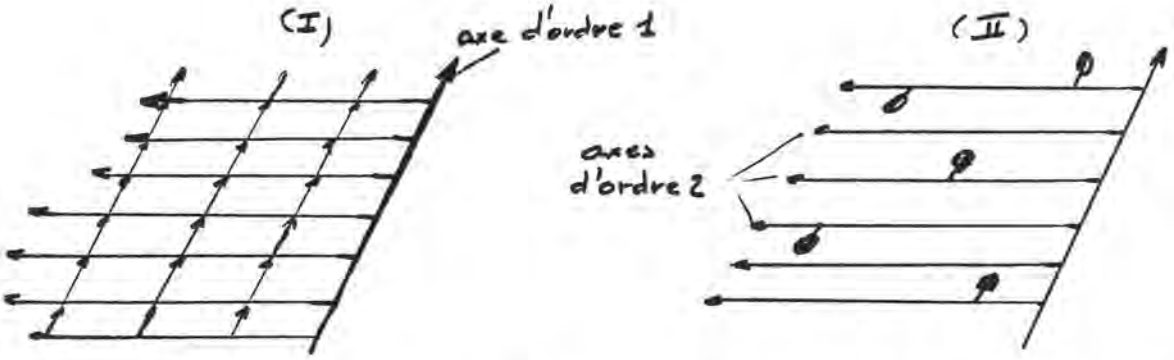
Cime de Palmier Ronier

Cime d'un Peuplier noir

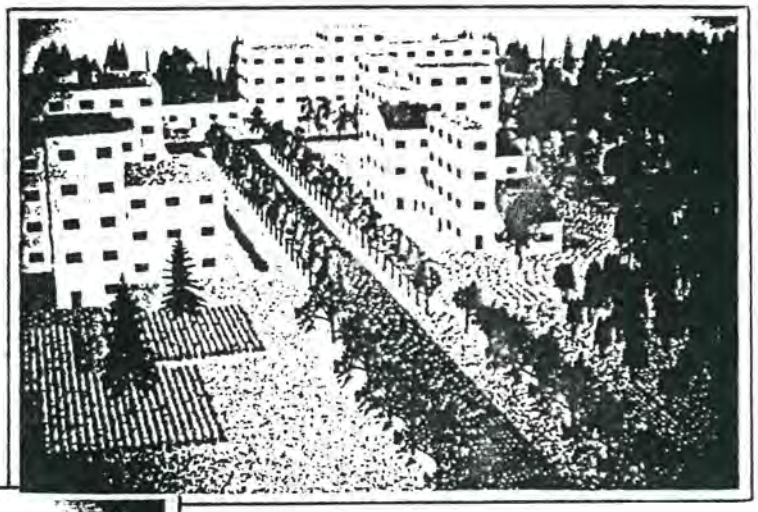
Le deuxième illustre les possibilités du logiciel dans un contexte paysagiste. Nous avons pour cela simulé l'évolution d'un paysage urbain à différents stades: 5, 10, 15, 25, 40 ans et à différentes saisons: été, automne et hiver. (pages suivantes)

La ville est construite par un générateur de bâtiments, que nous avons conçu sur des principes analogues au moteur de croissance. Le générateur conçoit de manière stochastique un ensemble de rues. Les seuls paramètres à définir sont les orientations et origines des rues ainsi que le nombre moyen de bâtiments par rue. Le résultat est décrit comme pour les végétaux dans une ligne élastique.

Le sol, ainsi que les nuages ont été générés par le moteur de croissance. (figure I pour le sol, II pour les nuages).
Nous avons, en effet, réalisé le sol en créant un rhizome (arbre souterrain) très régulier. La ligne élastique, constituée uniquement d'entrenoeuds, est habillée de carrés.
Pour les nuages, on a utilisé le même principe mais en permettant au rhizome de fructifier. Seuls les constituants dits "fruits" sont représentés en leur associant une forme pixel. Cette forme est obtenue par une image du feuillage d'un peuplier.



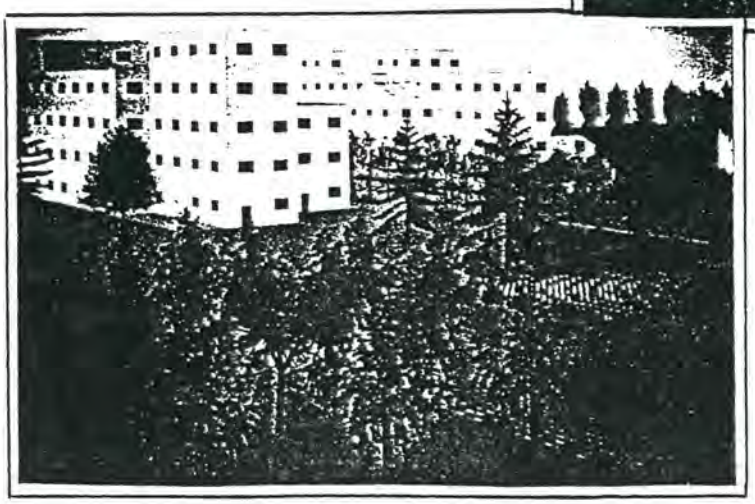
L'implantation des différents éléments intervenant dans la scène a été réalisée par le mini-éditeur de végétaux. Chaque fois que cela a été possible, les lignes élastiques ont été substituées par des constituants. En leur associant des formes pixel, le gain de temps est appréciable; ainsi la vue B, ne contenant que des formes végétales pixel (sauf sol et bâtiments), a été traitée en 6 minutes. Par contre, le dernier stade de développement a nécessité près de 40 minutes; les pins et arbres taillés du premier plan étant traités classiquement.



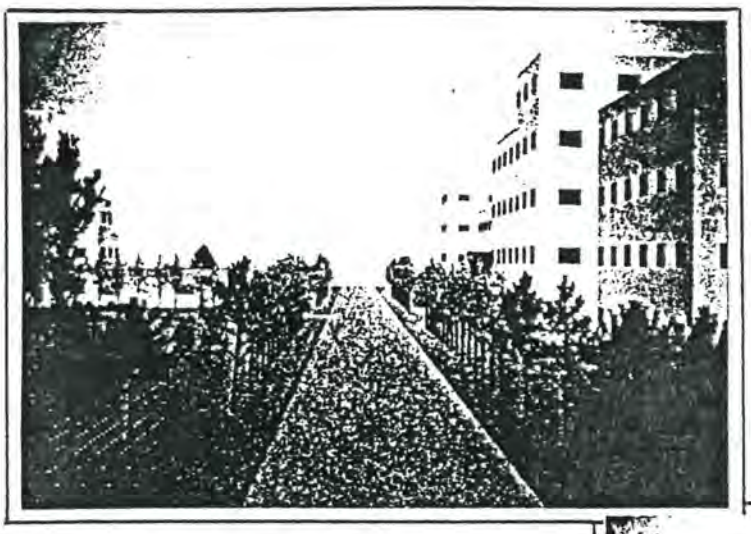
Ville, vue A,
en été

Ville, vue A,
en hiver

Ville, vue B,
en automne



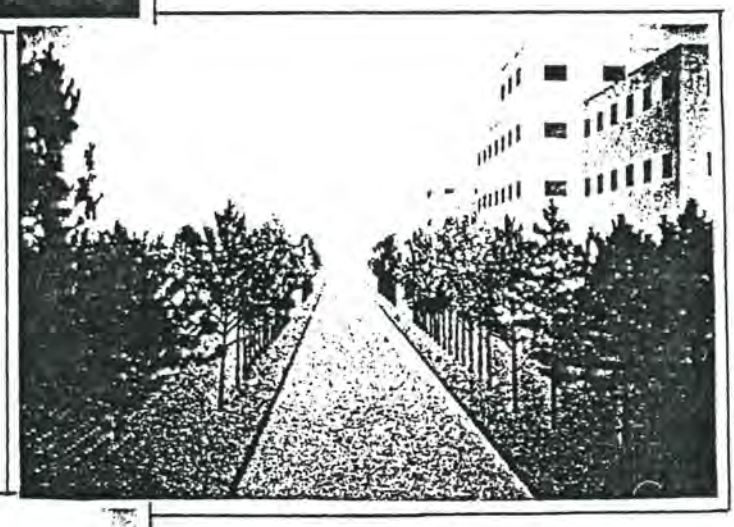
Ville, vue C,
en été



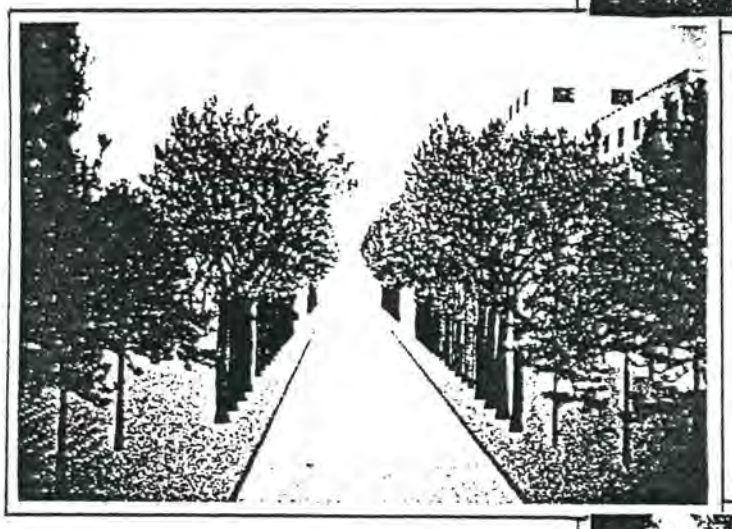
ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION DANS UNE RUE

Ville, vue D, en été

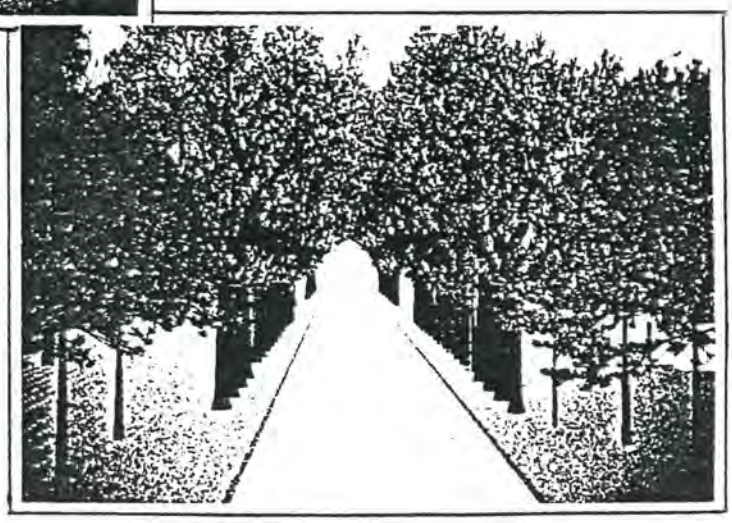
5 années après plantation



15 ans après plantation



25 ans après plantation



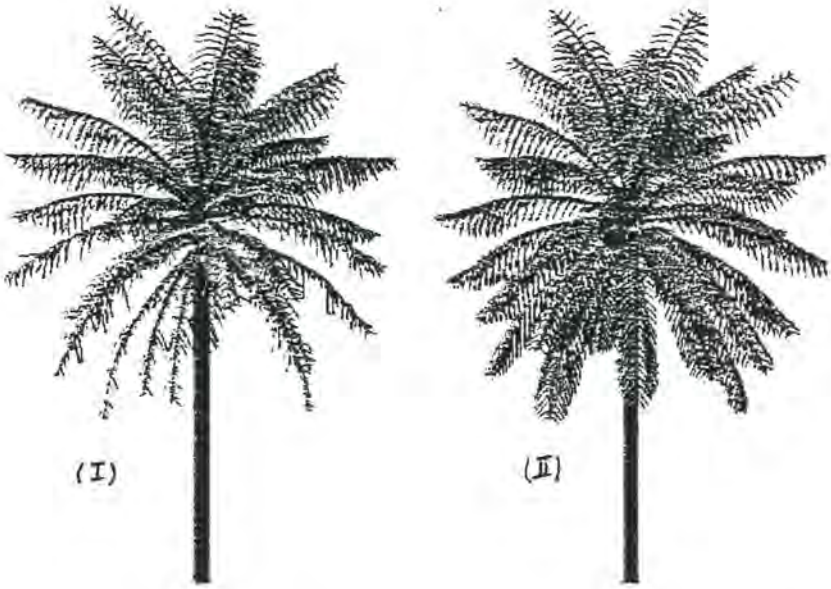
40 ans après plantation

1.1.3. APPLICATIONS AGRONOMIQUES

Dans le domaine agronomique, les applications de la modélisation mathématique sont déjà en cours depuis le début des années 80 (REF79), (RCJ85). Une interface incluant un programme de simulation d'attaques d'insectes et le générateur de végétaux permet de visualiser l'ampleur des dégâts (LEC87) sur la plante. (voir illustration).
L'exploitation du logiciel présenté n'a débuté que très récemment avec la collaboration de l'INRA qui utilise cet outil pour réaliser des maquettes et des simulations de photographies hémisphériques. Les chercheurs peuvent ainsi évaluer précisement les erreurs commises dans l'évaluation de la masse folliaire par des capteurs au sol. (AMR87).

I: simulation d'une attaque sur un palmier elaeis

II: palmier sain



1.1.4. RÉSULTATS SCIENTIFIQUES DÉRIVÉS

D'autres résultats dérivés de ce travail sont de nature plus complexe et difficile à évaluer.

En premier lieu, la validité de la modélisation botanique ne peut être appréciée que par une ou un ensemble de simulations. L'image permet en effet à l'expert un contrôle rapide des paramètres, ce qui serait difficile analytiquement.

De plus, la simulation numérique a obligé à penser clairement les concepts de modélisation. Si le modèle mathématique a considérablement évolué (surtout dans la géométrie), les répercussions au niveau botanique sont encore timides. La notion de modèle architectural, absente du modèle mathématique et de la simulation, apparaît comme une combinaison particulière d'un vaste ensemble. Ce que confirme C. Edelin en montrant que l'on peut trouver un "continuum architectural" et qu'il existe des "super-modèles" regroupant par exemple ROUX,MASSART, RAUH et ATTIMS. C'est sans doute là une amorce intéressante de l'usage de l'infographie en botanique (RCJ85).

Enfin, la puissance médiatique de l'image a permis de faire découvrir à un vaste public les travaux de F. Hallé, C. Edelin et P. de Reffye.

1.2. EN SYNTHÈSE D'IMAGE

Ce travail montre que la représentation fidèle des végétaux en image de synthèse nécessite une modélisation fine. Comme pour la représentation de la plupart des phénomènes naturels, on ne peut obtenir une grande variabilité, ni un bon réalisme et encore moins une fiabilité à caractère scientifique sans une modélisation rigoureuse des processus intervenant dans l'élaboration de ces phénomènes.

Le générateur de végétaux, conçu en respectant cet impératif, permet un réalisme et une fidélité de la description et du développement l'architecture des végétaux non égalés à ce jour. Les images produites permettent de reconnaître sans ambiguité une espèce végétale précise, voire un clone précis pour un expert.

L'application n'est, de plus, pas restrictive; malgré les contraintes exprimées par les lois de caractère botanique, il généralise bien des modèles utilisés jusqu'à présent. Ainsi, pour générer un objet fractal, on a juste à définir un ordre et sa réitération. Le générateur intègre aussi des modèles du type "trajectoire de particules" tel celui de B. Reeves (REE84), en matérialisant l'activité des bourgeons.

Aussi, malgré la simplicité du logiciel de visualisation, les images, originales par leur variabilité, leur complexité et leur réalisme, ont très vite suscité l'intérêt de l'audio-visuel et de l'industrie de l'image de synthèse. Une multitude d'images représentant des végétaux ont été synthétisées à partir du même générateur. Elles concernent des arbres tempérés, parfois taillés, sous divers âges et saisons, des plantes tropicales à différents stade de développement, des fleurs, des herbes...

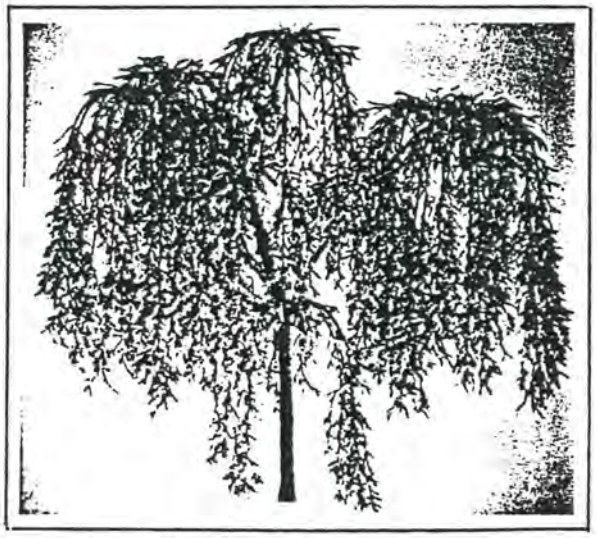
Présentées au Forum des Nouvelles Images de Monte-Carlo (février 1987), de nombreuses images furent publiées par les média grand public et la presse spécialisée. Citons, à titre d'exemple, Pour la Science (avril 1987), La Recherche (juin 1987), le Courrier du CNRS (numéro 299, spécial "imagerie scientifique"), Computer Graphic World (juillet 1987), Sciences et Vie (aôut 1987)...
Une série d'expositions fut également organisée parcourant notamment Dallas, Anaheim, Strasbourg, Toulouse, Montpellier, Constantine..

Les pages suivantes montrent une petite sélection de ces images: Feuillus, Conifères, Fruitiers et Paysages. (voir aussi en Annexe en 2.).

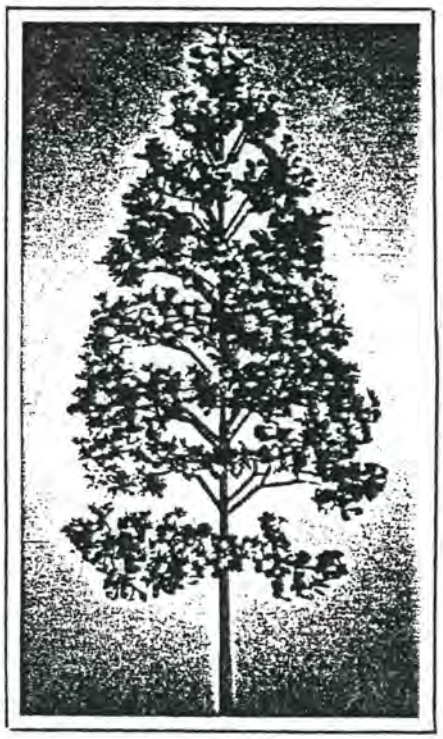
Dans la course aux nouvelles images,la Société d'Étude des Systèmes d'Automation (SESA) a acquis le logiciel. Elle l'implante en langage C sur la Station Graphique Iris. Le paramètrage, lourd pour un novice, est facilité par différents niveaux d'approche et permet par un tracé d'ébauche un contrôle interactif des paramètres. Le logiciel est commercialisé sous la marque AMAP (licence CIRAD).

Cotonnier

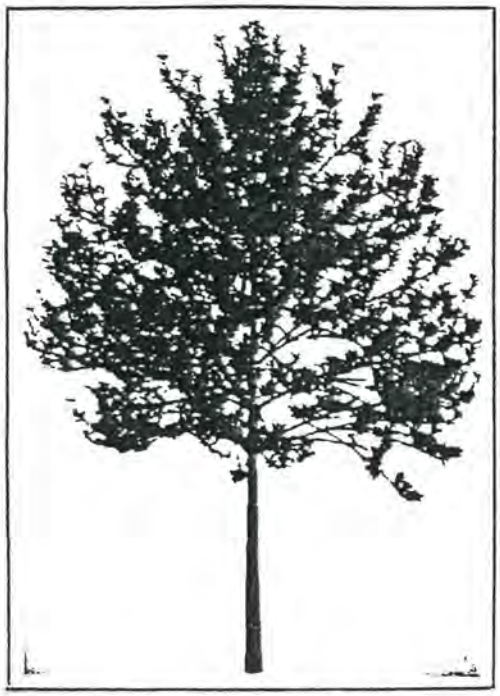
Jeune Épicea



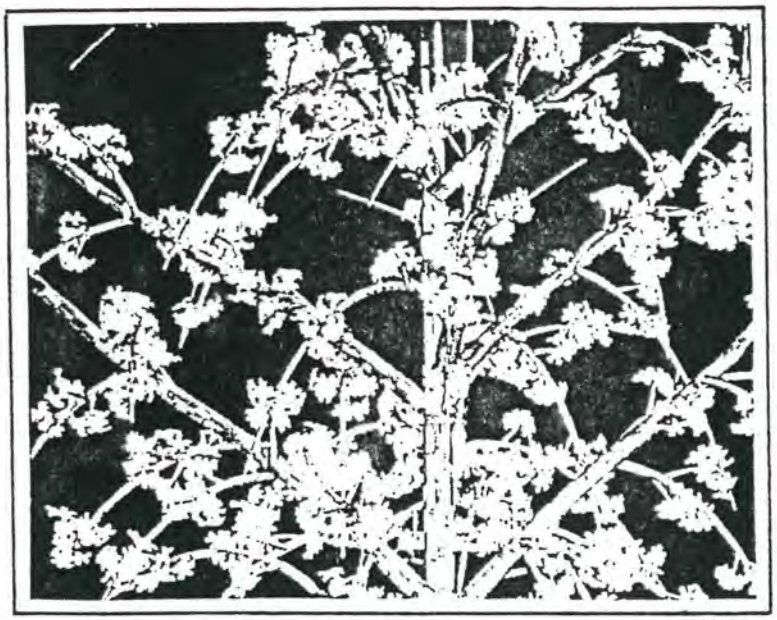
Saule pleureur



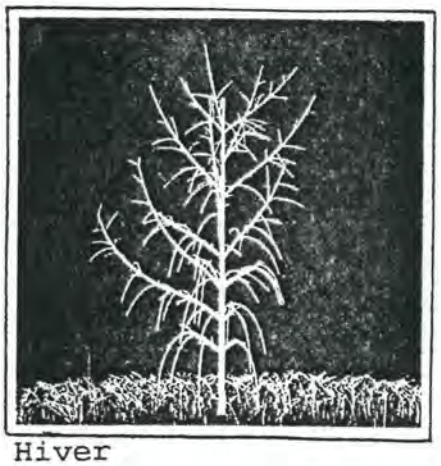
Magnolia



Pin de 15 ans



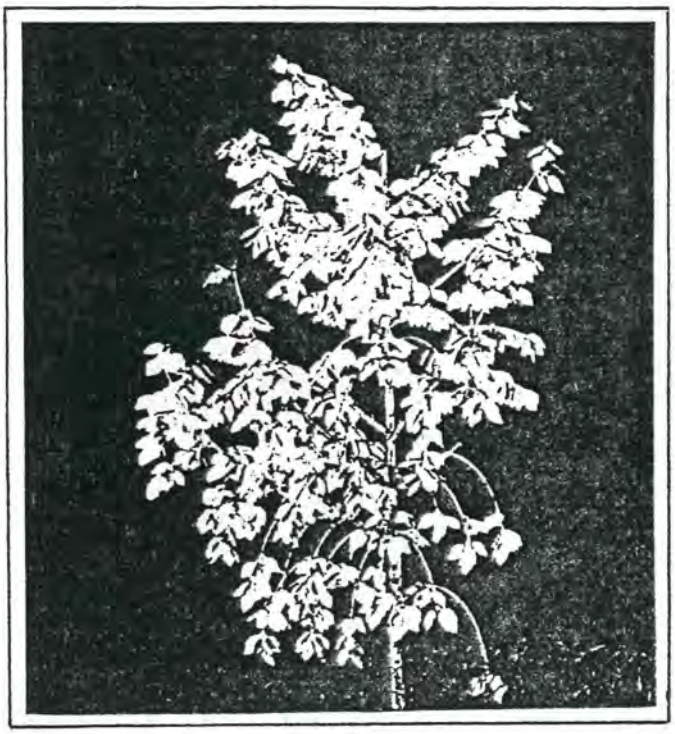
Détail



Hiver

Printemps

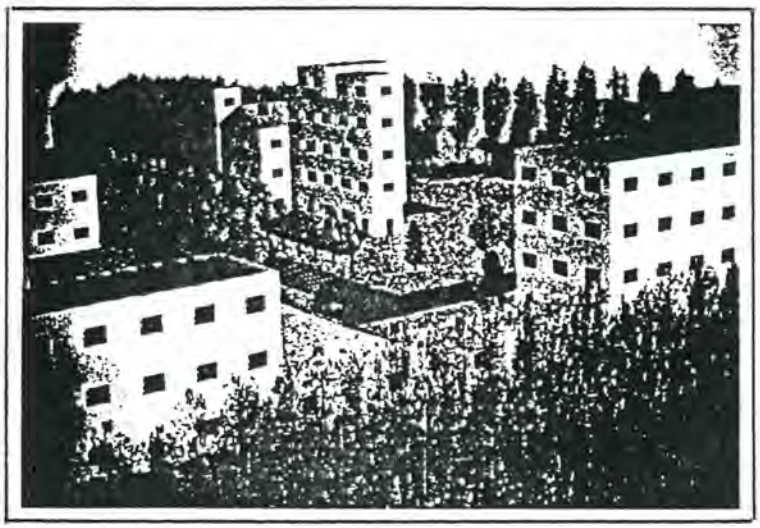
4 SAISONS D'UN ARBRE FRUITIER

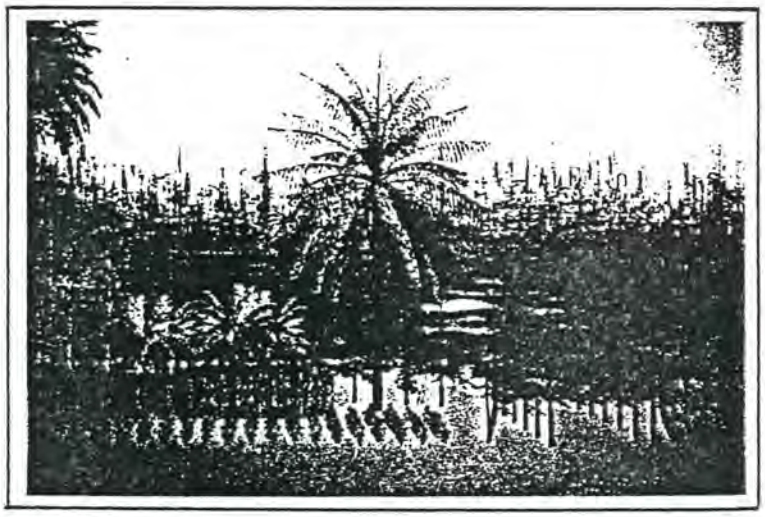


Été

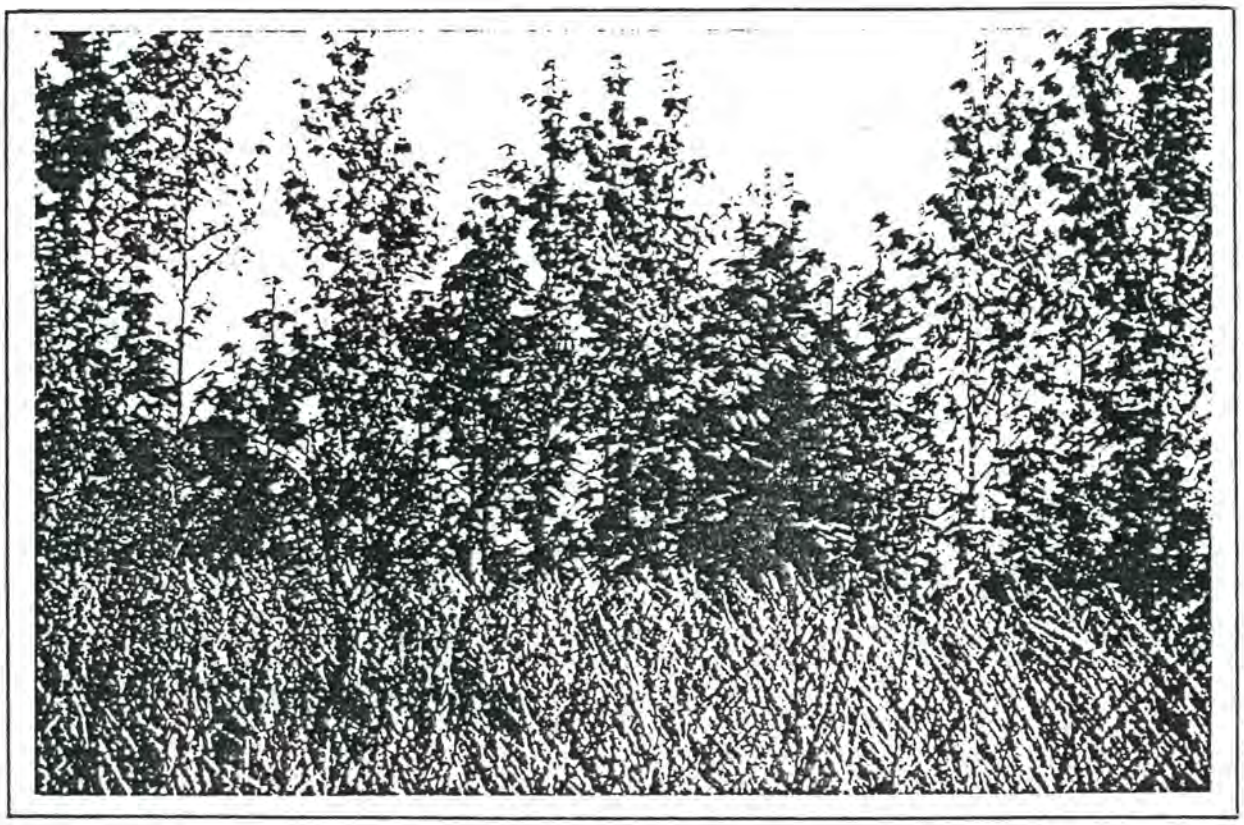
Automne

Paysage
Urbain





Jardin
Tropical



Paysage naturel automnal (Peupliers et Graminées)

2. PERSPECTIVES

2.1. TRAVAUX EN COURS

La méthode de simulation retenue dans ce travail (organisation des noeuds en ordre préfixé) est restrictive; elle ne permet pas une simulation réelle de la croissance d'une plante ni de tenir compte de certains facteurs comme la gêne entre branches et gère mal l'élagage. Aussi développe t-on au CIRAD les travaux suivants:
- l'implantation d'un générateur de végétaux utilisant d'autres organisations de noeuds,
- l'implantation d'un générateur sur une machine parallèle.

Une version bidimensionnelle pour micro-ordinateur, axée sur les possibilités pédagogiques du programme est également en cours d'élaboration.

L'acquisition récente d'une station graphique performante va de plus permettre des applications nouvelles et une meilleure qualité graphique des images. On y développe actuellement:
- des outils de saisie et de création de scènes,
- un outil de visualisation 3D interactif, orienté vers la CAO pour paysagistes,
- une chaîne graphique utilisant les facilités cablées de la station avec un modèle d'illumination plus élaboré.

2.2 APPLICATIONS ET TRAVAUX ENVISAGÉS

De nombreuses applications nouvelles sont en cours d'étude; on peut citer dans une liste non exaustive :
- la simulation de croissance et de taille sur des arbres européens (des mesures sont en cours sur le Platane et le Hêtre),
- la simulation et la représentation de plantes et de paysages fossiles,
- la simulation et la confrontation d'hypothèses botaniques sur des phénomènes intervenant pendant la sénescence des arbres,

- la réalisation de films pédagogiques explicitant les concepts de la modélisation,
- la simulation d'espaces paysagistes urbains ou de jeux.

Les applications agronomiques du modèle mathématique se développent également; la détermination précise de l'architecture de plantes utiles s'intensifie. De plus, le développement de modèles et de moteurs plus généraux est envisagé (extension aux parties racinaires, incorporation de modèles physiologistes...). La détermination d'un nouveau modèle d'illumination, permettant de simuler le climat radiatif dans et sur un couvert végétal est également en cours d'étude.

Il va de soi que de nombreux autres domaines sont intéressés par ce logiciel:
- le milieu forestier, pour l'évaluation du volume de bois exploitable,
- le milieu de l'enseignement,
- les milieux artistiques et audio-visuels.

D'autres études, plus fondamentales sont également envisagées:
- une modélisation généralisée des phénomènes linéaires se développant dans l'espace à partir d'un point fixé,
- un formalisme de la modélisation botanique par des outils tels que les grammaires de Lindenmayer (LIN76),
- l'utilisation du moteur de croissance dans des domaines de recherches informatiques et de physique.

ANNEXES

1. EXEMPLE DE PARAMÉTRISATION: LE CAFÉIER ROBUSTA

1.1 Liste commentée des paramètres activés pour la simulation

Indicateur de réitération	activé
Ordre maximal de ramification	3
Nombre d'éléments végétatifs	1 (feuilles)
Activité cambiale constante	0.015
" linéaire	0.005
" par ordre	0.6

commentaire:

Le caféier est une plante ayant la capacité de réitérer. L'étude de son diagramme architectural révèle 3 ordres d'axes. Nous le représentons ici en feuilles. L'activité cambiale est faible (0.005 représente l'accroissement du rayon par top d'horloge donc par unité de croissance supplémentaire); le rapport de diamètre de 2 axes d'ordres consécutifs est voisin de 0.6.

Réitération

Zone d'apparition de la réitération	12 - 12
Retard au démarrage	50
Ordre maximal de réitération	1
Nombre de réitérations par noeud	1
Type d'insertion de la réitération	4
Angle d'insertion	0°

commentaire:

La réitération apparaît sur l'axe d'ordre 1 dans une zone spécifique (au 12ème top d'horloge). Elle n'intervient qu'au bout d'un certain temps (lorsque la dimension de la plante a atteint 50), ce qui correspond à 25 mois environ. La réitération se développe de manière orthotrope, (type d'insertion 4, angle par rapport à la verticale nul).

Organes

Zone d'apparition de l'organe	0 - 10
Genre de l'organe	fixe
Nature de l'organe	2 (organe folliaire)
Nombre d'organes par noeud	2
Probabilité de présence de l'organe	1.0
Facteur d'échelle	2.
Type d'insertion de l'organe	2 (plagiotropie)
Angle d'insertion	85°
Angle de fléchissement	30°
Libellé explicite de l'organe	feuille du Caféier

commentaire:

Les feuilles apparaissent en bout d'axe et leur durée de vie est de 5 mois (10 UC). Chaque noeud en comporte deux; elles s'insèrent dans un plan et leur direction de développement est pratiquement orthogonale à celle de l'axe qui les porte. Vu leur taille, elles fléchissent légèrement.

Détail de chaque ordre

Ordre	1	2	3
Nombre d'axes par noeud	1	2	2
Rapport de rythme	1.	.77	1.
Probabilité de croissance	-.992	-.97	-.92
Probabilite de viabilité	1.	.99	.92
Age d'élagage	30	-	-
Type d'insertion	4	2	2
Module de YOUNG	2000.	250.	200.
Point d'application	.5	.75	1.
Angle d'insertion	.0	50.	50.
Angle de phyllotaxie	90.	180.	180.
Nombre de noeuds par UC	1	1	1
Probabilité de viabilité dans l'UC	1.	1.	1.
Probabilité de ramification	.95	.1	0.
Probabilité de réitération	1.	0.	0.
Longueur de l'entrenoeud	1.3	1.3	1.

commentaire:
Les unités de croissance sont réduites à un unique noeud. Elles se forment sous de bonnes conditions tous les quinze jours environ. Les axes d'ordre 2 se développent plus rapidement que les autres (le rapport de rythme vaut 0.77). La croissance est amortie; les méristèmes terminaux font de plus en plus de pauses à mesure qu'ils vieillissent; on utilise le signe de la probabilité pour définir sa nature (positif pour constante, négatif pour amortie).

L'axe d'ordre 1 suit une croissance peu amortie. Il est orthotrope et sa phyllotaxie est de 90°. Il plie en son milieu. Chaque noeud de l'axe possède une potentialité importante de ramifieret de réitérer. L'élagage est important: les axes d'ordre 2 ne subsistent en moyenne que 15 mois (30 UC).

L'axe d'ordre 2 suit une croissance amortie; leur moyenne de développement est de 32 UC (0.97/(1.-0.97)). Les axes d'ordre 2 apparaissent par verticilles de deux et sont plagiotropes, leur angle d'insertion est proche de 50°. Ils ne permettent pas le développement de la réitération mais exeptionnellement celui d'axes d'ordre 3.

Les axes d'ordre 3, peu nombreux, ont une croissance très amortie; leur âge moyen de développement est de 0.92/(1.-0.92) soit 11 UC. Ils sont plagiotropes et ne permettent pas des ramifications.

1.2 Illustration

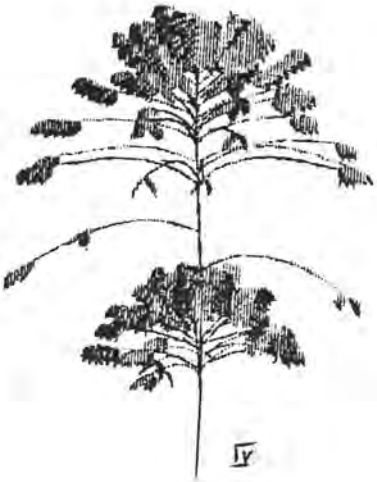
On trouvera, page suivante, 5 étapes de croissance du Caféier ainsi obtenu. (âges approximatifs: 13, 25, 38, 50 et 65 mois).

Les figures I et II montrent le jeune plan qui se développe selon son diagramme architectural. On remarque, dans la figure II, l'importance de l'élagage des axes d'ordre 2. La croissance amortie peut également être perçue en remarquant que le nombre des feuilles sur les axes d'ordre 2 diminue sur les vieilles branches (les plus basses).
La figure III montre l'apparition de la réitération. Les figures IV et V illustrent le développement de cette réitération et l'affaissement de l'ancienne cime.

I

II

III



IV

V

2. QUELQUES ILLUSTRATIONS

Les images présentées sur les pages suivantes, produites par le générateur de végétaux et la chaîne de visualisation, montrent les possibilités de l'application.

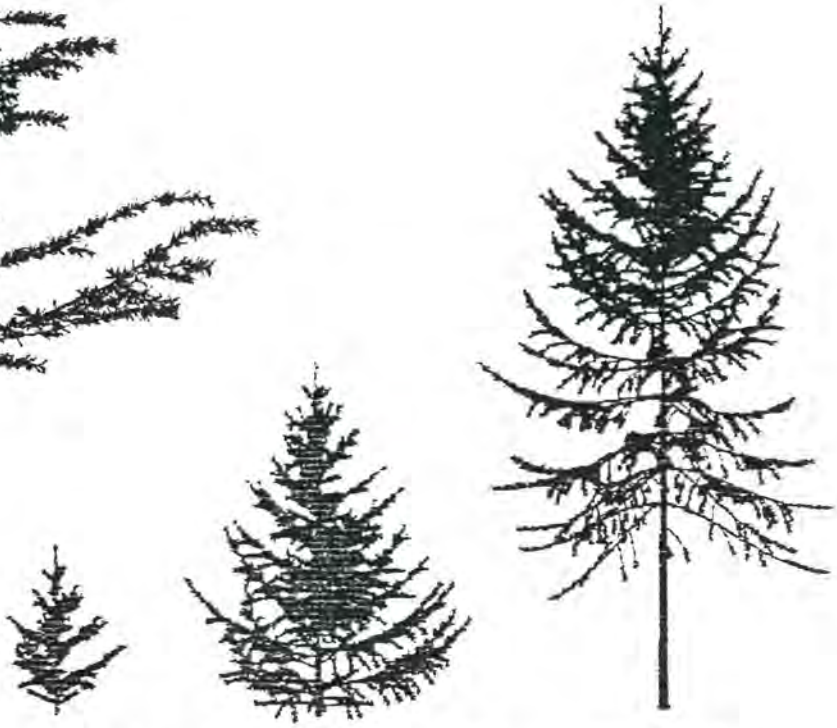
Les images, obtenues par copie d'écran, sont de résolution modeste (575 * 600 points) et n'utilisent que peu de variations de couleur (4 niveau de gris).

Les divers thèmes abordés sont:

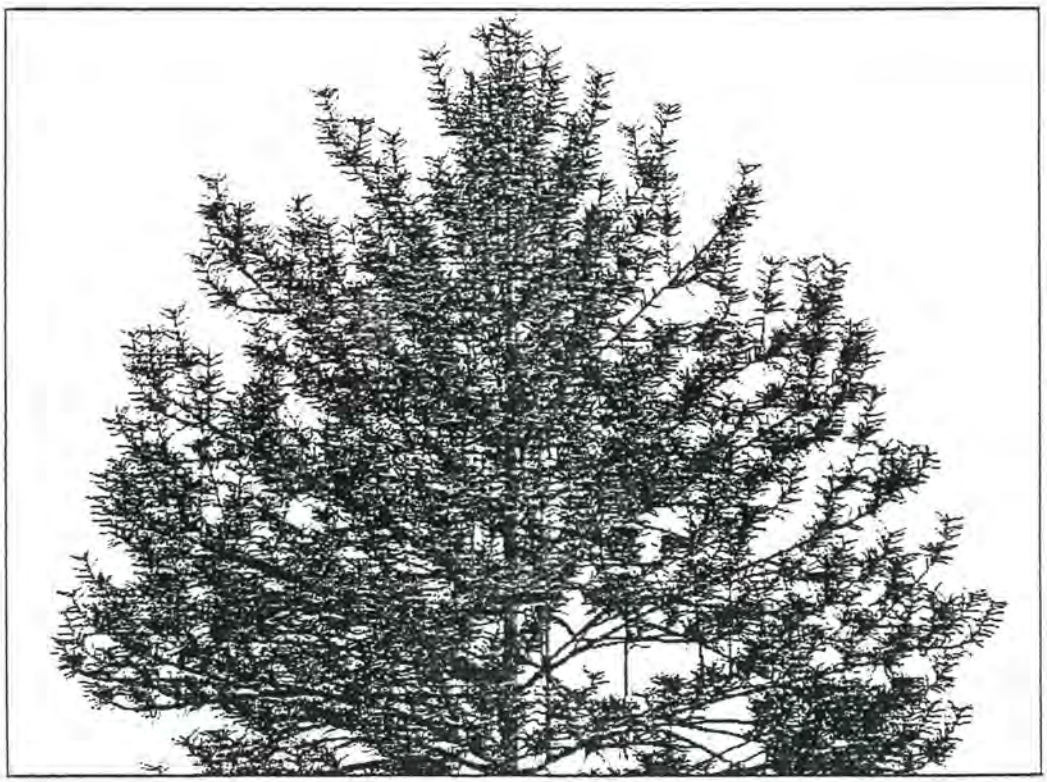
- des conifères
- des plantes tropicales
- des feuillus
- des feuillus taillés
- des herbes

CONIFÈRES

Jeune Cèdre



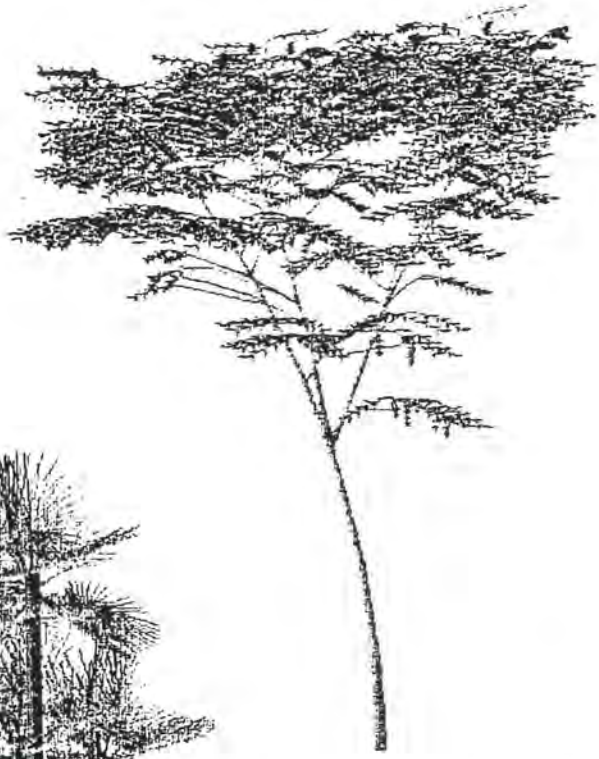
3 étapes de croissance de l'Épicéa



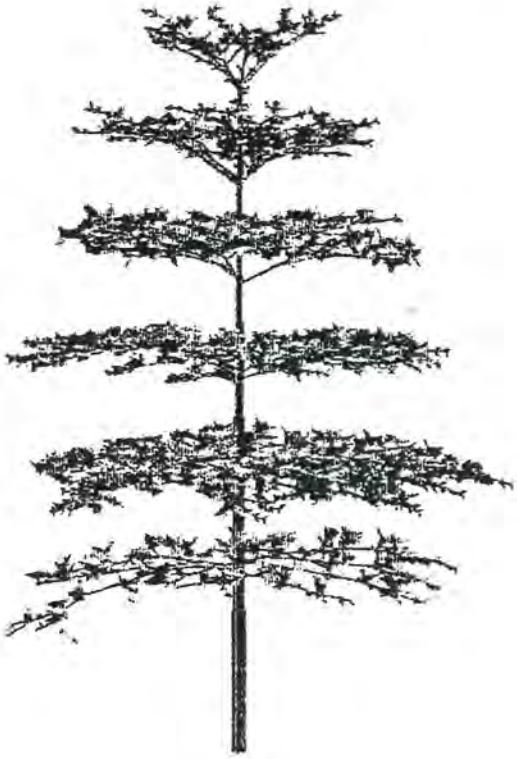
Cime d'un Pin de 15 ans

Frangipannier

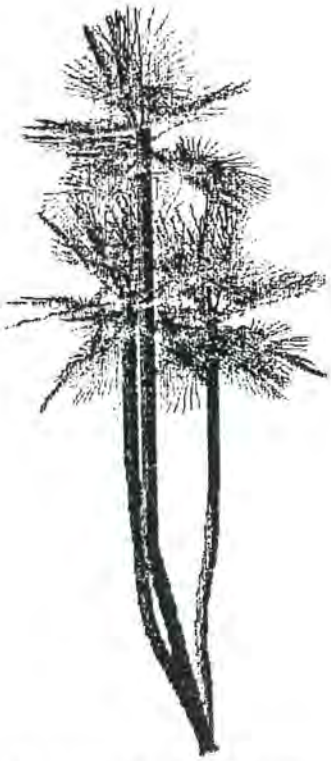
ARBRES TROPICAUX



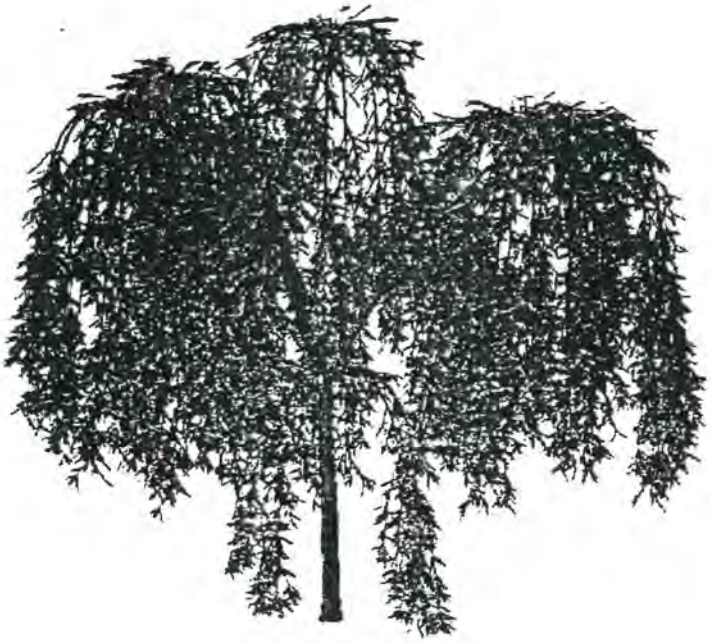
Jeune Jujubier



Terminalia



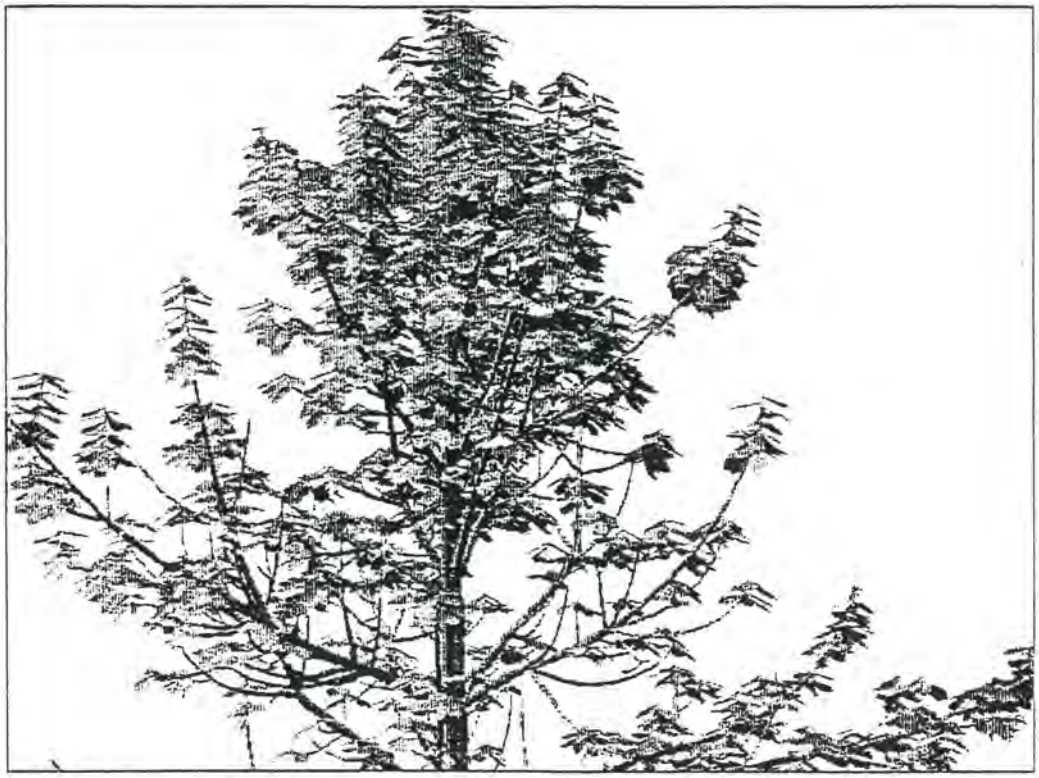
Palmier Faux-Doum



Saule pleureur

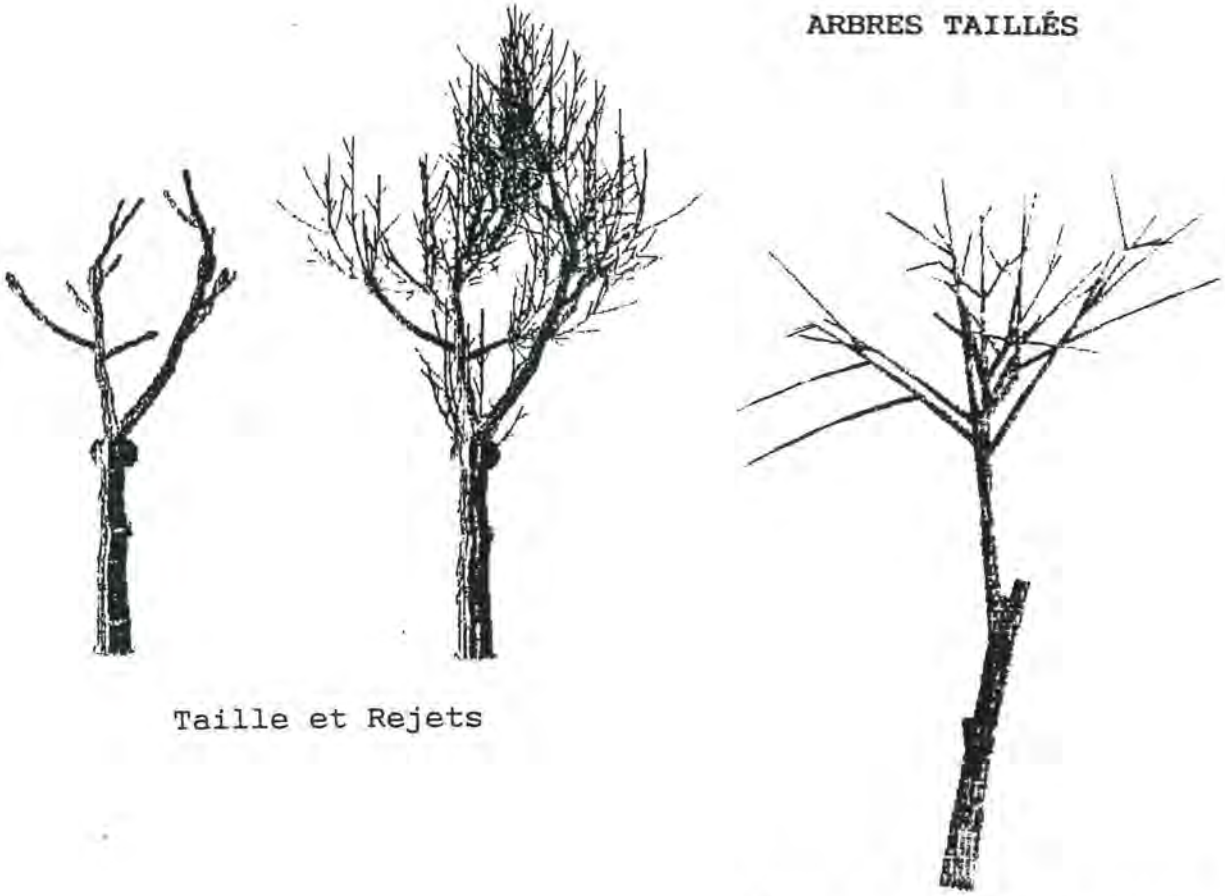
FEUILLUS

Peupliers
(Tremble) (d'Italie)



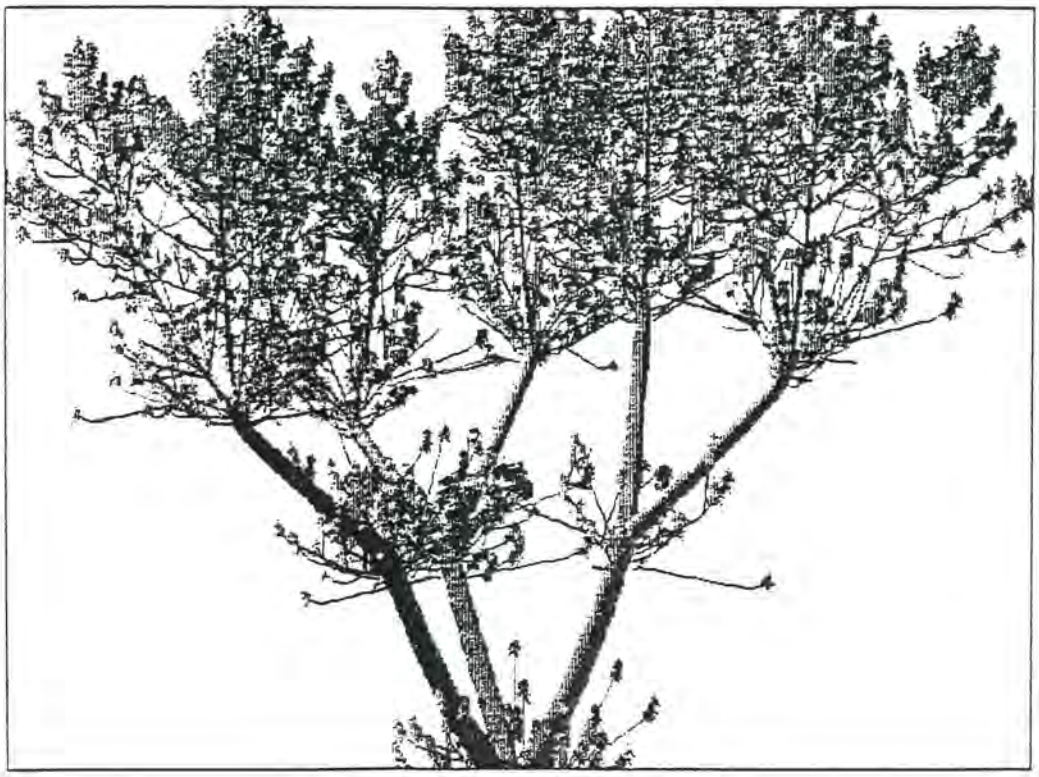
Cime d'un Peuplier Noir

ARBRES TAILLÉS

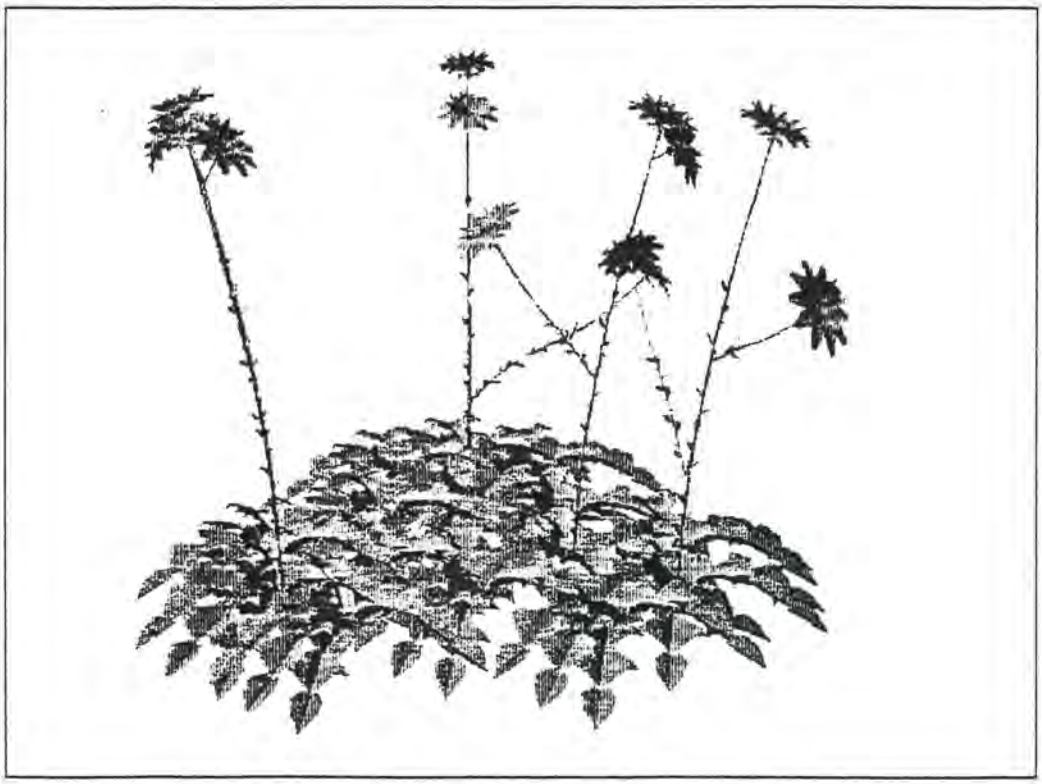


Taille et Rejets

Arbre fictif traumatisé



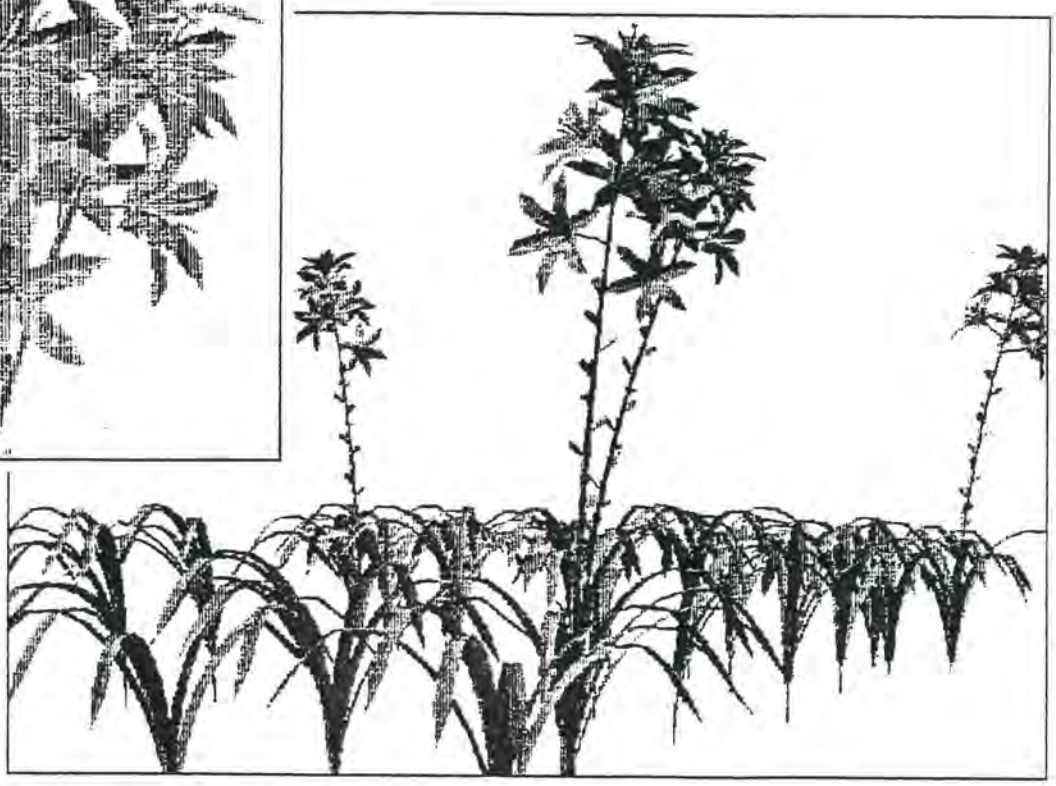
Cime d'un arbre taillé



Chicorée

(détail)

HERBES - FLEURS



Liliacées

BIBLIOGRAPHIE

Note: les références explicitement citées dans les chapitres précédants sont soulignées.

AMR87: F. Aries, P. Monestiez, Ph. de Reffye
Modélisation de la géométrie d'un couvert végétal: cas du maïs
Colloque COGNITIVA 87, Paris la Vilette, mai 1987

AON84: M. Aono, T.L. Kunii
Botanical tree image génération.
IEEE Comp. graph. & appli., 5, pages 10-34, mai 1984

BLO85: J. Bloomental
Modeling the mighty maple
Computer Graphics, Vol. 19, 3, pages 305-311, jul. 1985

BRE65: J.E Bresenham
Algorithm for computer control of a digital plotter
IBM System Journal, Vol. 4, 1, pages 25-30, 1965

COU71: Courbon
Résistance des matériaux
Dunod, Paris, 1971

DAU86: J.M. Dauget
Application des méthodes architecturales aux coraux, quelques traits communs aux formes vivantes fixées.
Thèse de l'U.S.T.L. Académie de Montpellier, 1986

DHN85: S. Demko, L. Hodges, B. Naylor
Construction of Fractal Objects with Iterated Function Systems.
Computer Graphics, Vol. 19, n°3, July 1985

DIX83: R. Dixon
The Mathematics and Computer Graphics of Spirals in Plants
Leonardo, Vol. 16, n°2, pages 86-90, 1983

EDE77: C. Edelin
Images de l'architecture des conifères.
Thèse de l'U.S.T.L. Académie de Montpellier, 1977

EDE84: C. Edelin
L'architecture monopodiale: l'exemple de quelques arbres d'Asie Tropicale.
Thèse doctorat d'état, U.S.T.L. Montpellier, 1984

EKP84: G. Enderle, K. Kansy, G. Pfaff
Computer Graphics Programming. GKS The Graphics Standard
Springer-Verlag, 1984

EVF86: G. Eyrolles, G. Viennot, J. Françon
Combinatoire pour la synthèse d'images réalistes de plantes.
2ème Semaine de l'Image Electronique: Nice, 1986

EYR86: G. Eyrolles
Synthèse d'images figuratives d'arbres par des méthodes combinatoires.
Thèse de l'Université de Bordeaux I, n° 2137, 1986

FIH77: J. B. Fisher, H. Honda
Computer simulation of branching pattern and geometry in Terminalia, a tropical tree.
Bot. Gaz., Vol. 138, pages 377-384, 1977

FIH79: J. B. Fisher, H. Honda
Branch geometry and effective leaf aera: a study of Terminalia branching
Am. J. Bot., Vol. 66, pages 633-644, 645-655, 1979

HTF81: H. Honda, P. B. Tomlinson, J. B. Fisher
Computer simulation of branch interaction and regulation by unequal flow rates in botanical trees
Am. J. Bot., Vol. 68, pages 569-585, 1981

HTF82: H. Honda, P. B. Tomlinson, J. B. Fisher
Two geometrical models of branching of botanical trees
Ann. Bot., Vol. 49, pages 1-11, 1982

FOL82: J.D. Foley, A. Van Dam
Fundamentals of interactive computer graphics.
Addison-Wesley, 1982

FOU87: A. Fournier
The Modeling of Natural Phenomena
Siggraph'87, Course #16, Anaheim, July 1987

FRA76: J. Françon
Arbres binaires de recherche: propriétés combinatoires et applications.
RAIRO infor. théor., Vol. 10, pages 35-50, 1976

FRA84: J. Françon
Arbres et nombres de Strahler dans diverses sciences.
Revue du palais de la découverte,
Vol. 12, 120, pages 29-36, juil.-août-sept. 1984

GAR84: G. Gardiner
Simulation of Naturel Scenes using Textured Quadric Surfaces
Computer Graphics, Vol. 18, n°3, July 1984

GIL78: W. K. Giloi
Interactive computer graphics.
Data structures, Algorithms, Languages.
Prentice-Hall, 1978

HAL70: F. Hallé, R.A.A. Oldemann
Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux.
Masson et Cie, 1970

HAL79: F. Hallé
Les modèles architecturaux chez les arbres tropicaux: une approche graphique.
Actes du colloque "Elaboration et justification des modèles - Applications en biologie".
Tome II, pages 537-550, Maloine S.A., 1979

HEG85: G. Hégron
Synthèse d'images: algorithmes élémentaires.
DUNOD-Informatique, 1985

HOR45: R. E. Horton
Erosioned development of steams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology.
Bull. geol. soc. America, Vol. 56, pages 275-370, 1945

HOT78: F. Hallé, R.A.A. Oldemann, Tomlinson
Tropical Trees and Forests: an architectural analysis.
Springer vertag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1978

JAE85: M. Jaeger
Représentation de végétaux.
Rapport de DEA, U.L.P. Strasbourg, Septembre 1985

JEA78: R. V. Jean
Phytomathématique
Les Presses de l'Université du Québec, Montréal, 1978

JEA83: R. V. Jean
Croissance végétale et morphogénèse
Masson, Paris, 1983

JBK85: R. Julien, R. Botet, M. Kolb
Les agrégats.
La Recherche, Vol. 16, n°171, pages 1334-1343, 1985

KAW82: Kawaguchi
A Morphological Study of the Form of Nature
Computer Graphics, Vol. 16, n°3, pages 223-232, July 1982

KER78: B. W. Kernighan, D. M. Ritchie
The C programming Language
Prentice Hall, New Jersey, 1978

LEC87: R. Lecoustre
Contribution to the development of an integrated control method against coelaenomenodera minta.
International Oil Palm Conferences
Agriculture 23-26 June 1987, Kuala Lumpur, Malaysia

LIE87: P. Lienhardt
Modélisation et évolution de surfaces libres.
Thèse de l'U.L.P. de Strasbourg, n° 196, 1987

LIF87: P. Lienhardt, J. Françon
Synthèse d'images de feuilles végétales.
3ème Colloque Image, Paris, 18-22 Mai 1987

LIN68: A. Lindenmayer
Mathematical Models for Cellular Interactions in Development
Journal of Theoretical Biology, Vol. 18, pages 280-315, 1968

LIR76: A. Lindenmayer, G. Rozenberg
Automats, Languages, Development
North-Holland Publishing Compagny, New York, 1976

LUC82: M. Lucas
La réalisation des logiciels graphiques intéractifs.
Collection de la direction des études et recherches d'Électricité De France. Éditions Eyrolles, 1982

MAN75: B. Mandelbrot
Stochastic models for the Earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands.
Proc. nat. acad. sci. USA,
Vol. 72, 10, pages 3825-3828, 1975

MAN77: B. Mandelbrot
Fractals. Form, chance, and dimension.
W. H. Freeman and Cie, San Francisco, 1977

MAN82: B. Mandelbrot
The fractal geometry of nature.
W.H. Freeman and Cie, San Francisco, 1982

MAR84: F. Martinez
La synthèse d'image. Concepts, matériels et logiciels.
PSI diffusion, Editests, 1984

NAB66: T. Naylor, J. Balintfy
Computer Simulation Technics
Wiley, New-York, 1966

NOZ85: R. Nozeran
Le mouvement morphogénétique spécialement chez les végétaux supérieurs perennes.
Colloque international "l'Arbre",Montpellier,9-14 sept.1985
Naturalia Monspeliensia, pages 415-430, 1986

OLD74: R.A.A. Oldemann
L'architecture de la forêt guyanaise.
ORSTON-ed., mémoire n° 73, 1974

OPP86: E. Oppenheimer
Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees.
Computer graphics, vol. 20, 4, pages 55-64, August 1986

QUE86: Ph. Quéau
Éloge de la simulation.
De la vie des langages à la synthèse des images.
Collection milieux, Champ Vallon, I.N.A., 1986

RCJ85: Ph. de Reffye, C. Edelin, M. Jaeger, C. Cabart
Simulation de l'architecture des végétaux.
Colloque international "l'Arbre",Montpellier,9-14 sept.1985
Naturalia Monspeliensia, pages 223-245, 1986

REE83: W. T. Reeves
Particle Systems
A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects
ACM, Vol. 2, n°2, pages 91-108, April 1983

REE85: W. T. Reeves
Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems
ACM, Vol. 19, n°3, pages 313-322, 1985

REF76: Ph. de Reffye
Modélisation et simulation de la verse du Caféier à l'aide de la résistance des matériaux.
Café-Cacao-Thé, vol. XX, n°4, décembre 1976

REF79: Ph. de Reffye
Modèlisation de l'architecture des arbres tropicaux par des processus stochastiques.
Thèse doctorat ès Sciences n° 2193, Paris-Sud, 1979

REF80: Ph. de Reffye
Combinatoire des phénomènes naturels fixés
Mémoire personnel de l'auteur, 1980

ROA76: D.F. Rogers, J.A. Adams
Mathematical elements for Computer Graphics.
Mc Graw-Hill Book Company, 1976

ROG85: D. F. Rogers
Procedural elements for Computer Graphics
Mc Graw-Hill Book Company, 1985

SMI84: A. R. Smith
Plants, Fractals and Formal Languages
Computer Graphics, vol. 18, n°3, pages 1-10, July 1984

STO86: H.E. Stanley, N. Ostrowsky
On growth and form.
Martinus Nijihoff Pub., Dortrecht, 1986

STE78: P. Stevens
Les formes dans la nature.
Seuil, Paris, 1978
(traduction de :)
Pattern in nature.
Little, Brown and Cie, 1974

STR52: A. N. Strahler
Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology.
Bull. geol. soc. of America,
Vol. 63, pages 1117-1142, 1952

THO61: D. W. Thompson
On Growth and Form
Cambrige University Press, 1961

WEC83: C. L. Weeks, J. C. Comfort
The growth Process of Tropical Trees:
A Simulation with Graphic Output
Proceedings of the 1983 Winter Simulation Conf., p. 649-657