

Synthèses

Architecture et croissance des plantes

Modélisation et applications

Philippe de Reffye, Marc Jaeger, coordinateurs
Daniel Barthélémy, François Houllier



éditions
Quæ

Table of Contents

[Architecture et croissance des plantes - Modélisation et applications](#)

[Soutien de l'ouvrage](#)

[Remerciements](#)

[Préface](#)

[Introduction](#)

[Sur la croissance des plantes...](#)

[Sur l'architecture des plantes...](#)

[Les modèles architecturaux de la botanique à partir de 1980](#)

[Les modèles de plantes virtuelles de l'informatique à partir de 1990](#)

[Les modèles de plantes computationnelles de l'agronomie à partir de 2000](#)

[Des difficultés dans l'usage des plantes computationnelles](#)

[Le modèle GreenLab](#)

[La modélisation mathématique du fonctionnement des méristèmes et du développement de l'architecture végétale](#)

[La modélisation mathématique du fonctionnement des organes et de la croissance végétale](#)

[Le passage de la plante individuelle au peuplement](#)

[La visualisation des plantes et des peuplements végétaux](#)

[Partie 1 - Modélisation du développement de l'architecture des plantes](#)

[Chapitre 1 - Notions botaniques sur l'organisation des structures végétales](#)

[Entités botaniques d'une structure végétale](#)

[Notions d'âge chronologique des méristèmes](#)

[Aspects déterministe et stochastique de l'architecture des plantes](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 2 - Les équations du fonctionnement et de la production des méristèmes](#)

[Modélisation du fonctionnement des méristèmes](#)

[Validation du modèle stochastique de fonctionnement des méristèmes sur les plantes cultivées](#)

[Méthodes d'analyse architecturale : une approche peu usitée](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 3 - La simulation des structures et des architectures végétales](#)

[Aspects qualitatifs et quantitatifs de la simulation du développement des plantes](#)

[Simulation de l'architecture des plantes avec un axe de référence](#)

[Modélisation et simulation du développement des structures végétales par un automate botanique](#)

[Automate et architecture végétale](#)

[Structure simulée et structure potentielle](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 4 - Dénombrement des phytomères produits par les structures végétales : les opérateurs du développement](#)

[Modèles d'arbres aléatoires simples calculables par formule](#)

[Modèles d'arbres aléatoires complexes, calculables par opérateurs de développement](#)

[Opérateurs du développement dans le cas stochastique complexe de l'automate à double échelle](#)

[À retenir](#)

[Partie 2 - Modélisation de la croissance de l'architecture des plantes](#)

[Chapitre 5 - Modélisation de la croissance végétale, les opérateurs de croissance : cas déterministe](#)

[Processus biologiques de base de la croissance végétale](#)

[Tomsim, un exemple de modèle de culture](#)

[GreenLab, un exemple de modèle structure-fonction proche des modèles de culture](#)

[Demande de la plante, fonction du développement](#)

[Équations de la croissance](#)

[Fonctionnement du modèle GreenLab](#)

[Comportement du modèle GreenLab, cas de la croissance libre](#)

[Comportement du modèle, cas de la croissance limitée](#)

[Influence des paramètres de l'environnement](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 6 - Modélisation de la croissance végétale, les opérateurs de croissance : cas stochastique](#)

[Développement stochastique et croissance des axes](#)

[Croissance déterministe sous l'effet d'un développement des axes, continu et périodique](#)

[Croissance sous l'effet d'un développement des axes, continu et stochastique](#)

[Croissance sous l'effet d'un développement des axes, rythmique, synchrone et stochastique](#)

[Autres types de croissance d'arbres](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 7 - Modélisation de l'acropétalie et de la basipétalie chez les plantes herbacées](#)

[Étude du développement des herbacées](#)

[Équations génériques contrôlant les délais à l'expansion des organes](#)

[Séries organiques simples et composées chez les herbacées](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 8 - La croissance secondaire](#)

[De la dendrométrie](#)

[Intégration des modèles de la dendrométrie aux modèles structure-fonction](#)

[Modélisation de la croissance secondaire dans les modèles AmapHydro et GreenLab](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 9 - Interactions entre la croissance et le développement](#)

[Modélisation du développement déterministe en rétroaction avec la croissance](#)

[Modélisation du développement stochastique en rétroaction avec la croissance](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 10 - Fertilité des fleurs et production de graines](#)

[Schéma général de la formation des graines](#)

[La fertilité des caféiers](#)

[La fertilité des palmiers](#)

[La fertilité des cacaoyers](#)

[Cas de la fertilité du colza](#)

[Cas du soja](#)

[Cas du maïs](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 11 - Méthodes inverses et identification paramétrique de modèles d'architecture végétale](#)

[Limitations de l'usage de la structure topologique des plantes](#)

[Analyse des cimes](#)

[Analyse des séries organiques](#)

[À retenir](#)

[Partie 3 - Applications du modèle GreenLab aux plantes cultivées](#)

[Chapitre 12 - Validation du modèle GreenLab sur les plantes cultivées](#)

[Considérations sur l'estimation des paramètres du modèle](#)

[Mise en œuvre des méthodes inverses sur les plantes cultivées](#)

[Applications de l'analyse des cimes sur les plantes cultivées](#)

[Application de l'analyse des séries organiques sur les plantes cultivées](#)

[Simulation de la croissance et de l'architecture du caféier](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 13 - Le passage de la plante au peuplement](#)

[Introduction au peuplement végétal](#)

[Étude de la croissance du maïs dans son environnement](#)

[Effet de la lumière et de la température sur la croissance du chrysanthème](#)

[Valeur prédictive par le modèle GreenLab par rapport à des modèles de culture PBM, cas de la production de la betterave](#)

[Passage de l'arbre isolé au peuplement forestier](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 14 - Des variantes possibles sur la formulation des fonctions sources-puits](#)

[GreenLab continu](#)

[Variante possible autour des fonctions sources](#)

[Fonctionnement des organes](#)

[Variante de la modélisation du fonctionnement des organes puits](#)

[Implémentation d'un pool commun de réserves](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 15 - Calibration, implémentation et mise en œuvre du modèle GreenLab](#)

[Éléments de réalisation d'outils logiciels de simulation des plantes](#)

[GreenLab operator and universal plant simulator \(Gloups\), dernière génération d'outils basés sur la méthodologie GreenLab](#)

[Calibration](#)

[Partie 4 - Applications agronomiques et perspectives dans les autres domaines](#)

[Chapitre 16 - Modèles pour la représentation et la visualisation des plantes et des paysages](#)

[Bref historique des méthodes de simulation de plantes en synthèse d'image](#)

[Modèles informatiques de développement](#)

[Visualisation des modèles tridimensionnels \(structuraux\) de plantes simulées avec les formalismes inspirés de l'analyse architecturale botanique](#)

[Autres modèles de représentation du végétal](#)

[De la plante au paysage virtuel](#)

[À retenir](#)

[Chapitre 17 - Applications diverses de l'architecture des plantes](#)

[Diverses utilisations des maquettes de plantes](#)

[Génétique et modèle structure-fonction](#)

[Optimisation et modèle structure-fonction](#)

[À retenir](#)

[Conclusion - Discussions et perspectives scientifiques](#)

[Sur le positionnement scientifique de GreenLab](#)

[Sur les spécificités de GreenLab](#)

[Des spécificités liées au développement](#)

[Des spécificités liées à la croissance](#)

[Des applications futures ?](#)

[GreenLab The Chinese contribution to the development of the GreenLab model](#)

[Références citées](#)

[A – B – C](#)

[D – E – F](#)

[G – H – I](#)

[J – K – L](#)

[M – N – O – P](#)

[Q – R – S – T](#)

[V – W – X – Y – Z](#)

[Annexes](#)

[Glossaire](#)

[Opérateurs et variables](#)

[Liste des principaux sigles](#)

[Codes couleurs des figures](#)

[Auteurs](#)

[Contributeurs](#)

[Étudiants chinois et français associés aux recherches de 1999 à 2016](#)

[Quelques auteurs en photos...](#)

Architecture et croissance des plantes

Modélisation et applications

Philippe de Reffye, Marc Jaeger, Daniel Barthélémy, François Houllier, coordinateurs

Exemplaire dédié à M. Gérard Subsol

strictement réservé à son usage personnel

Écoutez mon cher, nous sommes tous des voleurs, mais au bout du compte nous serons jugés sur ceci : qui avons-nous choisi de piller et qu'en avons-nous fait ?

Martha Graham à un journaliste et citée par Simon Leys dans *Le bonheur des petits poissons*, 2008.

AVERTISSEMENT

Cet epub contient de nombreuses formules et équations mathématiques ; il est nécessaire pour les lire d'utiliser un *reader* capable d'exploiter la norme MathML. Les couleurs de certains schémas sont associées aux âges physiologiques et au fonctionnement des organes des plantes simulées. Le lecteur trouvera la légende de ces couleurs dans les figures concernées et en annexe de cet ouvrage. Il trouvera également en annexe la liste des opérateurs et des variables utilisés dans l'ouvrage.

AU

LECTEUR

ISBN : 978-2-7592-2622-1

Éditions

RD

78026 Versailles Cedex

Quæ

10

éditions
Quæ

www.quae.com



Pour toutes questions, remarques ou suggestions : quae-numerique@quae.fr

Soutiens de l'ouvrage

L'ouvrage fait l'objet d'un soutien par la Fondation Agropolis sous la reference ID 1600-027 à travers le programme « Investissements d'avenir » (Labex Agro ANR-10-LABX-0001-01).



Il a été également soutenu par le Cirad et l'Inra.



Il a été écrit à partir des recherches menées en **France** au Cirad, à l'Inra, à l'Inria, au CNRS, à Centrale Supélec (École centrale de Paris), à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, à l'université de Franche-Comté, à l'Institut technique de la betterave et à Bionatics SA ; en **Côte d'Ivoire** à l'université d'Abidjan ; à **Madagascar** à l'université de Mahajana ; au **Togo** à l'université de Lomé ; aux **Pays-Bas** à l'université de Wageningen ; en **Chine** à l'Université chinoise d'agriculture (CAU), à l'Académie chinoise des sciences (CAS), à l'Académie chinoise de foresterie (CAF), à l'Institute of Forest Resource Information Techniques, au Laboratoire franco-chinois de recherche en informatique, automatique et mathématiques appliquées (Liama) et au Centre d'études forestières du **Canada** (CEF).

Remerciements

PHILIPPE DE REFFYE

J'exprime ici toute ma gratitude aux chercheurs et aux responsables des institutions de recherche qui ont rejoint et soutenu les projets de l'unité de recherche mixte de botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations (Amap) et du modèle GreenLab sur le long terme.

La modélisation de la croissance et de l'architecture des plantes a fait l'objet de toute mon attention pendant ma carrière de chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), sur plus de quarante ans. Ma carrière a empiété souvent sur ma vie familiale et c'est grâce à la compréhension et à l'encouragement constant de mon épouse Catherine, que j'ai pu mener à bien les projets de recherche et l'encadrement des nombreuses thèses dont j'ai eu la responsabilité. C'est à elle et à mes enfants que j'exprime en tout premier lieu ma reconnaissance, pour avoir toléré, à la maison, des heures supplémentaires en modélisation, pendant les week-ends ou les vacances ! À eux, un grand merci.

Je l'ai dit fréquemment, l'introduction de l'architecture des plantes comme nouveau concept en recherche agronomique pour l'amélioration de la production végétale ne répondait à aucune nécessité ou programmation scientifique. À l'origine, dans les années 1970, la curiosité m'a amené à identifier et à quantifier le développement de l'architecture des caféiers, en modélisant le fonctionnement des méristèmes. La bienveillance des directeurs de l'Institut de recherches du café, du cacao et autres plantes stimulantes (IRCC) de Côte d'Ivoire (M. Belin et J. Capot), intéressés par cette approche, m'a permis d'entreprendre une thèse sur le sujet. Ils m'ont laissé toute liberté et ils m'ont donné les moyens de mon travail avec l'acquisition des premiers micro-ordinateurs disponibles sur le marché. C'est avec l'appui du physicien Bernard Lapasset de l'université d'Abidjan que j'ai pu m'initier à la simulation informatique.

Un projet de recherche de long terme comme celui de GreenLab nécessite non seulement une collaboration scientifique pluridisciplinaire suivie, mais aussi un fort appui institutionnel.

Dans l'histoire de l'unité de recherche Amap, j'ai une gratitude particulière pour les premiers chercheurs qui ont contribué à sa création et à son développement, ceux dont les actions et les projets ont débordé le cadre scientifique pour atteindre une valorisation industrielle. Merci à René Lecoustre et à Marc Jaeger pour avoir fait de Amap un pionnier dans la représentation des plantes et des paysages, à l'origine de la société Bionatics. Merci aussi à Joël Sor, directeur des systèmes d'information du Cirad, qui a soutenu le projet dans sa composante matérielle, logicielle et commerciale.

Une mention spéciale doit être faite pour des enseignants-chercheurs qui ont enrichi les projets Amap-GreenLab en y apportant leur savoir-faire et en lui donnant une reconnaissance dans leur propre discipline. En botanique : Francis Hallé et Claude Edelin, pour les concepts botaniques d'architecture des plantes introduits dans le modèle. En agronomie : Michaël Dingkuhn du Cirad, Ep Heuvelink de l'université de Wageningen et Jérémie Lecoeur de Montpellier SupAgro, Jean-Claude Maihol de l'Irstea pour les concepts des modèles de cultures et leurs adaptations au modèle. En informatique : Jean Francon, Claude Puech, Maurice Goursat, Jean-Pierre Quadrat pour avoir formalisé le modèle sous forme de grammaire, le rendant ainsi plus lisible aux mathématiciens. L'intérêt et le soutien qu'ont donné au modèle, les mathématiciens Philippe Flageolet, André Gagalowitz, Michel Fliess, Michel Sorine de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) et les informaticiens David Hill de l'université de Clermont-Ferrand et Jean-Daniel Zucker de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) ont constitué un précieux encouragement.

L'ouvrage s'appuie sur le travail des nombreux auteurs et contributeurs qui se sont engagés scientifiquement à ma suite, convaincus par l'intérêt du sujet. Grâce à eux, j'ai beaucoup appris de leurs disciplines et nous avons pu les faire dialoguer entre elles. Je les remercie tous pour avoir contribué, avec passion, à enrichir la pluridisciplinarité du projet. Il y a toujours un risque de prendre le chemin de l'innovation hors d'une programmation scientifique. Si on en juge par les milliers de citations qui mentionnent les nombreuses publications en commun issus du projet, l'investissement a été payé de retour.

Grâce à un appui pluri-institutionnel sans faille, toutes ces recherches sur la croissance et l'architecture des plantes ont été réalisées dans des structures créées spécialement pour cela. Ma gratitude va d'abord à Hervé Bichat et Jean-Marie Sifferlen, dans les années 1980 respectivement directeur du Cirad et secrétaire général en même temps que directeur du département Gerdat. Convaincus par la qualité du projet, ils ont tous deux décidé, de la création de l'unité Amap et ils ont soutenu son

développement. Les recherches en architecture des arbres tropicaux ont bénéficié d'un fort appui des anciens instituts du Cirad^[1].

C'est grâce à Alain Coleno, directeur du secteur végétal à l'Inra et à Yves Birot, directeur du département Forêt qu'Amap est devenu dans les années 1990, un laboratoire commun entre le Cirad et l'Inra, permettant ainsi de nombreux travaux sur l'architecture et les peuplements des arbres forestiers. Le modèle a aussi bénéficié du soutien des instituts techniques agronomiques, le Centre technique interprofessionnel fruits légumes (CTIFL), IDF et ITL.

En Chine, dans les années 2000, au laboratoire franco-chinois de recherche en informatique, automatique et mathématiques appliquées (Liama) commun entre l'Académie chinoise des sciences (CAS) et l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria), le projet GreenLab a vu le jour en coopération avec le Cirad, grâce à l'appui du professeur Ma, directeur de l'Institut d'automatique de Pékin, d'Olivier Monga, directeur français du Liama et de Gilles Kahn, directeur scientifique de l'Inria. Dirigé par le professeur BaoGang Hu, ce projet a suscité de nombreux échanges franco-chinois et il a permis le développement des aspects mathématiques et des applications agronomiques du modèle, en liaison avec l'Université chinoise d'agriculture (CAU).

Enfin Digiplante, dernier né des projets Amap et GreenLab, a été hébergé dans le projet Metalau de l'Inria à Rocquencourt (dirigé par Maurice Goursat), en liaison avec le Liama (Pékin) et le Cirad. Il a été ensuite transféré à l'École centrale de Paris (devenue Centrale Supélec) avec la création du laboratoire éponyme Digiplante, à l'initiative de Christian Saguez, directeur du Laboratoire de mathématiques appliquées aux systèmes (Mas). Désormais, Paul-Henry Cournède, directeur du projet, contribue, par son dynamisme, au développement du modèle GreenLab et encadre de nombreux doctorants qui développent le formalisme et les méthodes statistiques liées à GreenLab. Digiplante a ainsi permis de nombreux échanges franco-chinois sous forme de thèses ou de post-doctorats.

Il me faut citer enfin les contributions essentielles : en France, de l'Institut technique français de la betterave industrielle (ITB), de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea), aux Pays-Bas, de l'université de Wageningen, au Canada, de l'université du Québec à Montréal (UQAM) et au Togo, de l'université de Lomé.

Pour finir, j'adresse à l'équipe des éditions Quæ, et tout particulièrement à Françoise Réolon, toute ma reconnaissance pour la réalisation de cet ouvrage qui a nécessité un important travail éditorial et de préparation technique.

¹Institut de recherches du café, du cacao et autres plantes stimulantes (IRCC), Institut de recherches sur le coton et les textiles exotiques (IRCT), Institut de recherches pour les huiles et oléagineux (IRHO), Institut de Recherches sur le Caoutchouc (IRCA), Institut de Recherches sur les *Fruits* et Agrumes (IRFA).

Préface

Je rêve d'une botanique qui saurait se déterminer de façon autonome, selon ses propres règles, cessant d'être à la traîne derrière la physiologie animale ou humaine : prenant en compte la plante elle-même, comme une forme de vie originale, comme un modèle en matière d'autonomie et de restauration de l'environnement, elle pourrait retrouver sa place au centre des sciences de la vie. Dans notre monde de fric, de frime, de pub, de bruit, de pollution et de brutalité, quel meilleur témoignage que celui des plantes, belles et utiles, discrètes et autonomes, silencieuses et d'une totale non-violence ?

Francis Hallé^[2]

Depuis quelques années déjà, les livres stimulants du botaniste Francis Hallé ont apporté la preuve que les plantes avaient bien des choses à nous apprendre. Fascinés que nous sommes par les bêtes, nos frères en animalité, nous nous faisons encore bien souvent une idée étriquée du vivant, de la variété de ses formes comme de ses comportements et de ses stratégies. Il n'est donc nullement vain de chercher à représenter et à modéliser les plantes. Il se pourrait même qu'il y ait aujourd'hui une certaine urgence à le faire. Ne nous faut-il pas les représenter, les simuler — comme le botaniste patiemment les dessine encore — pour qu'enfin, plus largement, nous apprenions tous à les voir ?

Ce livre de synthèse rédigé avec soin et pédagogie par Philippe de Reffye et plusieurs de ses collègues français et chinois tombe à point nommé : il pousse encore plus loin l'admirable geste copernicien de décentrage encouragé par Francis Hallé car, en un sens, il en concrétise les attendus tant sur le plan technique et méthodologique qu'épistémologique. Ce que nous montre brillamment cet ouvrage, c'est qu'aujourd'hui peut-être, ce sont les modèles de plantes — au premier rang desquels figurent ceux de Philippe de Reffye et des équipes affiliées — qui nous indiquent le mieux ou le moins mal comment il conviendrait de modéliser et de simuler le vivant en général. À l'heure où de nombreux programmes de modélisation et de simulation à visée intégrative sont lancés, c'est-à-dire ces types de programmes de recherche visant à simuler un organe voire un organisme tout entier comme une cellule eucaryote complète, le cerveau ou encore le corps humain, et à l'heure où des débats font rage à l'échelle internationale au sujet des approches les plus susceptibles de permettre une modélisation sur ordinateur à la fois biologiquement pertinente et réellement prédictive, le livre de De Reffye et de ses collègues pourrait bien apporter des éléments de réponse décisifs.

Mais peut-il y avoir réellement de la science derrière ce qui peut apparaître de prime abord comme de simples simulations informatiques et de belles images ? Il y a quelques années encore, quelques-uns pouvaient en douter. Si certaines simulations peuvent effectivement n'être que des numérisations de scènes relevant de la détection de forme et de la synthèse automatique d'images 3D à visée purement descriptive, il convient ici de faire la part des choses. Les modèles mathématiques et les modèles de simulation de Philippe de Reffye et de ses équipes mènent à des calculs biologiquement significatifs et à des *images extrêmement sérieuses* car ils reposent sur une somme considérable de savoirs à la fois botaniques, agronomiques et mathématiques, savoirs patiemment accumulés, choisis, critiqués, confrontés puis patiemment imbriqués pendant une longue histoire dont j'ai tenté ailleurs de retracer les épisodes charnières^[3]. Je vais en évoquer quelques jalons ici pour mémoire. Quand je revois cette histoire après coup, avec ses tâtonnements et ses rencontres de hasard, avec ses opportunités aussi, et après en avoir plusieurs fois rediscuté avec Philippe de Reffye et ses collègues, je ne peux m'empêcher d'admirer le niveau d'abstraction, d'efficacité mais aussi et toujours le niveau de sensibilité à la diversité des plantes réelles qui sont désormais atteints par cette approche.

L'histoire de la construction progressive du modèle GreenLab — le modèle présenté dans cet ouvrage — s'est accélérée depuis une dizaine d'années mais elle a débuté il y a maintenant plus de quarante ans. Elle est intimement liée à l'ensemble de la carrière scientifique de Philippe de Reffye au Cirad, à son insatiable vocation de chercheur mais aussi à ses rencontres heureuses et à ses interactions précoces avec des collègues comme Hervé Bichat, Alain Coléno, Jean Françon, François Houllier, Daniel Barthélémy et bien sûr aussi avec tous ses doctorants, dont Marc Jaeger, Frédéric Blaise et Paul-Henry Cournède. À partir de l'enquête d'histoire essentiellement conceptuelle — mais aussi en partie institutionnelle — que j'ai proposée, on peut déceler quatre grandes périodes qui vont chacune de pair avec quatre grands types de modèles architecturaux de plantes.

La première période est celle des débuts et remonte au début des années 1970. À cette époque, Philippe de Reffye est jeune ingénieur agronome, en service à l'IFCC (Institut français du café et du cacao, qui allait plus tard rejoindre le Cirad à sa fondation), en Côte d'Ivoire. Dans le cadre initial d'une problématique agronomique de prévision de la fructification des

caféiers, il est conduit à montrer d'une part les limites des modèles biométriques alors habituellement employés et d'autre part l'intérêt qu'il y a à s'aider de l'ordinateur pour procéder à une représentation pas à pas — une simulation en ce sens — certes très schématique mais historiquement exacte, de l'architecture quasi-complète du caféier. Ce premier modèle informatique de simulation de l'architecture permet de déclencher, au cours du programme, les processus stochastiques, processus dont les paramètres sont calibrés sur les données de terrain. Ces processus simulent une à une les naissances des fruits du caféier. Cette première période voit donc l'apparition d'un modèle de simulation architecturale valant pour une seule essence, le caféier.

Pour sa thèse d'État de 1979, thèse dans le jury de laquelle Francis Hallé siège, Philippe de Reffye propose un moteur de simulation de même type mais rendu « universel », c'est-à-dire cherchant à simuler toutes les architectures des plantes végétales dans leur diversité, cela en allant au-delà du seul cas du caféier et en intégrant un grand nombre des particularités qualitatives et quantitatives auparavant répertoriées par les travaux des botanistes. L'idée-clé de ce travail consiste à considérer l'architecture d'une plante végétative comme le résultat de la dynamique de ses méristèmes, en lien avec la particularité du modèle architectural propre à son essence. Comme conséquence de cette idée, il convient de concentrer le moteur de simulation sur le fonctionnement des méristèmes.

Au début des années 1980, au retour de de Reffye en France, au Cirad, un collègue spécialiste de combinatoire et de mathématique discrète de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Jean Françon, amplifie la portée de cette recherche en l'orientant vers des interactions fécondes avec la combinatoire, l'algorithmique et l'informatique graphique. Les étudiants de Françon contribuent à améliorer l'algorithme, la programmation mais aussi le rendu graphique des simulations effectuées par le modèle de de Reffye. Dans le cadre du laboratoire créé au Cirad de Montpellier, alors intitulé l'Atelier de modélisation de l'architecture des plantes (Amap), devenu plus tard l'unité de recherche de botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations, cette troisième période verra le développement de plusieurs modèles de simulation universels toujours plus réalistes et toujours mieux conçus d'un point de vue informatique. Il s'avère cependant assez vite que le traitement computationnel efficace — privilégiant le calcul séquentiel — entre en contradiction avec la dynamique des méristèmes : les méristèmes fonctionnent en parallèle et non de façon séquentielle. D'autre part, les modèles de simulation d'Amap de première génération, même s'ils intègrent des savoirs hétérogènes déjà nombreux^[4] (dont ceux qui permettent de simuler la flexion mécanique des branches ou l'auto-élagage) et relevant en partie d'un retour de la structure sur le fonctionnement de la plante, sont considérés par beaucoup comme de simples modèles de description de structures. De fait, s'ils simulent bien le développement, ils ne sont pas à même de prévoir la production de matière par photosynthèse et donc la croissance secondaire en réponse à des conditions environnementales données, chose qui intéresse l'agronome au plus haut point. Dans le cadre d'une association désormais actée avec l'Inra et d'autres institutions comme l'université de Montpellier, François Houllier — directeur d'Amap au début des années 2000 — et Philippe de Reffye orientent résolument les modèles structurels existants vers la prise en compte de connaissances physiologiques et fonctionnelles : en intégrant des connaissances d'écophysiologie comme la « loi de l'efficience de l'eau » et la « loi de la réponse à la température », Amap tend à développer de plus en plus des modèles « structurels-fonctionnels » qui ne sont donc plus prioritairement des modèles de simulation. La priorité réside non plus d'abord dans le rendu topologique et graphique de la structure architecturale mais avant tout dans le réalisme de la production de matière en réaction à des conditions environnementales. Les images de simulation deviennent clairement secondaires bien que, par leur réalisme botanique structurel conservé et par leur aspect prédictif essentiel, elles contribuent toujours d'une part à la vérification des hypothèses du modèle et d'autre part à la diffusion remarquable (comme cela avait été le cas très précocement, dès les années 1980) des logiciels Amap vers d'autres métiers que ceux qui sont strictement liés à l'agronomie comme le paysagisme, l'urbanisme ou l'analyse et l'interprétation d'images satellitaires.

À partir du début des années 2000, on entre donc nettement dans une quatrième période, celle que j'ai proposé de nommer « période de remathématisation ». Cette période s'illustre par des avancées remarquables en termes de simplification mathématique et informatique des algorithmes mais aussi en termes de recentrage des concepts botaniques moteurs, cela en lien avec des chercheurs de l'Inria de France et de Chine, de l'Institut d'automatique de Pékin et de l'université d'agronomie de Chine. La structure auparavant simulée organes par organes est désormais calculée types de phytomères par types de phytomères : ce sont les quantités et les distributions des phytomères qui sont directement calculées. Leur naissance n'est donc plus simulée pas à pas. Comme on le verra dans cet ouvrage procédant de manière constructive, la partie de la théorie des processus stochastiques dite « théorie du renouvellement » est systématiquement employée en lien avec les concepts d'ordre de ramification et d'âge physiologique, cela pour mener à l'écriture non plus seulement de modèles de processus stochastiques mais directement d'équations algébriques reliant les moments ou les distributions des processus stochastiques qui sont en cause à chaque ordre. La simulation stochastique est donc moins présente que dans les logiciels « tout simulation » même si la variabilité finale des résultats obtenus reste semblable. Le nombre d'étapes de calcul s'en trouve considérablement réduit. Comme il est impossible de s'exprimer mieux que les auteurs eux-mêmes à ce sujet, je citerai ici brièvement un passage de la fin du chapitre 5 qui me paraît bien résumer la teneur de cette récente et formidable avancée :

À partir de l'automate botanique de GreenLab, quelle que soit sa complexité, on peut déduire des opérateurs compacts sous forme matricielle, qui permettent d'écrire des algorithmes récursifs qui factorisent le calcul du développement et qui donnent directement la moyenne et la variance des nombres de phytomères produits par catégorie, sans recours à la simulation stochastique. Le résultat le plus important est que le temps de calcul dépend de l'âge de la plante et non du nombre d'éléments à fabriquer, comme c'est le cas des simulateurs de plantes classiques. La liaison nombre de phytomères produits et temps de calcul est quadratique. Un autre résultat important est que le mode quasi aléatoire basé sur les sous-structures donnent des simulations stochastiques de qualités comparables aux simulations pseudo aléatoires pour la moyenne et la variance avec des performances bien meilleures, car basées sur la factorisation en sous-structures. Les temps de calculs sont proportionnels à la taille de la collection et au carré de l'âge de la plante comme pour le mode algorithmique. De plus, le mode quasi aléatoire permet aussi de dessiner les plantes stochastiques d'une façon plus efficace. Ce mode est par conséquent le choix du modèle GreenLab.

Ainsi, après une période qui a favorisé l'intégration de modèles de divers aspects ou organes de la plante sous la forme de simulation à base de modèle pluriformalisé, une période de maturité a succédé et elle a retrouvé le chemin de l'élégance et de l'efficacité mathématique. Cette efficacité n'est pas tant recherchée en tant que telle, même si l'esprit peut certes se réjouir qu'une théorie davantage unitaire formellement ait remplacé les embranchements de computations de modèles partiels et de processus stochastiques : comme l'expliquent souvent les auteurs, elle est recherchée d'abord parce qu'elle autorise que des méthodes inverses existent qui permettent l'identification efficace et rapide sur le terrain des paramètres nécessaires au calibrage du modèle, ensuite parce qu'en simplifiant l'algorithme, son nombre d'étapes de computation diminue considérablement et que, par là et comme par contrecoup, sa visualisation sous forme d'image de synthèse en est facilitée, et enfin parce que cette simplification obtenue d'un côté permet d'un autre côté que le modèle continue à se tourner vers l'avenir c'est-à-dire continue à autoriser que toujours plus de savoirs botaniques et agronomiques stabilisés puissent encore venir s'y intégrer et s'y rendre compatibles.

Qu'admire-t-on au final dans une simulation de plantes particulièrement réaliste ? Ce n'est pas si évident de le savoir, à la réflexion. Est-ce que — à travers sa simulation — c'est la plante réelle que l'on admire dans son inventivité morphologique, la simulation n'en étant qu'une représentation évocatrice ? Ou bien est-ce la simulation que l'on admire dans sa capacité unique à répliquer et à feindre cette même plante ? Ou bien encore n'est-ce pas plutôt l'art et la maîtrise technique du concepteur de la simulation et des formalismes que l'on admire ? Ou bien finalement, n'est-ce pas le génie inventif du « concepteur » de la plante réelle, à savoir la bricoleuse et ingénieuse évolution des espèces ? On s'en doute : dans le regard et dans la pratique scientifique de Philippe de Reffye et de ses collègues, c'est tout cela à la fois. C'est la plante vivante d'abord, son histoire, sa dynamique, son développement et sa croissance, mais aussi leurs représentations, leurs formalisations, leurs simulations. C'est la raison pour laquelle ce livre — tout à la fois technique et synthétique — nous invite à de nouvelles admirations, à une *admiration* augmentée, comme on parle de réalité augmentée. L'admiration pour les plantes y est toujours présente et même directrice : elle ouvre le chemin à la connaissance, mais pas à n'importe quelle connaissance, à une connaissance respectueuse de la diversité car radicalement multi-types, réellement multidisciplinaire et pas seulement multifactorielle. Le recueil des données mène ici à des représentations intégratives mais mesurées, ainsi qu'à des applications opérationnelles de ces représentations mesurées. Les échelles des phénomènes ne sont pas réduites, mais respectées. La pluralité des phénomènes est reconnue et intégrée. Ce qui est encore ignoré est également reconnu et pris en compte. C'est pourquoi, au final, il me semble que, malgré son indéniable technicité mathématique et sa mobilisation d'une nécessaire érudition botanique, ce livre doit trouver un large lectorat : ce lectorat sera amplement récompensé s'il est vrai que — ce dont je ne doute personnellement pas — les pratiques sérieuses et scientifiquement fécondes de modélisation et de simulation intégratives ont, au-delà d'une actualité brûlante et pour certaines d'une visibilité quelques peu prématurée, un avenir tout à fait considérable dans les sciences de la vie et même au-delà.

FRANCK VARENNE

MAÎTRE DE CONFÉRENCES EN ÉPISTÉMOLOGIE, UNIVERSITÉ DE ROUEN
UNITÉ MIXTE DE RECHERCHE GEMASS (CNRS - PARIS SORBONNE)

²Francis Hallé. *Éloge de la plante – Pour une nouvelle biologie*. Paris, Seuil, 1999.

[3](#) Franck Varenne. *Du modèle à la simulation informatique*. Paris, Vrin, 2007.

[4](#) J'ai alors proposé de nommer « modélisation pluriformalisée » la capacité que donne l'ordinateur d'intégrer et de co-calculer dans un unique programme informatique plusieurs modèles relevant de savoirs empiriques, théoriques ou explicatifs distincts et exprimés chacun dans des formalismes distincts.

Figure 9.26. Une simulation stochastique de la plante à 6 ans et de la structure potentielle associée avec la combinaison Bernoulli*mortalité.

L'effet de la néoformation des UC est visible car les organes d'une même UC ont tous une taille différente.

Modèles pour la représentation et la visualisation des plantes et des paysages

MARC JAEGER, GÉRARD SUBSOL

Philippe de Reffye, XiaoPeng Zhang, QingQiong Deng, Chao Zhu, Nicolas Janey, Pierre Dinouard, Vincent le Chevalier ont contribué à ce chapitre.

Dans ce chapitre, nous abordons plus spécifiquement la représentation et la visualisation de plantes et couverts végétaux simulés.

Nous avons souligné, dans le chapitre 15, l'intérêt de la représentation des plantes simulées, sous forme de maquettes 3D à l'échelle de la plante jusqu'au paysage.

Nous définirons d'abord ce que nous entendons par représentation et par visualisation. La représentation des plantes, et plus généralement celle des phénomènes naturels, fut et reste un moteur important de recherches conduites en synthèse d'image. Celle-ci fut à l'origine de concepts importants, c'est pourquoi nous commencerons par rappeler quelques approches pionnières dans ce domaine. Nous détaillerons ensuite quelques modèles dits géométriques, en particulier les L-systèmes, très répandus aujourd'hui, y compris dans la sphère agronomique. Nous aborderons enfin les spécificités des représentations tridimensionnelles des plantes simulées, avant de dresser un panorama des approches basées sur des représentations d'images, simulées ou obtenues à partir de vues réelles.

L'obtention de l'image d'un végétal ou d'un paysage simulé sur un support tel qu'un écran obéit au même schéma que l'obtention d'une image d'un objet dit artificiel. La création des images par les techniques d'infographie 3D s'inscrit dans un enchaînement d'étapes que l'on peut résumer comme suit :

- la modélisation des objets de la scène en trois dimensions ;
- la définition des paramètres de vues ;
- la définition des paramètres et modèles d'éclairage ;
- les créations et les affectations des matériaux de surface et des textures ;
- la définition du mode de rendu et le calcul des images proprement dit.

Créer une image de synthèse (utilisation du gratuit Blender).

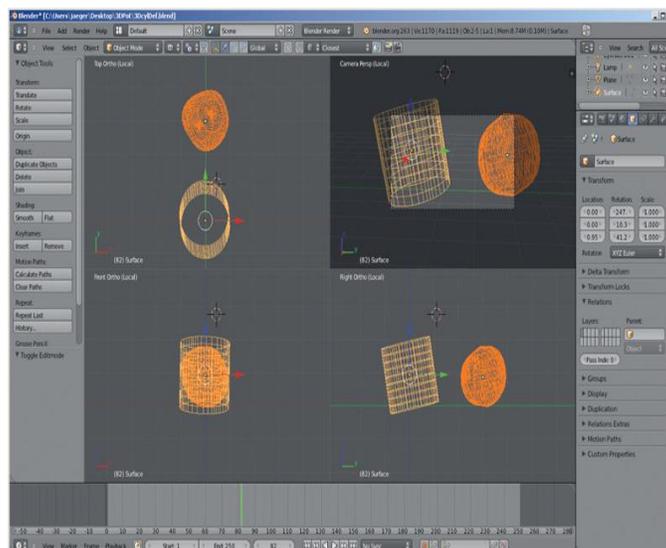


Figure 16.1. Étape 1. Définition de géométries pour modéliser les objets de la scène.

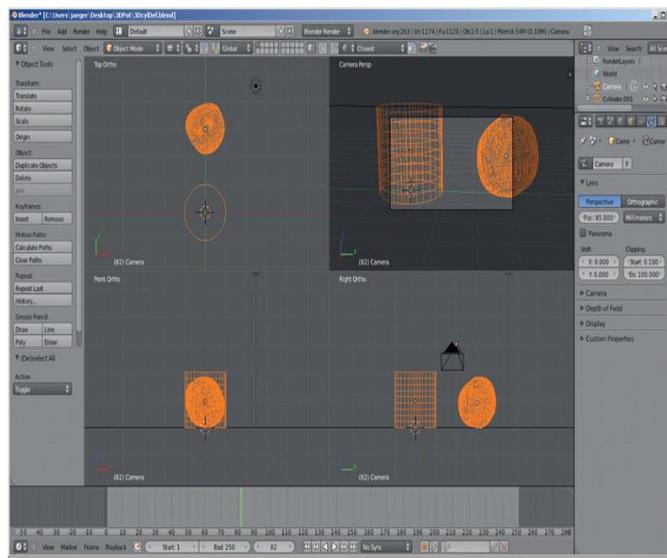


Figure 16.2. Étape 2. Définition de paramètres de vue (caméra) pour visualiser la scène.

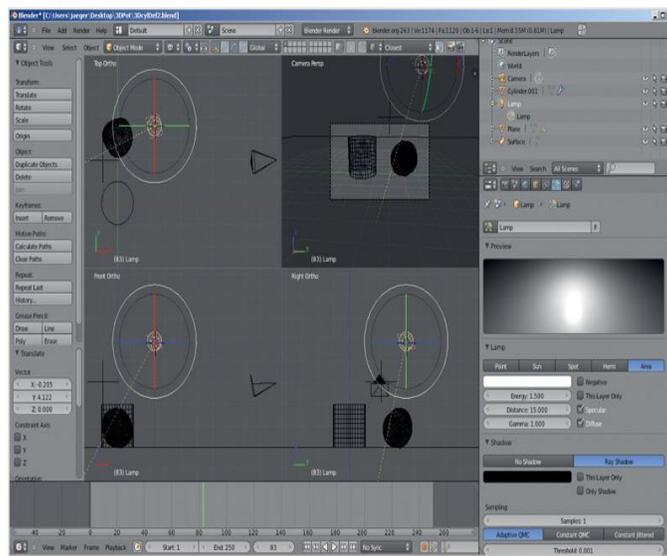


Figure 16.3. Étape 3. Définition de sources d'éclairages pour illuminer la scène.

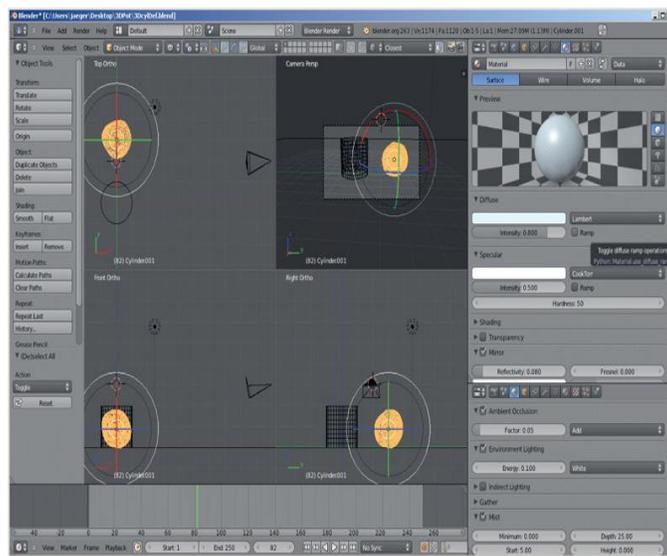


Figure 16.4. Étape 4. Définition de propriétés de surface des objets de la scène.

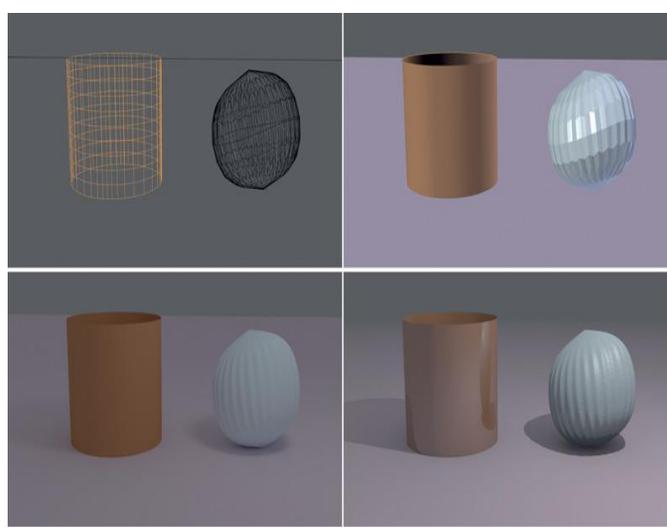


Figure 16.5. Dernière étape. Choix des paramètres de rendu et calcul de l'image finale.

En haut, à gauche représentation en fil de fer, sans illumination. **En haut, à droite**, représentation surfacique polygonale, avec un calcul d'illumination simple par face. **En bas, à gauche**, calcul utilisant des échanges d'énergie lumineuse dans la scène (la radiativité), permettant la simulation d'ombrages. **En bas, à droite**, calcul de l'image obtenu en lançant des rayons dans la scène depuis la caméra vers les points de l'image à construire et vers les sources de lumières, en autorisant des réflexions. Utilisation du logiciel Blender.

La modélisation des objets attribue des formes géométriques que l'on cherche à représenter. Elle aboutit dans de nombreux cas à un ensemble de primitives simples décrivant la surface de l'objet sous la forme de courbes ou de polygones. Dans d'autres applications, la représentation se construit par des opérations logiques menées sur des volumes simples.

Dans notre cas, les étapes de modélisation et de rendu présentent des spécificités. La définition de la géométrie des objets est particulière : elle est complexe, générée par programme, constituée de multiples éléments de taille variables. Il en est de même pour les tâches de rendu du fait l'important volume d'informations géométriques et de la petite taille des éléments visuels. Ces problèmes ne sont pas habituels dans la communauté graphique.

La modélisation couvre en fait de multiples aspects avant d'aboutir à une description géométrique tridimensionnelle. Sous le terme de « représentation » (d'une plante) nous désignons une approche permettant de calculer une description géométrique tridimensionnelle de l'objet, dans le but de le visualiser. Cette représentation peut être proche d'une modélisation géométrique (par exemple un simple polygone destiné à porter une texture image d'un arbre). Mais, en général, des approches de plus haut niveau sont utilisées, par exemple en limitant la description aux positions et orientations des composants constituant le végétal. Nous désignons aussi sous le terme de « visualisation » les techniques intervenant plus particulièrement dans les étapes de rendu. La visualisation sous-entend que le plongement géométrique des constituants des scènes, les conditions d'éclairage et de vue soient définis.

Dans les applications qui sont les nôtres, l'effort est concentré sur la représentation, les développements de visualisation relèvent plutôt de l'ingénierie, certains points spécifiques seront tout de même évoqués plus loin.

Bref historique des méthodes de simulation de plantes en synthèse d'image

Les premiers travaux s'intéressant aux formes végétales datent des débuts années 1980, qui marquent le commencement des usages de la synthèse d'image. La représentation et la visualisation des plantes est donc une problématique d'intérêt dès les premières heures de l'imagerie virtuelle.

Approches pionnières

L'artiste japonais Yoichiro Kawaguchi (1982) est certainement l'un des premiers auteurs à représenter des structures arborescentes dès le début des années 1980. Pour la première fois, ce n'est pas un utilisateur qui définit une forme, mais un programme qui réitère une règle de construction simple.

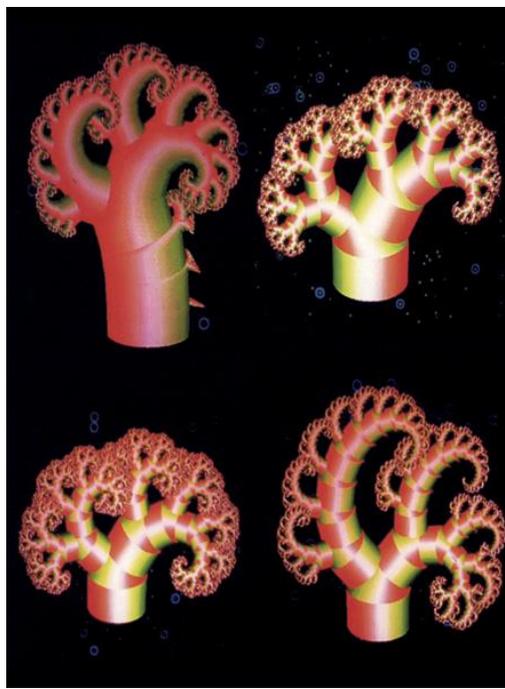


Figure 16.6. Approche pionnière de la synthèse de structure par ordinateur.

Les formes récursives de l'artiste japonais Yoshiro Kawaguchi (1982).

À l'opposé de cette approche, aux États Unis, Geoffroy et Gardner (1984) propose de décrire les éléments des scènes naturelles. Son approche est limitée aux usages d'une unique forme : des ellipsoïdes semi-transparents. Ils génèrent ainsi le relief, les nuages et la végétation.

Toujours au Japon, les informaticiens Aono et Kunii (1984) sont vraisemblablement les premiers chercheurs à s'intéresser à la définition procédurale de plantes avec une volonté d'afficher un fondement botanique. Ils construisent des simulations d'arbres en s'appuyant sur une combinaison d'arbres binaires n'autorisant qu'un nombre limité d'architectures. Ils introduisent également la simulation de tropismes en soumettant leurs structures simulées à des champs de force. Ces derniers miment des effets de courbures, telles que les flexions mécaniques.

La représentation à partir de mesures de terrain est également explorée. Jules Bloomenthal, père d'un concept du *bio-design* dans *Modeling the mighty Maple* (1985), reproduit le squelette (points de ramification) des principaux axes d'un érable. Puis, il habille ce squelette géométriquement (ajout des diamètres, de feuilles) et graphiquement (ajout de la texture). Il est indéniablement le premier auteur à construire une représentation réaliste d'un arbre virtuel.



Figure 16.7. *Modeling the mighty maple* (Jules Bloomenthal, 1985). La première approche de reconstruction d'un arbre en synthèse d'image.

BLOOMENTHAL, UN PIONNIER DE LA SYNTHÈSE D'IMAGE

Jules Bloomenthal est un pionnier de la synthèse d'image auquel on doit le concept de modélisation d'objets 3D par des surfaces implicites. Jusqu'à ses travaux, on modélisait les objets en imagerie ou en CAO selon deux approches : par description de la surface externe (en employant un ensemble de polygones ou surfaces mathématiques) ou par combinaison de volumes (en employant des combinaisons logiques et géométriques de sphère, cube, cône, cylindre). Ces deux approches sont respectivement nommées BREP pour *Boundary REPresentation* et CSG pour *Constructive Solid Geometry*. Jules Bloomenthal propose de construire des descriptions d'objet selon une discrétisation de l'espace : la forme est définie par une distance à un squelette défini d'objets simples, appelés primitives (points, lignes, plan). Ce type de représentation permet d'obtenir des formes très complexes, et « lisses » à partir de squelettes simples, en particulier pour représenter les membres et les corps des êtres vivants.

Petit à petit, les approches procédurales s'imposent. En Californie, Alvy Ray Smith (1984) effectue une première tentative d'usage de grammaires qu'il applique récursivement. Il appelle cette fusion de concept les graftals (contraction de grammaire et fractal). L'approche qu'il propose est hybride à de multiples titres. Les graftals sont en effet employés uniquement pour les axes principaux. Le feuillage est généré par des systèmes de particules (voir encadré ci-dessous). Dans ces premiers travaux, les aspects purement graphiques, tels que les ajouts de couleurs, sont ajoutés, a posteriori, par l'usage de palettes graphiques.

SYSTÈMES DE PARTICULES

Un système de particules est un système dynamique de points indépendants les uns des autres soumis à des lois de mouvements, souvent physiques modifiant leurs positions et leur vitesse. Introduit par W.T. Reeves en 1983, il reste aujourd'hui couramment employé pour simuler et représenter beaucoup de phénomènes diffus: pluie, neige, feux, explosions, etc. Ce type de modèle est dynamique : à intervalle de temps réguliers, de nouvelles particules apparaissent, chaque particule présente dans la scène subit une modification (position, couleur, vitesse), d'autres sans activité ou sortant du champ de la scène disparaissent. Un tel système dispose donc d'une source (une zone géographique émettant des particules, munies de propriétés initiales telles que position et vitesse), et d'un module d'évolution des particules présentes (calcul des nouvelles positions, vitesses, etc... en fonction de contraintes telles que la pesanteur). À chaque itération un processus d'affichage calcule des propriétés graphiques (couleurs, transparence) en fonction des caractéristiques des particules (leur âge et leur vitesse en particulier) et exclut de la scène les particules anciennes, ou sorties de la scène (Reeves, 1983).

Toujours aux États-Unis, Peter Oppenheimer (1986) propose un modèle fractal simple qu'il couple à un concept important de représentation d'objet en synthèse d'image, la *display list*, séparant explicitement la topologie (lien entre les composants) de la géométrie (orientations et taille des composants).

En 1986, on voit apparaître les premières approches qui restent employées jusqu'à nos jours : les grammaires récursives, en particulier les L-systèmes sous l'impulsion de Przemyslaw Prusinkiewicz (1986), employant les anciens travaux d'Aristid Lindenmayer (1968) ainsi que les approches que l'on appellera supervisées, dont celles développées par P. de Reffye (1988) qui conduiront au modèle GreenLab.

Faut-il représenter la structure ?

Les travaux pionniers montrent une pluralité d'approches qui restent toujours d'actualité. Ils se différencient par la nature des techniques utilisées pour décrire le végétal. On différencie ainsi une approche décrivant le végétal par une forme de cellules

construisant une structure ramifiée, et de celle qui suppose que les grands axes de cette structure sont donnés (par mesure sur le réel). Le potentiel des approches est très différent en termes d'applications et de contraintes techniques. Sous ces contraintes, on entend en particulier les coûts de paramétrage (voire de saisie), les temps et lourdeurs des calculs pour construire et visualiser ces représentations. La généricité — c'est-à-dire le potentiel d'une approche à générer une grande diversité de représentations — cherchant ainsi à refléter la diversité naturelle, est aussi un facteur important à considérer.

En synthèse d'images, la contrainte du temps réel (visualiser les objets au trentième de seconde) est devenue une nécessité dans la plupart des applications. Ce sont donc principalement ces contraintes techniques pilotées par la visualisation qui définissent les classifications. Citons à titre d'exemple, la comparaison d'Ismaël Garcia Fernandez de l'université de Girona (2007), effectuée sur diverses technologies employées pour visualiser le végétal dans les jeux vidéo.

Dans notre contexte, la contrainte de visualisation rapide est de second plan. Ce sont les aspects de niveaux de représentations, voire de codage de la représentation qui prévaut. Il y a cependant peu de travaux de classification ; on notera l'état de l'art proposé par Christophe Godin (2000) au terme des années 1990.

Dans les deux contextes, graphique ou agronomique, l'échelle depuis laquelle on conçoit la représentation du végétal est un critère important, définissant à la fois des contraintes techniques et des natures d'approches.

L'échelle spatiale tout d'abord : la plante représentée comme un ensemble, c'est-à-dire une forme, ne mobilisera pas le même niveau de complexité qu'une description représentant son architecture. Dans ce cas, la définition de la structure s'appuiera sur une approche procédurale qui peut se montrer complexe, confrontée à une plante réelle.

L'échelle temporelle est tout aussi importante : représenter la dynamique de la mise en place de la structure, c'est-à-dire de la croissance est une contrainte rajoutant une difficulté importante. Enfin, la représentation de la production est rarement prise en compte, elle gagnerait cependant à l'être car la valeur de la biomasse (feuillée et cumul pour le bois) sont des éléments visuels importants sur les grandes échelles telles que celles des paysages.

Notons par ailleurs que ce n'est pas parce que l'on dispose d'une méthode procédurale de construction de la structure qu'elle reflète la croissance. Dans la majorité des approches (passées et actuelles), on génère un végétal à un âge donné sans représenter l'ensemble des structures passées, ni la production à chaque étape.

Modèles informatiques de développement

Nous abordons ici des modèles utilisés pour construire la représentation de la structure de plantes virtuelles. Nous nous situons dans le cadre d'approches visant à représenter la structure (généralement ramifiée) des plantes simulées et non pas d'approches visant à définir la forme globale du végétal. Ces modèles, variés, partagent un certain nombre de principes rappelés ci-dessous.

Généralités : récursivité, règles, principes géométriques

Dans les approches structurelles, que l'on nomme parfois géométriques, on part du principe que la structure n'est pas explicitement définie par l'utilisateur mais générée par un programme. C'est ce que l'on appelle une génération procédurale. Les modèles procéduraux sont aujourd'hui de plus en plus employés dans le monde de la synthèse, ils sont principalement issus des besoins de représentation d'objets et de phénomènes naturels. Rappelons à titre d'exemple les fractals pour les terrains, les systèmes de particules déjà cités au préalable, pour les feux d'artifices. Dans ces modèles, les procédures mises en œuvre vont consister à appliquer des règles de construction de la structure. Elles sont inspirées d'un processus soit de croissance, soit de raffinement (ajout de détails).

En général, ces règles sont appliquées en plusieurs passes. Dans de nombreux cas on peut parler d'itérations appliquées consécutivement à l'objet faisant évoluer ainsi la structure. Lorsque les règles restent inchangées, on est en présence de récursivités; c'est le cas des constructions fractales.

La génération de la structure couvre en fait deux volets bien distincts : le volet topologique et le volet géométrique. La topologie définit les relations entre les constituants de la structure. Dans la majorité des modèles, les structures sont construites à partir de structures linéaires élémentaires (des phytomères dans la terminologie d'Amap). La topologie va permettre de construire les relations de succession de ces éléments élémentaires selon deux modes : le long d'un même axe, ou d'une autre façon par une ramification, c'est-à-dire le démarrage d'un nouvel axe. La géométrie va quant à elle définir la taille et l'orientation des

éléments. Elle va également définir des transformations géométriques s'appliquant sur des ensembles d'éléments, par exemple sur les axes que l'on veut pouvoir courber ou tordre.

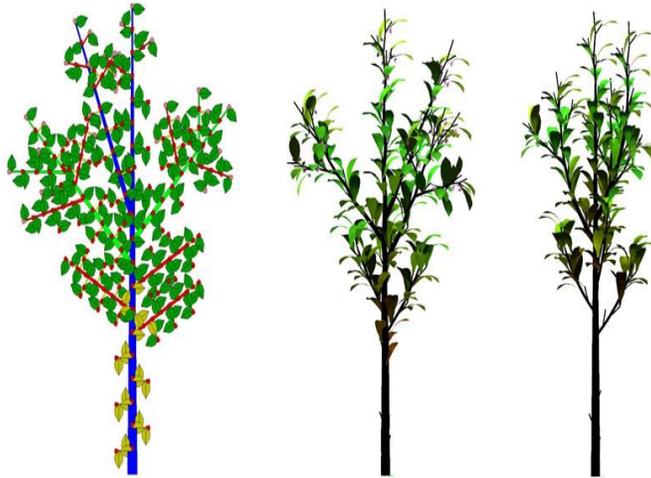


Figure 16.8. Étapes des transformations géométriques.

1 : mise à l'échelle des phytomères ; 2 : angles d'insertion et phylotaxie ; 3 : redressement des axes et des torsions.

La construction de la topologie s'appuie sur des règles de définition de succession et de ramification. On peut générer aussi des données géométriques de manière procédurale, notamment en s'appuyant sur des données typologiques ou topologiques. Il est d'usage de définir des angles de branchement en fonction de la nature des axes, selon des critères physiologiques ou structuraux tel que l'ordre de ramification. Le calcul des longueurs peut être une donnée définie selon les mêmes critères ou obéir à des règles spécifiques : dans le cas du modèle GreenLab, les longueurs sont mesurées par une loi d'allométrie depuis la production (le volume de biomasse cumulé). Les ploiements nécessitent par ailleurs la connaissance de la longueur des axes. De ces remarques, on déduit les aspects géométriques qui doivent être définis après les calculs de structure. Ils peuvent même être totalement post-traités.

Les approches évoquées ci-dessous partagent le fait que la structure soit établie selon des règles procédurales sans que cela soit le cas pour les aspects géométriques.

Grammaires et arbres combinatoires

L-systèmes

Les grammaires formelles peuvent être utilisées pour générer des structures arborescentes. Les L-systèmes (systèmes de Lindenmayer) sont particulièrement répandus au sein des communautés graphiques et agronomiques. Le biologiste hongrois Aristid Lindenmayer a défini en 1968 un langage formel pour décrire le développement d'organismes multicellulaires simples (des levures, des champignons, des algues). Dans son approche, Lindenmayer (1968) représente les cellules à l'aide de symboles (des lettres). Lors du développement, les cellules se divisent ; à chaque symbole est remplacé, selon des règles préétablies, par un ou plusieurs autres symboles formant ainsi un mot. Le processus est ensuite réitéré. Le concept principal des L-systèmes est donc la notion d'écriture et de réécriture.

En introduisant des symboles particuliers spécifiques à la représentation (tracés, opérateurs de rotation, etc.) issus du langage de programmation graphique Logo (Papert, 1980), l'approche permet la représentation et la simulation de la mise en place de structures végétales. Avec ces symboles graphiques, appelés *turtle*, les L-systèmes ont été approfondis pour la représentation des plantes par Przemyslaw Prusinkiewicz dans les années 1980 (Prusinkiewicz, 1990), rendant populaire leur usage au sein de larges communautés.

Plus précisément, un L-Système est une grammaire formelle décrite par un quadruplet $\{V, S, w, P\}$ où :

V est un alphabet (l'ensemble des symboles). On note classiquement V^* l'ensemble des « mots » que l'on peut construire avec les symboles de V, et V^+ l'ensemble des mots non vides contenant au moins un symbole ;

S est ensemble de symboles constants, sous-ensemble de V. De nombreux symboles de S sont communs à tous les L-Systèmes (voir ci-dessous) ;

w est le mot initial (non vide) ;

P est l'ensemble de règles permettant la reproduction des symboles de V.

L'application des règles P sur le mot initial va produire un nouveau mot dans V^* comprenant des symboles variables et constants. Chaque symbole peut définir une opération géométrique ou graphique. La communauté graphique a popularisé l'usage de certains symboles, sous le terme de *Turtle interpretation*. Voici les symboles qui nous permettent d'illustrer l'application des L-systèmes pour représenter des arbres simples dans le plan :

F : tracer un segment et se déplacer au bout de celui-ci ($\in V$) ;

+ : effectuer une rotation par un angle donné $+\alpha$ ($\in S$) ;

- : effectuer une rotation par un angle donné $-\alpha$ ($\in S$) ;

[: sauvegarder la position courante ($\in S$) ;

] : restaurer la dernière position sauvee ($\in S$).

Les symboles appartenant à V peuvent être perçus comme des réalisations de phytomères (par des méristèmes). Les symboles appartenant à S sont des transformations, soit géométriques qui définissent des variations d'orientation, soit topologiques qui définissent alors l'empilement d'un contexte (correspondant au départ d'une ramification) ou à la restauration d'un contexte (retour à l'axe porteur).

Lorsque l'on dispose d'une seule règle par variable, le système est déterministe. Il n'y a qu'une seule évolution possible à partir de l'axiome. Il en est de même à chaque génération. Dans ce cas, on est en présence d'un D0L-System (*Deterministic 0-context System*). Voici ci-dessous, un exemple de D0L-System :

variable : $V = \{F, X\}$

constantes : $S = \{+, -, [,]\}$ (on fixera ici la valeur de l'angle à 20°)

axiome : $w = X$

règles : $(X \rightarrow F [+ X] F [-X] + X) ; (F \rightarrow FF)$

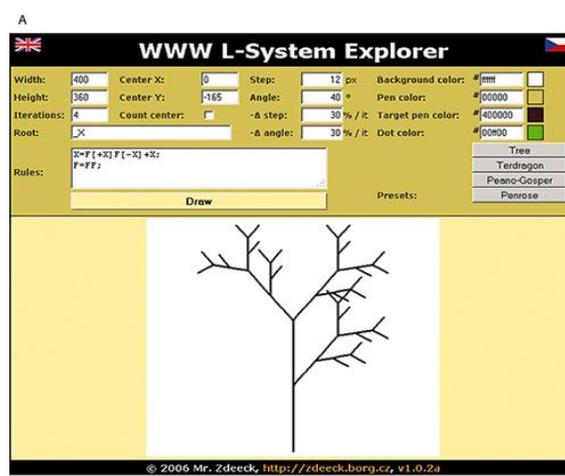
Voici le résultat obtenu par la réécriture sur deux générations :

au départ ($n = 0$), on dispose de l'axiome : X

première génération, $n = 1$, F [+X] F [-X] + X

$n = 2$, FF [+F [+X] F [-X] + X] FF [-F[+X] F [-X]+X] + F[+X] F[-X] + X

La représentation résultant de ces productions est donnée en figure 16.9.



B

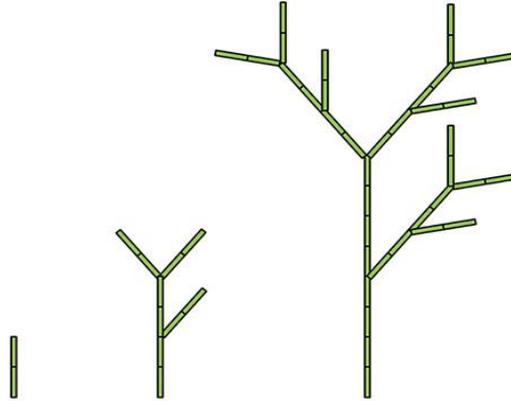


Figure 16.9. Un outil simple d'interprétation et de représentation de production de grammaires L-système.

a : la fenêtre « rules » permet la saisie des règles, et « Root » définit l'axiome. Le nombre d'itérations des réécritures est de 4 dans cet exemple. Les variables *step* et *angle* définissent respectivement la longueur attribuée au symbole « F » et la valeur de l'angle attribuée aux symboles « + » et « - ». Dans cet interpréteur, ces valeurs peuvent varier selon le niveau d'itération. **b** : trois itérations successives des règles $X \rightarrow F[+X]F[-X]+X$; $F \rightarrow FF$ à partir de l'axiome X. La quatrième itération est présentée en figure 12a. Les mots générés en première et deuxième itérations sont $F[+X]F[-X]+X$ (FF à l'affichage) et $FF[+F[+X]F[-X]+X]FF[-F[+X]F[-X]+X]+F[+X]F[-X]+X$, soit $FF[+FF]FF[-FF]+FF$ à l'affichage.

L'application des L-systèmes au domaine végétal est un cas non déterministe. On parle alors de S0L-System (*Stochastic 0-context L-System*). Dans ces systèmes, l'ensemble des règles contient plusieurs transformations possibles, au moins pour une variable donnée. Chacune de ces transformations sera pondérée (affectée d'une probabilité de réalisation). À chaque génération, pour chaque instance du symbole concerné, une transformation particulière sera choisie (par exemple, par comparaison à un nombre aléatoire). L'usage de suites aléatoires distinctes permet d'obtenir des représentations distinctes.

Comme son nom l'indique, ce système fait appel aux probabilités, il est appelé système non-déterministe car, contrairement au D0L-System, chaque possibilité est pondérée pour pouvoir donner la priorité à certaines transformations par rapport à d'autres.

Voici un exemple de S0L-System, construit à partir de l'exemple déterministe précédent.

variables : $V = \{F, X\}$;

constantes : $S = \{+, -, [,]\}$;

axiome : $w = X$;

règles :

$X \rightarrow (0,2) F[++X]F[-X]+X$

$X \rightarrow (0,8) F[+X]F[-X]+X$

$F \rightarrow (1,0)FF$

Dans l'énoncé de ces règles, la pondération est définie par la probabilité donnée entre les parenthèses. Voici un résultat obtenu par la réécriture sur deux générations :

$n = 0, X$;

$n = 1, F [++X] F [-X] + X$;

$n = 2, FF [++F [X] F [-X] + X] FF [-F [X] F [-X] + X] + F [X] F [-X] + X$.

Voici un autre résultat possible sur deux générations :

$n = 0, X$;

$n = 1, F [+X] F [-X] + X$;

$n = 2, FF [+F [++X] F [-X] + X] FF [-F [++X] F [-X] + X] + F [++X] F [-X] + X$.

L'effet recherché ici est une variation géométrique (figure 16.10), car les règles sur X ne diffèrent que sur l'application d'une rotation dont l'angle est doublé dans la règle dont la probabilité vaut 0,2.

Avec l'approche stochastique, la combinatoire engendrée peut devenir importante, voir exponentielle. Sur notre exemple, il y a 4 possibilités possibles sur deux générations, 16 sur 3 générations.

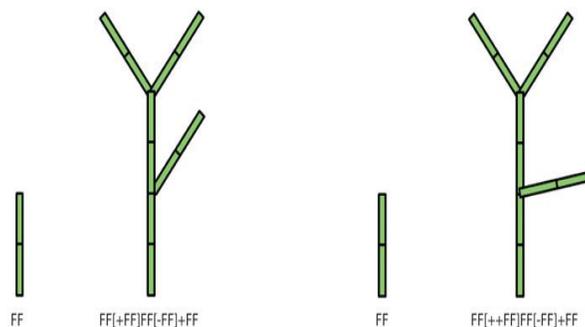


Figure 16.10. Exemple de L-système à règles stochastiques.

Dans cet exemple proche du précédent, l'axiome est le symbole X, l'on dispose d'une règle stochastique sur X (0,8) $F[+X]F[-X]+X$ et (0,2) $F[++X]F[-X]+X$ avec la règle déterministe $F \rightarrow (1,0) FF$. La figure illustre deux réalisations sur deux itérations. Dans la première, les tirages aléatoires sont de 0,1 puis 0,4 donnant les mots suivants : $F[++X]F[-X]+X$ soit FF à l'affichage, puis $FF[++F][X]F[-X]+X$ soit $FF[++F][X]F[-X]+X$ à l'affichage. Sur la deuxième, les tirages aléatoires sont 0,5 puis 0,05 donnant le mot $F[+X]F[-X]+X$ soit FF à l'affichage puis $FF[+F][++X]F[-X]+X$ soit $FF[+F][++X]F[-X]+X$ à l'affichage. Remarquons que les productions à l'itération 1, bien que distinctes, donnent le même tracé. Dans cet exemple, la variation est restreinte à la géométrie, elle ne concerne que l'application du symbole angulaire « + ».

Dans les deux exemples cités (D0L et S0L-System), les réécritures sont totalement indépendantes les unes des autres. L'interaction entre divers éléments de la structure ne peut donc pas être simulée. Ces grammaires sont dites non contextuelles (0-context).

Les grammaires contextuelles, appelées *Context Sensitive* autorisent la prise en compte des contextes droits et gauches d'un mot. Une telle grammaire, souvent notée (l, r)-System, définit respectivement un mot contexte à gauche de longueur l, et un mot contexte, à droite de longueur l. Avec la notion de contexte, on permet la simulation de propagations. Dans la littérature, on parle souvent de propagation d'un signal, de ramification, de floraison (Prunskiewicz *et al.*, 1988). Avec une grammaire contextuelle, on peut simuler les arborescences, avec la propagation de la floraison de l'axe principal vers les axes secondaires, illustré dans l'exemple ci-dessous.

Ce L-système simule la propagation d'un signal acropète dans une structure de branches qui ne se développe pas :

variable : $V = \{A, B\}$;

constantes : $S = \{+, -, [,], <\}$;

axiome : $w = FB [+A] FA [-A] FA [+A] FA$;

règle : $(B < A \rightarrow B)$.

L'opérateur < définit un contexte à gauche. La règle se comprend ainsi : si un mot A est précédé d'un mot B, alors ce mot A devient un B à la génération suivante. Il est entendu que A n'a pas encore reçu le signal, et que B l'a reçu.

Dans cet exemple, composé d'une unique règle de propagation, les mots générés à chaque génération illustrent la propagation de la substitution de A en B :

n = 0, FB [+A] FA [-A] FA [+A] FA ;

n = 1, FB [+B] FB [-A] FA [+A] FA ;

n = 2, FB [+B] FB [-B] FB [+A] FA ;

n = 3, FB [+B] FB [-B] FB [+B] FB.

Dans cette séquence, présentée en figure 16.11, si l'on associe à la variable A une représentation de bourgeon floral et à la variable B une fleur éclose, on simule une propagation de la floraison dans la structure ramifiée.

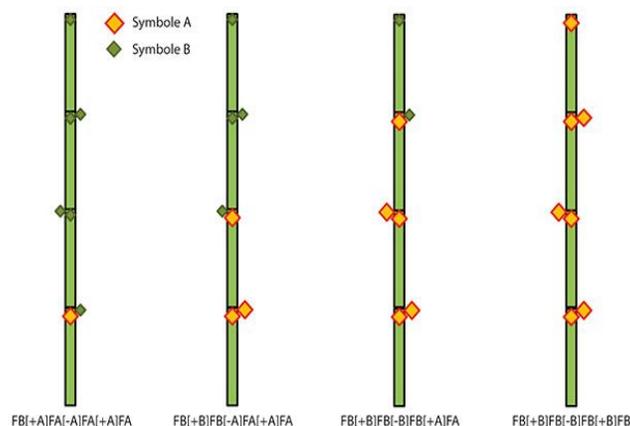


Figure 16.11. Exemple de L-système avec contexte.

On cherche ici à propager une floraison de bas en haut. L'axiome est : FB[+A]FA[-A]FA[+A]FA et la règle (B < A →B). La figure présente 4 itérations successives.

L'usage des L-systèmes dans le contexte de l'agronomie est relativement répandu, principalement pour les plantes à architecture simple (blé, maïs) (Fournier, 1999). Mais l'usage de ce formalisme ne s'appuie pas sur des règles biologiques en tant que telles. La cohérence et la cohésion de l'ensemble des règles définies pour une simulation est à la charge du constructeur du système. Ainsi, dans l'exemple D0L ci-dessus, la production de substitution d'une portion d'axe par deux portions (F → FF), n'est vraie qu'en bout d'axe. Cette remarque est valable pour toute approche procédurale de la structure. L'usage des symboles *turtle* (F, +, -, etc) des L-systèmes pour la représentation des plantes pose par ailleurs un problème spécifique. Il y a dans les symboles *turtle*, une confusion entre l'usage des symboles comme éléments structuraux d'une part, et comme éléments géométriques d'autre part. Dans les approches avancées en synthèse d'image, et à plus fortes raisons dans les applications agronomiques, il est incontournable de prendre de la distance entre le codage géométrique et la génération de la structure. Si cette précaution est prise, la généralité des grammaires permet de convertir de nombreuses approches sous ce formalisme.

Une des autres difficultés majeures de l'usage des L-systèmes réside dans la problématique inverse. Comment peut-on définir les variables, constantes, l'axiome et règles, le nombre de générations pour obtenir une structure donnée ? De notre expérience, l'application d'une approche simple partant des bouts d'axes permet de construire une solution déterministe triviale avec un jeu de règles et de variables colossales (Sun *et al.*, 2009), sans que ces dernières puissent avoir une signification biologique, voire autoriser des résultats pertinents pour générer la structure à diverses générations. Réciproquement, en imposant des contraintes botaniques fortes, le jeu de règle devient trop simpliste et générique, perdant l'intérêt des grammaires.

Approche combinatoire

L'approche combinatoire pour la synthèse d'arbres s'appuie une extension de concepts introduits par les hydro-géologues Horton (1945) et Strahler (1952) pour l'analyse des systèmes ramifiés formés par les flux hydriques. La notion d'ordre est

définie à partir des extrémités (les sources) comme suit : les chemins issus des sources portent l'ordre 1. À un branchement, le nouvel ordre du confluent est défini par l'ordre le plus important des deux affluents; si les ordres des affluents sont identiques, alors au confluent, cet ordre est incrémenté d'une unité (figure 16.12).

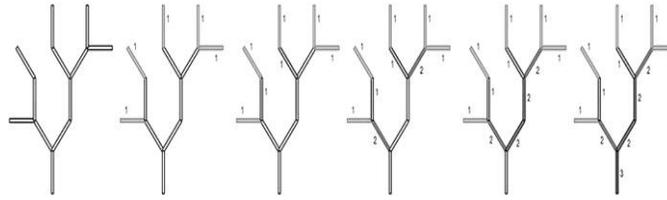


Figure 16.12. Définition de l'ordre dans un arbre combinatoire.

L'ordre 1 est donné aux arêtes des feuilles (issues des sources au sens hydrologique). À la ramification, l'ordre du confluent est défini comme l'ordre le plus important des deux affluents ; si leurs ordres respectifs sont identiques, alors l'ordre est incrémenté.

La notion topologique de base est celle de bi-ordre d'un nœud (d'un branchement), noté $b(i,j)$. Elle quantifie, dans une structure donnée, le nombre de nœuds dont un affluent est d'ordre i , et l'autre d'ordre j avec $i \leq j$, car il n'y a pas lieu de tenir compte d'une orientation droite/gauche dans l'analyse topologique. La topologie de l'ensemble d'un système ramifié sera donc décrite par une matrice triangulaire d'occurrence des bi-ordres $b(i,j)$.

Georges Eyrolles, Xavier Viennot de l'université de Bordeaux et Nicolas Janey de l'université de Franche-Comté furent les premiers à exploiter cette approche pour la synthèse de plantes (Eyrolles, 1986 ; Viennot, 1989). Dans leur approche, ils convertissent la matrice d'occurrence en une matrice de probabilité d'apparition d'un bi-ordre. Ils disposent ainsi d'un outil méthodologique pour simuler la construction d'une structure ramifiée. Ils obtiennent cette structure en effectuant des tirages aléatoires d'arbres binaires dont les lois de branchement suivent les lois de probabilités de la matrice des bi-ordres. Sont ensuite ajoutés des paramètres géométriques. La définition des longueurs et diamètres est obtenue par des lois linéaires, quadratiques ou exponentielles, fonctions de l'ordre au sens défini ci-dessus. Les angles sont des données classiques (pour la phyllotaxie) ou paramétrés selon les ordres pour les angles de branchements, appelés angles de déviation dans leur approche. Les représentations obtenues avec cette approche montrent un réalisme surprenant et offrent une grande variabilité dans la topologie des structures (figure 16.13).

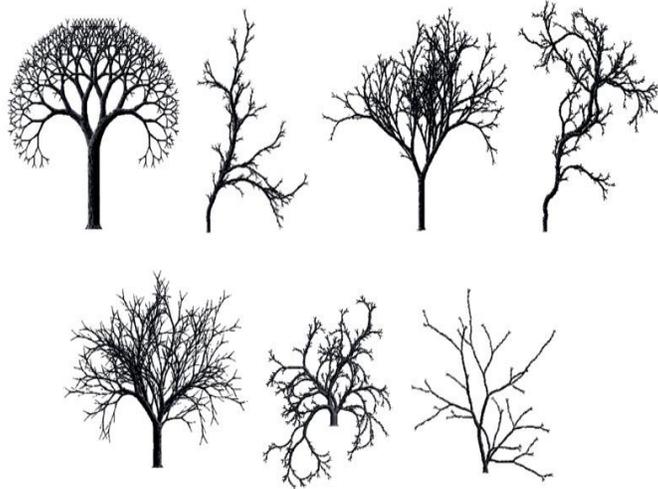


Figure 16.13. Quelques réalisations issues de l'approche combinatoire.

La structure est un arbre binaire dont les branchements sont obtenus par tirages aléatoires selon une matrice des bi-ordres. En haut à gauche un arbre binaire parfait (une matrice unitaire diagonale). Nicolas Janey et Didier Arquès, université de Franche-Comté, 1991.

L'intérêt de cette approche est double : il s'agit d'une analyse et d'une synthèse, elle offre d'une part un cadre méthodologique permettant la mesure et la quantification de la ramification, et, d'autre part, s'appuie sur un formalisme mathématique connu qui permet d'obtenir des indicateurs caractéristiques intéressants tels que le nombre moyen d'axes d'un ordre ou le nombre de nœuds générés par bi-ordre. L'approche permet aussi de développer une algèbre des formes structurelles : deux matrices de

bi-ordres peuvent être additionnées, fusionnées, incluses pour obtenir une convolution topologique de la structure simulée (figure 16.14).

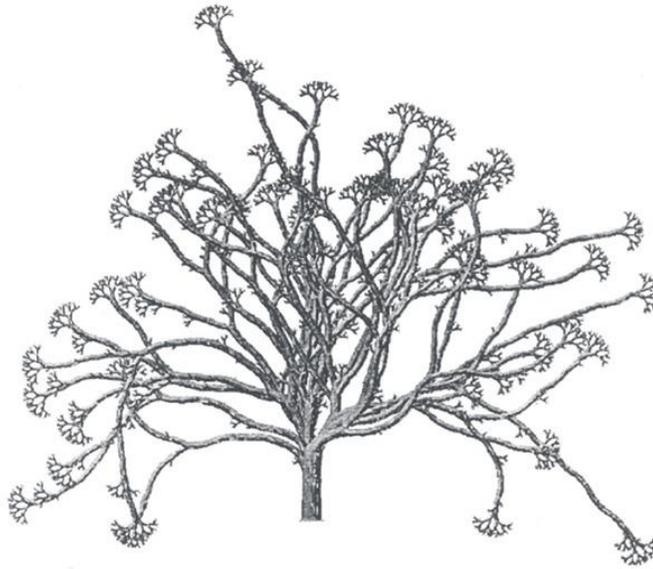


Figure 16.14. Représentation d'un arbre combinatoire dont la matrice des bi-ordres est un mélange de deux matrices.

La première pour les ordres faibles (feuilles) est proche d'un arbre binaire parfait, la seconde d'un arbre aléatoire. Nicolas Janey et Didier Arquès, université de Franche-Comté, 1991.

Dans sa thèse, Nicolas Janey (1992) montre que l'on peut associer une dynamique de croissance à l'établissement de la structure à partir des matrices de bi-ordre. Pour cela, il inverse leur écriture et quantifie les ordres par soustraction à l'ordre maximal. L'ordre du tronc devient donc 1, et celui des branches issues du tronc seront supérieur à 1 pouvant atteindre l'ordre maximal, ce qui n'est pas sans rappeler la notion d'âge physiologique en botanique architecturale. L'auteur appelle les matrices inversées de bi-ordre des matrices d'évolution. Avec cette extension, l'implémentation de ce formalisme permet de simuler une évolution proche de la croissance avec un réalisme visuel convaincant (figure 16.15).



Figure 16.15. Simulation de la croissance par les matrices d'évolution de l'approche combinatoire. Nicolas Janey et Didier Arquès, université de Franche-Comté, 1991.

Cette approche, formellement rigoureuse, n'a malheureusement pas été employée dans des contextes strictement botaniques et agronomiques, elle gagnerait à y être évaluée.

Approche par composant « *Pattern* »

L'une des difficultés inhérentes aux approches procédurales ou par règles est la difficulté de définition des procédures ou des règles pour obtenir un effet particulier. Certes, l'usage de méthodes inverses, basées notamment sur l'analyse statistique des cimes, répond à cette difficulté, mais elle n'est applicable que sur des approches combinatoires, où elles sont difficiles à maîtriser par des néophytes. Dans les domaines multimédias, les graphistes apprécient d'avoir un contrôle aisé et intuitif sur la forme et l'expression des objets qu'ils manipulent. Cette contrainte est très forte, elle impose que les aspects procéduraux soient malléables par un utilisateur externe, s'appuyant donc sur une interface spécifique, hautement graphique.

C'est ce que propose l'approche de deux jeunes chercheurs allemands Bernd Lintermann et Oliver Deussen en 1997 (Lintermann, 1997, 1999 ; Deussen, 1997, 2005). Elle vise à construire des structures végétales à partir de composants simples possédant des fonctions de plus haut niveau et en nombre limité (une dizaine).

Ces composants peuvent être simples tels, une feuille, un axe, ou ils peuvent aussi décrire des arrangements complexes tels, une distribution en spirale, une grille régulière ou un système ramifié. Chaque composant présente des propriétés topologiques et géométriques qui lui sont propres. Un composant est représenté par un pictogramme. Une réalisation végétale est un diagramme (un p-graphe) liant les composants par quatre types de combinaison : prolongation, récursivité, ramification simple, ramification avec un organe. Enfin, deux opérateurs spécifiques permettent des déformations globales ou locales ; ils permettent de simuler des torsions et des courbures. L'approche proposée est donc souple et efficace.

L'implémentation de cette approche nommée *Pattern* a conduit à une gamme d'outils reconnus et performants : Xfrog d'Onyx Computing^[5], distribué sur de nombreuses plateformes. L'usage de ces outils est répandu dans les milieux des jeux et du multimédia mais ne permet pas d'applications agronomiques.

Visualisation des modèles tridimensionnels (structuraux) de plantes simulées avec les formalismes inspirés de l'analyse architecturale botanique

Cette section est consacrée aux principes guidant la représentation et la visualisation de structures simulées à partir des approches développées par P. de Reffye et ses collègues, des premiers simulateurs de la gamme Amap aux dernières implémentations du modèle GreenLab (chapitre 15).

De l'image statique vers la réalité virtuelle et la représentation du fonctionnement

Selon les approches décrites dans cet ouvrage, la génération de la géométrie des plantes simulées est lourde et complexe. Elle doit assurer simultanément une représentation hiérarchique ramifiée, structurée, organisée (celle du bois, par exemple) et celle d'une géométrie tout aussi complexe mais de nature éparse, distribuée, s'inscrivant dans une dynamique temporelle courte, aux aspects visuels riches en couleurs, formes et dynamiques (celle des organes comme les feuilles, les fleurs, les fruits, etc.). Ces deux représentations ont soulevé de nombreuses questions de recherche dans un contexte de visualisation réaliste et rapide (temps réel) de scènes végétales à l'échelle de parcelles voire du paysage.

Grâce au développement des technologies des cartes graphiques (GPU) et des approches de rendu orientées images (voir ci-après), de multiples contributions permettent aujourd'hui la représentation de scènes naturelles plus ou moins homogènes en temps réel. Dans la plupart des applications, et de manière systématique dans le multimédia, la recherche de la performance graphique est avant tout fondée sur des critères de fluidité du parcours dans les scènes. La quête du réalisme visuel ne s'appuie pas sur la représentation réaliste des composants de sa scène mais sur l'aptitude à plonger le spectateur dans un contexte, une atmosphère. Ce réalisme orienté « parcours visuel » ne privilégie pas la dynamique intrinsèque aux systèmes, tant à l'échelle de la plante qu'à l'échelle de la scène.

Dans le contexte de la recherche agronomique, avec la pression sociétale croissante autour du changement climatique, du développement durable et d'une relative prise de conscience de l'importance de l'environnement avec ses valeurs écologiques, ces besoins de représentation de la dynamique sont de fait extrêmement complexes et lourds. Il faut non seulement obtenir des représentations qui présentent une cohérence « écologique » mais disposant aussi de capacités d'évolutions fondées sur des transformations plausibles.

Depuis les années 2000, nos travaux menés sur la représentation s'inscrivent dans un axe de la représentation explicite de l'organe à celle du fonctionnement du paysage, qui présente un double gradient, celui de l'échelle de l'organe au paysage et celui d'un glissement de la représentation structurelle vers la représentation fonctionnelle.

En effet, à l'échelle locale de l'organe, la représentation visuelle ne peut qu'être explicite, donc géométrique, précise tant sur la structure que son aspect (texture). Nous sommes ici dans un contexte « classique » de synthèse d'image centré sur les propriétés de surface de l'objet. À l'opposé, par exemple sur une vue aérienne, voire satellite, la représentation visuelle est principalement fonction de la présence de biomasse (pour des caractéristiques de géographie physique homogènes).

À ce gradient structurel/fonctionnel, s'ajoute un gradient temporel. Lorsque la visualisation est centrée sur la plante ou ses organes, on est facilement amené à se déplacer pour visualiser le voisinage et effectuer des déplacements dans l'espace autour de l'objet d'intérêt. La plante est dans ce cas statique (du moins en terme d'évolution), il n'y a pas besoin de solliciter de nouvelles simulations et plongements géométriques. À l'inverse, à l'échelle du paysage, on est plus facilement amené à considérer des dynamiques temporelles sur un même site. On centre aussi son attention sur des zones plus précises. Dans les deux cas, il faut faire des calculs importants sur la dynamique de production ou sur la génération de structures géométriques.

Cet axe, présenté ci-dessous, permet de définir des étapes de représentations où l'information géométrique s'appuyant sur la structure est de plus en plus dégradée, au profit de représentations de la production.

À l'échelle de l'organe, la représentation géométrique « classique » des plantes simulées (dans notre cas par une implémentation du modèle GreenLab) s'inscrit dans la logique des techniques classiques de CAO et de synthèse d'image. Nous avons particulièrement travaillé sur la définition de modèles géométriques multi-échelles (modèles LoD) dédiés à la représentation interactives de scènes végétales. Les principes et résultats des méthodes d'agrégation et de simplification de la structure sont décrits ci-dessous. À ce jour, peu de travaux ont été conduits sur la génération de modèles géométriques représentant le fonctionnement de la plante seule, ce point ne sera donc pas abordé, ici.

Nous aborderons la représentation et la simulation de la dynamique à l'échelle du paysage dans une autre section de ce chapitre.

Représentation « classique » des plantes simulées à l'échelle de l'organe

Les sorties géométriques (dans les simulateurs Amap ou GreenLab) ne présentent pas de composant graphique que l'on puisse directement visualiser mais des références et des transformations de composants. En sortie de simulation, on dispose pour tout élément de la plante (entrenœud, feuille, fruit, fleur) de deux facteurs d'échelles (principal pour la longueur, secondaire pour le diamètre ou la largeur), des orientations principales et normales et d'une origine (absolue ici). Ce qui revient, en termes mathématiques, à définir un opérateur affine de transformation et de positionnement dans l'espace pour chaque composant de la structure. L'ensemble des opérateurs est enregistré, avec quelques données typologiques telles que la nature du constituant, son âge, son âge physiologique. Ce codage de la représentation, que nous avons baptisé Ligne élastique (*Line Tree*) ne comporte donc pas de topologie (les liens entre les constituants ne sont pas explicités) mais reste de haut niveau car hautement paramétrable et portable.

La visualisation d'une plante simulée nécessite donc la définition d'objets graphiques associés à chaque type de constituants (figure 16.16). Nous construisons ces formes selon une définition normalisée: un même axe principal, inscrits dans un volume unitaire. Leurs géométries sont définies par des approches classiques de synthèse d'image ou de CAO dans des éditeurs géométriques dédiés. En fonction des besoins et des applications, nous obtenons des visualisations variées en exploitant des formes différenciées (feuilles dites gauches et dites droites) à géométrie complexe pour un même constituant ou à l'inverse, nous pouvons ignorer des constituants pour gagner en vitesse d'affichage ou obtenir des effets saisonniers (par exemple, visualiser un arbre en hiver en ne représentant que les entrenœuds).

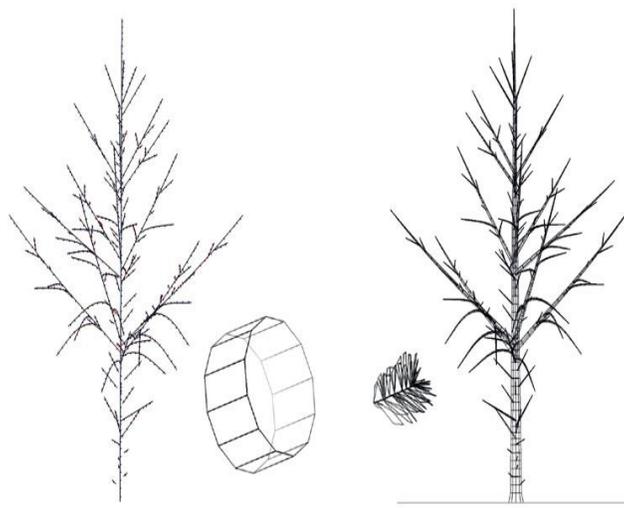


Figure 16.16. Ligne élastique et son habillage.

La simulation de ce jeune pin Douglas construit une liste de composants d'organe avec leurs origines, tailles et orientations. En liant les origines des axes, on peut représenter le squelette de la plante simulée (à gauche). A chaque type organe, l'entre-nœud et un groupe d'aiguille dans ce cas, est associé une représentation géométrique tridimensionnelle (milieu). L'instanciation de ces représentations permet ensuite la représentation exhaustive de la plante, comme illustré à droite pour les entre-nœuds.

Usage des technologies de la synthèse d'image

Organes et listes d'affichage

Dans la plupart de bibliothèques graphiques, on dispose d'une structure d'affichage qui se prête bien aux sorties des simulations. Cette structure est la liste d'affichage (*Display List*). Elle exploite la notion d'instanciation de propriétés graphiques. La liste d'affichage est une structure hiérarchique constituée de nœuds. À chaque nœud est spécifié une transformation affine dans l'espace (positionnement, orientation, mise à l'échelle), et un identifiant qui est soit une autre liste d'affichage, soit les ordres de tracés d'une forme. Les ordres de tracés spécifiant la géométrie de la forme, voire ces couleurs, sont définis une fois pour toute. La liste d'affichage est un mécanisme qui collecte des commandes graphiques pour une exécution ultérieure, particulièrement utile pour dessiner rapidement un même objet à différents endroits et orientations. C'est le cas pour les feuilles, mais on peut tout aussi bien exploiter cette liste pour les entre-nœuds, et hiérarchiquement pour tout ou partie d'un végétal.

Lors de la visualisation de la scène, on spécifie simplement l'identifiant d'une liste d'affichage (ou de plusieurs listes d'affichages). La bibliothèque graphique, OpenGL (Woo *et al.*, 1999) dans nos implémentations, va alors instancier les nœuds visibles de la liste, en appliquant leurs transformations respectives.

Illumination

L'illumination est le processus qui définit les variations de couleurs en interaction avec les sources lumineuses. Ce processus est en général très complexe et il est utilisé de diverses manières en synthèse d'image.

L'approche empirique rapide, appelée illumination locale, décompose la contribution énergétique selon 4 contributions sur la surface d'un objet : une composante d'émission (nulle pour tout objet n'émettant pas de lumière), une contribution ambiante (la couleur de l'objet en l'absence de lumière directe, qui sera modulée par une couleur d'ambiance de l'ensemble de la scène, une contribution diffuse fonction de l'orientation locale de la surface par rapport à l'orientation de la lumière, une contribution spéculaire fonction des orientations locale de la lumière et de l'observation (figure 16.17).

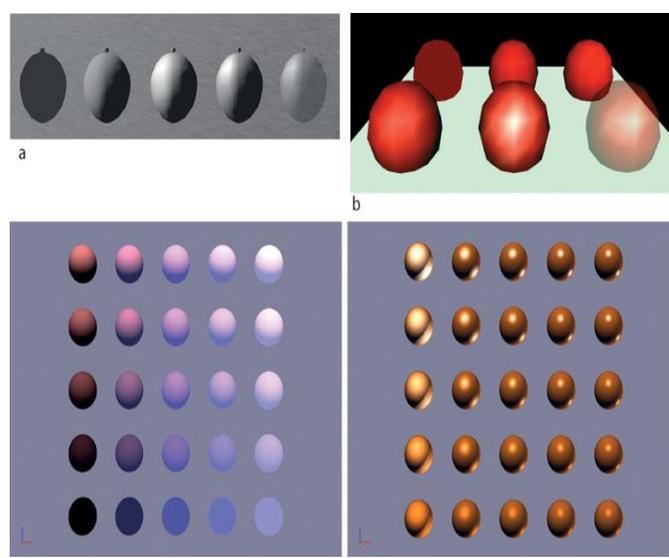


Figure 16.17. Modèle d'illumination simple.

Le modèle d'illumination définit la couleur de surface en fonction de la normale des surfaces et des directions d'éclairage et de vue. **a** : application sur un abricot. **b** : six représentations d'une sphère introduisant tour à tour l'émission, la diffusion ambiante, la diffusion normale, la diffusion spéculaire et la transparence. **c** : table de variation d'émission et de diffusion. **d** : table de variation de la diffusion spéculaire.

Dans notre cas, les composantes d'émission sont à ignorer et les composantes spéculaires sont faibles, présentes sur les feuilles principalement. L'éclairage peut souvent être simplifié à une unique direction, celle du soleil.

L'illumination locale est souvent insatisfaisante car elle ne rend pas compte des ombrages ni des effets d'occultations dans le climat radiatif ambiant. L'illumination globale est lourde à mettre en œuvre car elle simule les interactions énergétiques entre les composants dans la scène. Dans nos développements, avec comme unique source de lumière le soleil, on emploie un algorithme dont le principe est simple (Reeves *et al.*, 1987). On calcule d'abord une vue du soleil pour l'ensemble de la scène, dont on ne stocke que les profondeurs (la distance au soleil). Après avoir calculé notre image (vue de l'observateur), pour chaque point de l'image, on calcule sa position correspondante dans la vue du soleil. Si la profondeur de ce dernier est supérieur à celle présente dans notre vue du soleil, cela veut dire qu'il y a un point plus proche du soleil. On peut alors assombrir notre point qui se trouve, par construction dans l'ombre. Cette technique, moyennant un certain nombre de précautions liées à la résolution des images et à la précision (Reeves propose dans sa référence un filtrage efficace) est efficace et peu coûteuse sur nos scènes (figure 16.19).

Rendu des surfaces : l'usage de textures

Dans le cas de la représentation des plantes simulées, la construction des détails de surface est analogue à ce que l'on trouve sur des objets artificiels, voire même simplifiée compte tenu de leur grand nombre. Ils sont définis selon 3 points : la géométrie des organes, qui peut être plus ou moins complexe, le modèle d'illumination qui, dans notre cas, reste simpliste (comme spécifié ci-dessus), et enfin l'usage d'une texture que l'on plaque sur la description de l'organe. Selon la nature de l'organe, ces trois éléments n'offriront pas la même richesse. Les axes seront représentés par des portions de cylindre, et le détail viendra par l'ajout de texture d'écorces (figure 16.18). Pour les feuilles, la géométrie peut être importante selon les cas ; en particulier sur les plantes décoratives à grandes feuilles le nombre de polygones peut atteindre plusieurs centaines, alors qu'une feuille d'un peuplier se limite souvent à un simple losange. Les paramètres d'illumination des feuilles gagnent à être variables selon leur âge. Pour les autres organes (fleurs, fruits) la géométrie est généralement plus complexe faisant intervenir plusieurs matériaux graphiques, apportant ainsi des nuances de couleurs sans besoin spécifique de textures.



Figure 16.18. Représentation réaliste d'érables.

Obtenue par l'application de textures sur les représentations des organes (Jaeger, Cirad, 2013).

De manière générale, l'usage de textures permet d'accroître, à faible coût, le réalisme de surface des composants dans la visualisation des plantes simulées (figure 16.19). Le placage d'image d'écorce en est un exemple. Cependant, la variation des motifs sur l'écorce selon l'âge (le long d'un axe) est difficile à restituer par cette simple technique, et est généralement ignorée. L'emploi des textures est cependant très efficace, il permet de limiter la complexité géométrique des axes, voire de tout ou partie de la représentation d'un végétal. Dans nombre d'applications, comme nous le verrons plus loin, on substitue la visualisation de la géométrie de la structure à une image de la plante lorsque cette dernière se trouve suffisamment loin de l'observateur.

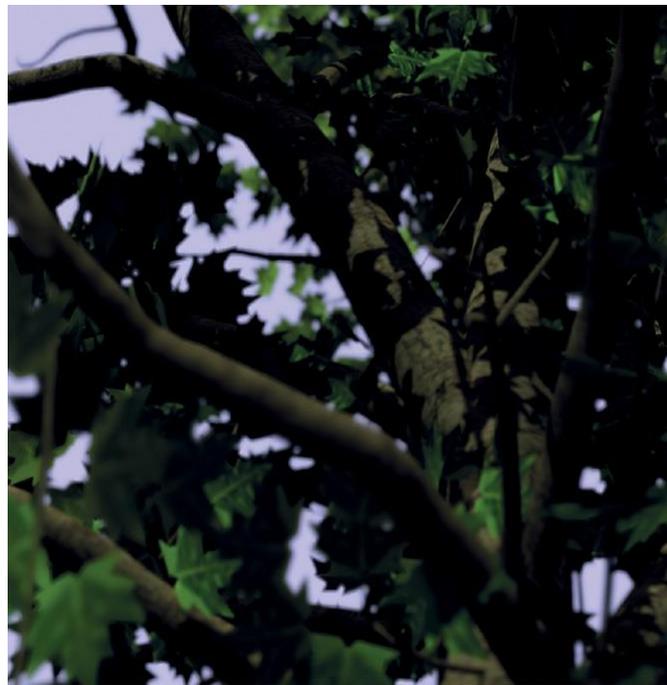


Figure 16.19. Exemple d'un jeu de textures utilisé pour la représentation d'érables virtuels avec l'application d'un modèle d'illumination globale (ombrages) et de filtres de profondeur de champ.

NOTION DE TEXTURE

Dans le domaine de la synthèse d'image, une texture est une image en deux dimensions que l'on va appliquer sur une surface de manière à habiller cette surface. On peut assimiler une texture à une étiquette que l'on applique à la surface d'un objet. Les textures sont utilisées

pour enrichir le rendu photo-réaliste des objets. Leur visualisation dans les cartes graphiques nécessite des filtrages afin de prendre en compte des problématiques de résolution en fonction de la distance à l'observateur. L'usage de telles images est répandu mais est grand consommateur de mémoire vidéo car les images doivent être chargées dans la carte graphique. Dans un contexte de visualisation de scènes naturelles, cette contrainte présente un frein majeur à la diversité des représentations si celle-ci s'appuie massivement sur cette technique.

Problèmes posés par la visualisation des modèles structuraux

Avec de nombreux composants décrivant la représentation hiérarchique et ramifiée de la structure et épars décrivant les organes, la représentation d'une plante simulée est lourde. Lorsque l'on s'intéresse à une culture, une placette, bref une scène comprenant de multiples plantes simulées, leurs représentations soulèvent de nombreuses questions de recherche dans un contexte de visualisation réaliste et rapide (affichage en temps réel soit la création de 25 images par seconde). De plus, les technologies des cartes graphiques se prêtent mal à la visualisation de petites surfaces : elles sont souvent ignorées par les cartes graphiques lorsque leur projection est plus petite qu'un point d'écran (un pixel). En se contentant des techniques classiques de visualisation polygonale, les feuilles d'un arbre, et les fines branches peuvent donc brutalement disparaître ou apparaître sur des petites variations de distance entre le végétal et l'observateur. D'où la nécessité de développer des techniques particulières, appelées multi-échelle et à niveau de détails (encore appelé multi-résolution), où vont intervenir des modalités différentes de visualisation d'un même individu, tout en assurant un continuum entre ces modalités.

En fait, pour les scènes végétales, les méthodes de calcul d'image vont définir, pour une même plante, des représentations géométriques simplifiées en fonction de la distance à l'observateur. Les principes sont les suivants : si la distance augmente, les feuilles sont fusionnées par unité de croissance puis par sous-structure, les courbures des branches lointaines sont simplifiées ou représentées par de simples lignes transparentes, sans que cela nuise au réalisme ou au rendu des scènes représentées.

Visualisation multi-échelle des axes

Dans la plupart des générateurs de plantes, les axes sont formés par une succession d'entrenœuds, autorisant ainsi leurs concaténations. Cette propriété est employée dans les simulateurs où les entrenœuds successifs le long d'un axe sont fusionnés ; avec des contraintes de nature topologique : il faut que l'axe reste physiologiquement de même nature, et avec des contraintes géométriques : seuls les nœuds successifs respectant une courbure faible sont fusionnés.

Dans nos sorties des premiers simulateurs, les constituants fusionnés (portions d'axes) sont affectés d'un niveau de détail (1 à 5), en fonction d'un ratio de diamètres : le diamètre courant sur le plus grand diamètre de la plante. À l'affichage, selon la distance à l'observateur, ne seront affichés que les constituants estimés importants.

Cette approche empirique fut revisitée, de 2004 à 2006, au sein du Laboratoire franco-chinois d'informatique d'automatique et de mathématiques appliquées (Liama), en collaboration avec le professeur XiaoPeng Zhang. Le principe de compression reste semblable. La structure ramifiée est convertie en un squelette dont les nœuds correspondent aux nœuds de la simulation. Le squelette est valué, c'est-à-dire que chaque nœud porte le diamètre de l'axe correspondant. Le squelette est converti en un diagramme particulier, dit de Frenet, de façon à pouvoir quantifier les courbures, et ainsi calculer les erreurs de position et directions en chaque nœud lors de fusions. Nous définissons ainsi une série de squelettes à des résolutions diverses, sur lesquels nous pouvons également effectuer des seuillages en fonction des diamètres (figure 16.20). Enfin, et c'est ici que réside la principale innovation, nous effectuons le plongement géométrique au moment du rendu, avec un maillage adapté au diamètre de l'axe et à la distance à l'observateur (c'est-à-dire au diamètre apparent). Si ce dernier est très faible (sa projection inférieure au pixel), l'axe sera représenté par une ligne semi-transparente dont le coefficient d'opacité est fonction de ce diamètre apparent. Avec cette technique, les arbres sont représentés avec un grand réalisme, tout en maintenant une vitesse d'affichage temps réel.



Figure 16.20. Représentation multi-échelle des axes.

Comparaison de deux approches. Les composants sont affichés selon un critère de taille, le diamètre des entrenœuds. Le critère est considéré pour l'ensemble de l'axe et le maillage géométrique de l'axe est paramétrique, il évolue le long de l'axe. Cette deuxième approche est plus performante en temps et présente une géométrie plus précise. Marc Jaeger, Cirad-Amap, 2013.

Visualisation multi-échelle des feuilles et organes

La représentation du feuillage est par nature distincte de celles des branches par la dispersion des primitives, éparées.

Dans les premiers simulateurs Amap, les organes ne sont pas soumis à des variations d'échelles. Contrairement aux modèles FSPM tel que le modèle GreenLab, toutes les feuilles d'une plante simulées sont donc identiques et représentées par un même modèle géométrique. De ce fait, dans les anciens travaux, à l'échelle d'une plante, les niveaux d'échelle sont simplement définis par un seuillage aléatoire. Aux 5 niveaux de détails définis sur les axes en fonction de leur diamètre, sont associés 5 niveaux de probabilité de présence de feuilles, représentant respectivement 5 %, 10 %, 15 %, 25 % et 45 % du nombre total de feuilles. Ainsi, au niveau de détail 1, un arbre « Amap » présente généralement le tronc, la base de branches maîtresses et 5 % des feuilles distribuées quasi équitablement dans la couronne. Ce principe est efficace, peu coûteux, d'autant qu'une écriture judicieuse des constituants, du niveau de détail le plus faible au plus élevé, facilite grandement son exploitation : plus on veut de détails, plus on lit d'éléments dans le résultat de la simulation.

Avec le développement de la simulation du fonctionnement, la taille des organes devient très variable, reflétant la compétition interne au sein de la plante et les conditions environnementales avec leurs dynamiques. Seules les feuilles apparues au même moment, au même stade physiologique, sont identiques.

Pour ce, nous avons développé les représentations multi-échelles du feuillage en coopération avec l'équipe de Xiaopeng Zhang au Liama et plus particulièrement dans le cadre de la thèse de QingQiong Deng (de 2004 à 2008). À partir de 2003, sur la base de l'idée de l'espagnol Inmaculada Remolar (Remolar *et al.*, 2003), sont testées les approches de fusion de feuilles sur des arbres générés par la gamme Amap où toute feuille est supposée être un quadrilatère. L'idée est de fusionner les quadrilatères entres eux, deux à deux, de manière itérative, selon des critères géométriques. L'union est construite à partir des points extrêmes présents dans les feuilles candidates (figure 16.21).

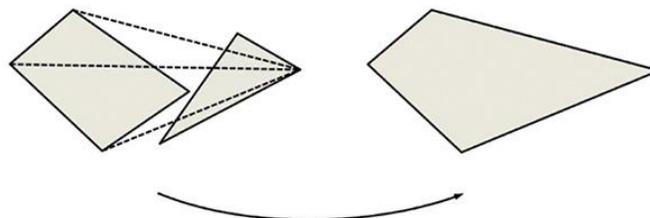


Figure 16.21. Principes de la fusion des représentations des deux feuilles.

Les représentations des deux feuilles candidates sont projetées sur le plan moyen défini par les deux représentations. Les points extrêmes des projections des deux feuilles candidates définissent un nouveau quadrilatère dans le plan moyen. Marc Jaeger, Cirad Amap, 2013.

Les feuilles candidates à la fusion sont sélectionnées selon des principes de voisinage géométrique et de voisinage topologique. Nous exploitons ainsi la connaissance de la structure, en particulier en cherchant à fusionner les groupes de feuilles d'une même unité de croissance (Zhang *et al.*, 2006).

Les algorithmes sont étendus à des feuilles non quadrilatères. Nous montrons également que l'on a intérêt à développer des algorithmes plus spécifiques lorsque l'on traite des conifères. La représentation des aiguilles, constituée par des cylindres définis par 8 faces est progressivement dégradée en 6 puis 3 faces pour être remplacée par des lignes semi-transparentes, dont on ne représentera progressivement qu'une instance parmi toutes (Deng *et al.*, 2007). Les opérations successives d'union sont poursuivies jusqu'à l'obtention d'un unique quadrilatère pour l'ensemble des feuilles. Cette décomposition constitue un arbre dont chaque nœud correspond à une opération de fusion, et donc à une nouvelle représentation. Sur chaque nœud on stocke également le coût de l'union. Lors de la visualisation, on parcourt l'arbre dont les nœuds ont un coût compris entre deux valeurs seuils correspondant à une erreur de projection (contrôlée par l'utilisateur et les paramètres de projection).

Dans nos implémentations nous avons de plus différencié des niveaux de détail au sein des couronnes selon deux ratios liés à des sous-structures : la densité d'une part, la distance et l'orientation de l'autre. En effet, plus les feuilles sont denses, plus les unions seront nombreuses et pertinentes. De même, nous différencions les niveaux de détail au sein de la couronne en fonction de la distance et de l'orientation des structures portant des feuilles, partant du principe que les axes « arrières » présentent une occultation importante, les axes à l'arrière de la structure cachent la densité des feuilles (Deng *et al.*, 2007, 2010).

Les principes guidant les algorithmes de définition de visualisation multi-échelles des feuilles restent semblables lorsque l'on s'intéresse au cas des fleurs et des fruits.

L'ensemble des techniques multi-résolutions employées pour la visualisation des axes et organes permet aujourd'hui d'obtenir des visualisations réalistes rapides pour des vues piétonnes, y compris de végétations denses, par exemple en forêt (Bao *et al.*, 2011) telles qu'illustrée en figure 16.22. Elles présentent cependant des coûts de pré-traitement important et s'adapte mal à des vues larges, de type aériennes qui emploie des techniques à base d'imposteurs.

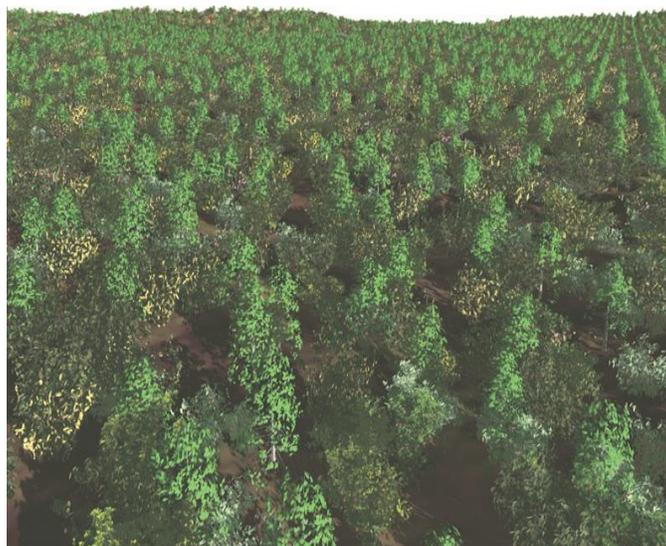


Figure 16.22. Représentation temps réel (12 images par seconde) d'une forêt virtuelle.

La scène, construite à partir de cinq simulations, comprend plus de 10000 individus. Chaque simulation est déclinée selon quatre niveaux de détails. Dans cette vue, 443 arbres sont visibles. Les arbres détaillés au premier plan sont au nombre de 22, ceux de l'arrière-plan sont au nombre de 211 ; (au second plan : 34, au troisième plan : 176). Le nombre de facettes utilisées dans la scène est d'un peu plus d'un million (1083083), dont plus du tiers (356000) proviennent des arbres du premier plan. Il est à noter que l'ombrage est inclus dans ces scènes temps réel, les arbres représentés sont donc affichés deux fois, dans une vue du soleil puis dans la vue de l'observateur. GuanBao Bao, XiaoPeng Zhang, Marc Jaeger, 2011.

Limites des approches polygonales multi-échelles

À l'issue de ces travaux, la génération de modèles multi-échelles à partir de plantes simulées ou reconstruites semble avoir atteint un stade de maturité, dont les évolutions seront sans doute faibles et basées sur un usage accru de la carte graphique (la GPU), notamment pour la génération du maillage des branches à partir du squelette. L'approche multi-échelle polygonale reste cependant lourde. Grâce au regroupement et à l'usage d'informations topologiques, les temps dédiés au post-traitement n'ont pas cessé de diminuer pour atteindre la seconde pour les arbres illustrés ici, mais le volume consacré aux représentations multi-échelles est conséquent. Les performances en visualisation sont effectives si la mémoire RAM (et la mémoire GPU pour le feuillage) ont les capacités de stockage suffisante pour contenir ces modèles géométriques. Donc, si les plantes à représenter sont fortement instanciées dans les scènes. Ces approches géométriques assurent une géométrie réaliste pour des vues de proximité. Dans un contexte de vue éloignée (aérienne par exemple), en l'absence de vue de près, une approche basée sur des imposteurs s'impose. Mais sans pour autant pouvoir répondre au volume d'information en présence de nombreux individus distincts.

Autres modèles de représentation du végétal

Nous avons vu que les modèles structuraux ont un coût important de représentation et de visualisation. Une alternative commune en synthèse d'image consiste à utiliser des représentations spécifiques, soit plus synthétiques ne décrivant pas l'objet lui-même mais son image, soit en dégradant les primitives graphiques à de simples points. Elles s'inscrivent dans les problématiques de la visualisation temps réel de scènes complexes. Ces techniques et quelques-unes de leurs extensions sont abordées ici.

Nous montrons aussi que ces alternatives ignorent la structure sous-jacente des objets, elles cherchent à représenter la forme de ces derniers. C'est le cas de représentations utilisées dans des contextes forestiers, où la plante (l'arbre) en tant qu'individu est également représentée de manière synthétique, à partir de formes élémentaires paramétriques.

Enfin, de nouvelles manières d'appréhender la géométrie du végétal *in situ* grâce à des systèmes d'acquisition de plus en plus performants et populaires sont décrites.

Modèles informatiques orientés vers la visualisation en temps réel

Pour faire face à la complexité croissante des scènes virtuelle, la synthèse d'image a vu l'apparition de modèles spécifiques de visualisation et de rendu : le rendu à base d'images (IBR, *Image-Based Rendering*) et le rendu à base de points (PSR, *Point Sample Rendering*), offrant des alternatives à de lourdes représentations polygonales ou surfaciques.

Chacune de ces approches apportent des gains et inconvénients, donnant lieu à de très nombreuses techniques dites hybrides. Elles cherchent à combiner les avantages du rendu conventionnel avec les avantages des rendus à base image et à base de points.

Approches images

Dans le rendu à base d'images (IBR), on emploie un ensemble pré-acquis d'images de la scène. Ces images, prises à des positions données, sont réutilisées pour reconstruire l'apparence de la scène selon d'autres points de vue. La complexité de la scène reste donc modeste, liée au nombre d'occurrences des images employées.

Toutes ces méthodes effectuent donc un pré-calcul d'une partie de la scène. L'image créée est utilisée par la suite en tant que texture plaquée sur un rectangle positionné au sein de la scène. Ainsi, à la place de l'objet complexe est affichée son image : c'est ce que l'on appelle un imposteur (Maciel, 1995). Aujourd'hui, on entend sous ce terme de multiples représentations simplifiées se substituant à la représentation du modèle complexe.

Les plus simples des imposteurs sont le *billboard* (littéralement, panneau d'affichage) et le *sprite* (littéralement, lutin). Un *billboard* est un plan texturé placé dans la scène, représentant un objet complexe. Un *billboard* est employé pour représenter des objets tels que des nuages ou des arbres, dont les modèles géométriques sont lourds à calculer et à afficher. Dans la pratique,

on distingue le *billboard* toujours parallèle à l'écran, de celui toujours orienté vers l'observateur et de celui considéré comme un simple plan dans la scène. Ceux toujours parallèles à l'écran ou orientés vers l'observateur sont utilisés pour représenter des nuages ou de la fumée. Pour un végétal, on emploie souvent deux images perpendiculaires (un *crossboard*) que l'on positionne comme un objet 3D usuel polygonal. La figure 16.23 illustre ces deux techniques.

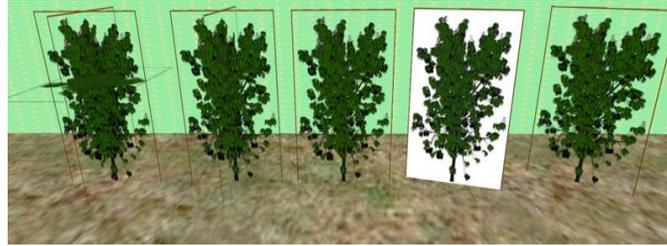


Figure 16.23. Imposteurs pour représenter un arbre simulé.

Appelées imposteurs, ces représentations sont constituées de plans sur lesquels on plaque des images de l'arbre simulé. De gauche à droite : un *crossboard* constitué de trois plans orthogonaux (vues de face, droite et haut). En deux, un *crossboard* sans la vue du haut, puis limité à la vue de face. À droite, un *billboard*, dont l'orientation est constante vis-à-vis de l'observateur. En quatrième position, le même *billboard* n'utilisant pas la transparence pour le fond. Ces scènes sont décrites en langage VRML (*Virtual reality meta language*), et peuvent être visualisées sur un explorateur Web (d'après, Jaeger *et al.*, 2010).

Un *sprite* est généralement une image plus petite, souvent en mouvement. Elle est appliquée directement à l'écran, indépendamment de l'orientation de la caméra. La représentation de feux, de flocons de neige, de gouttes de pluie, emploie typiquement cette technique.

Dès nos premières conceptions de scènes, il était devenu incontournable d'utiliser des techniques simples représentant des images de végétaux plutôt que leur géométrie. On parlait de « formes pixels » (Jaeger, 1987). On appelle forme pixel une forme définie par une image de faible définition (160 X 160 points par exemple). 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 approchées (figure 16.24).

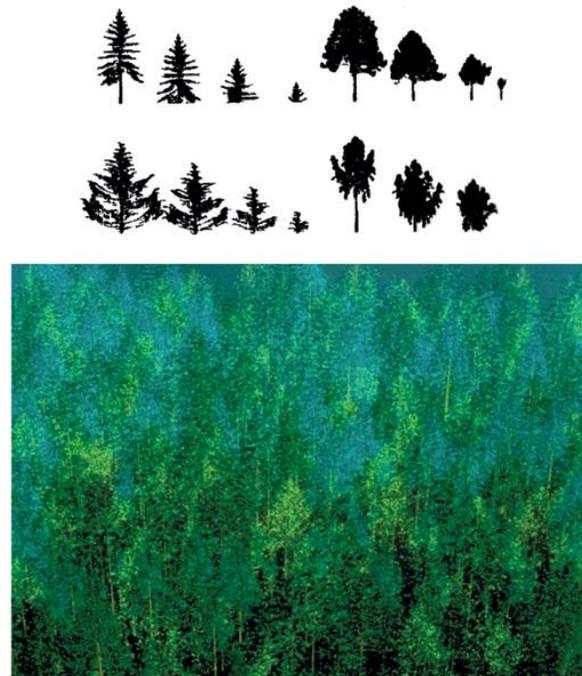


Figure 16.24. Formes « pixels ».

La première construction d'imposteurs, présentée dans la thèse de Marc Jaeger en 1987. Réalisation d'une scène forestière employant cette technique (Jaeger, 1987).

Aujourd'hui, grâce à la technologie des textures, l'usage du *billboard* et du *crossboard* est devenu courant dans de nombreux outils professionnels (LandSim3D), pour la visualisation Web (Honjo, Lim, 2001), (Honjo *et al.*, 2009) ou les jeux.

Les textures ne permettent pas de prendre en compte les effets de parallaxe, car inscrite sur un plan, elles ne peuvent rendre compte de l'impression de relief. Pour pallier ce problème, on peut utiliser plusieurs vues ou plusieurs profondeurs de textures pour un même objet. Jakulin fut le premier à utiliser des coupes de vues orthographiques (Jakulin, 2000) sur des représentations de palmiers. Xavier Décoret et ses collègues de l'Inria (Decoret *et al.*, 2003) proposent une méthode qui permet de répartir automatiquement des plans recouvrant l'objet de façon optimale. En calculant les vues sur chaque plan, ils construisent un ensemble de *billboard*. Les imposteurs sont affichés lors du rendu, les plans se superposant et se combinant à l'aide de la composante de transparence des textures. Nous avons, en collaboration avec l'équipe du Professeur XiaoPeng Zhang au Liama, adapté cette technique au végétal, et plus particulièrement à la plante seule. Elle consiste à créer un atlas avec des vues orthographiques de l'arbre en entier ou de sa couronne dans le cas hybride (Bao, 2010). Cette solution est également employée dans les outils professionnels tels que LandSim3D de Bionatics SA comme illustré en figure 16.25.

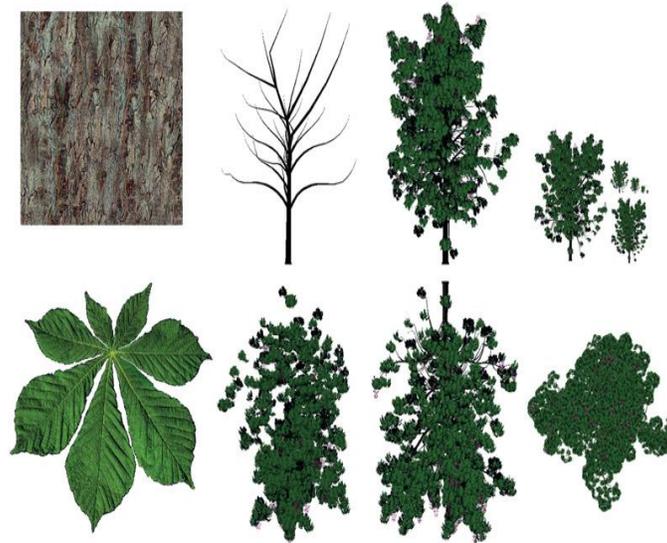


Figure 16.25. Texture « atlas » d'un marronnier.

Cette texture contient plusieurs vues employées pour une représentation multi-échelle d'un marronnier. À gauche, les textures que l'on calque sur la géométrie des branches et des feuilles pour les représentations tridimensionnelle. En deuxième colonne, nous avons un imposteur par type d'organe pour la conception de billboards. Puis, en troisième colonne et en bas à droite, 3 vues orthogonales de la plante pour construire des crossboards à 2 ou 3 plans. Enfin, en haut à droite, mêmes vues avec des résolutions de plus en plus faibles (divisées par 2 à chaque étape). Dans l'affichage d'une scène contenant des marronniers, l'atlas est chargé dans la mémoire graphique. Selon la distance à l'observateur, des représentations géométriques distinctes seront employées en fonction de la distance à l'observateur, impliquant les diverses portions de l'atlas (Jaeger, 2013).

De nombreux autres développements s'appuient sur l'usage d'imposteurs avec des complexités croissantes. De la simple gestion des profondeurs proposées par Nelson Max (Max, 1996), les imposteurs sont devenus des nuages de plans (*clusters*), dont la construction est hiérarchisée afin d'adapter la complexité de la géométrie et de l'illumination à la distance à l'observateur (Behrendt *et al.*, 2005). Ce type de solution est également employé dans les outils professionnels. Ainsi, LandSim3D de Bionatics SA, comme illustré en figure 16.25, utilise une approche hybride (mélange 2D et 3D) où la décomposition de la plante en imposteurs (plaques texturées) dépend de la distance à l'observateur et d'une métrique appliquée à l'architecture de la plante. Cela permet de sélectionner des parties représentatives de la plante qui sont transformées en imposteurs remplaçant toutes les parties équivalentes (du point de vue de la métrique) de la plante. Un arbre adulte représenté par plusieurs millions de triangles en 3D peut ainsi garder son apparence générale avec une représentation hybride totalisant seulement quelques centaines de triangles.

Représentations par points (surfels)

Dans le rendu à base de points, on affiche une discrétisation des surfaces (voire des objets) de la scène plutôt que des primitives géométriques. Plusieurs avantages en découlent : le rendu d'un point est simple, rapide. Les points étant indépendants les uns des autres, il n'y a pas lieu d'impliquer une structuration. Enfin, les niveaux de détails sont simples à définir, en relation avec un pas de discrétisation.

L'approche possède cependant des limites dues à l'absence de cohérences dans les modèles et, dans notre cas sur la génération des points eux-mêmes.

Pour pallier l'absence de cohérence, les points sont représentés par des « surfels ». Le concept de surfel (abréviation de surface élément), fut développé par les chercheurs allemands Pfister Zwicker, Van Baar et Gross (Pfister *et al.*, 2000).

NOTION DE SURFEL

Un surfel est un échantillon ponctuel de la surface d'un objet avec des attributs de position, texture, normale, etc. À l'affichage, les surfels texturés doivent être filtrés avant d'être représentés (écrasés) sur l'écran (point *splatting*). Le filtrage le plus répandu est le filtre par pondération moyenne elliptique (EWA Filter, *Elliptical Weighted Average*) (Heckbert, 1989) qui donne de très bons résultats visuels mais aussi un lourd coût en temps de calcul.

La définition des surfels, c'est-à-dire leur composition, est aussi un problème. En synthèse d'image, les objets sont souvent représentés par des surfaces pour lesquels les surfels s'obtiennent par discrétisation. Dans les travaux pionniers (Pfister *et al.*, 2000), l'objet est représenté par des échantillons de surface composés d'une profondeur, une normale et différents niveaux de couleurs pré-calculés (issus de la texture appliquée à l'objet). Les surfels sont regroupés dans une structure hiérarchique. Cette structure est créée lors de la discrétisation de l'objet 3D, basée sur trois vues ortho-graphiques de l'objet (face, profil et haut). Dans le cas des végétaux cette structure est coûteuse. Les chercheurs de l'Inria, Gilet, Meyer et Neyret (Gilet, 2005) proposent une représentation construite par des surfels triangulaires, points et segments de droite. La représentation initiale (souvent) polygonale est convertie en triangles que l'on plonge dans un espace cubique (de 4 par 4 par 4). Dans chaque boîte, les auteurs fusionnent, en fonction de leur taille chaque triangle en un point ou en un segment. Ces représentations sont fusionnées à leur tour. L'ensemble des fusions génère des représentations multi-échelles de surfels (triangles, points, segments), qui seront affichées à leurs niveaux correspondants, selon la distance à l'observateur.

Modèles hybrides

Aujourd'hui les représentations végétales interactives les plus spectaculaires sont présentes dans le monde du multimédia et en particulier dans celui du jeu *Crysis by Crytek* (Kharmalov, 2008) ou dans le monde professionnel (LandSim3D^[6]). Elles emploient des modèles hybrides qui s'appuient sur des éléments structuraux polygonaux pour le tronc et quelques axes principaux et utilisent des images pour les couronnes ou les complexes de feuilles.

Dans nos travaux, nous avons exploité les acquis des modèles multi-échelles des feuillages : les textures de feuillage et branches sont calculées sur les plans des parallélogrammes définissant le feuillage aux niveaux de détail ultimes (Deng *et al.*, 2007a). Cette approche s'est révélée efficace pour la reconstruction tridimensionnelle de forêt à partir d'inventaires réels tel qu'illustré en figure 16.26 (l'ombre au sol est également un imposteur).



Figure 16.26. Modèles hybrides.

Les arbres au premier plan sont des modèles mixtes, dont le tronc et les grandes branches sont définis par des polygones tridimensionnels, alors que les feuillages sont des imposteurs. Cette vue implique 4 espèces différentes de divers âges. La scène a été obtenue à partir d'une fiche d'inventaire forestier (Deng Q.-Q., Zhang X.-P., Lei X.-D., Jaeger M., 2007).

Dans ces approches hybrides, les techniques de rendu utilisent massivement les capacités des cartes graphiques (les GPU) avec entre autres, des approches de rendu multi-passes (Kharlamov *et al.*, 2008 ; Sousa, 2008) donnant à l'industrie du jeu des représentations impressionnantes.

Représentations dans les outils et les pratiques en foresterie

Pour la synthèse d'image, la caractérisation d'un arbre, ou plutôt de sa couronne par une unique enveloppe, même fortement concave, supporte mal des vues rapprochées même si les représentations sous formes d'ellipsoïdes sont parmi les plus anciennes (voir l'approche pionnière de Gardner, 1984). Les approches géométriques « globales » sont donc peu employées en imagerie, trop grossières vis-à-vis des modèles géométriques, trop proches du *crossboard*. Elles sont plutôt employées dans les stades amont de modélisation pour contraindre des développements, ou dans le cadre d'outils forestiers. En effet, dans de nombreuses applications de ce domaine, la caractérisation des individus (des arbres) emploie des grandeurs synthétiques : hauteur, diamètre du tronc à 1m30, hauteur de la première vivante...

Ces informations permettent de construire des représentations de couronnes à partir de forme prédéfinies. C'est le cas dans les outils tels que Forester^[7], SmartForest (2000), WorldConstructionSet^[8], Stand Visualization system (SVS). Dans le cas de Forester, on affecte une forme conique par défaut à une instance d'arbre. L'outil permet, dans ses fonction de visualisation réaliste, d'utiliser une représentation polygonale 3D statique, qui sera, de fait, la même pour toute les instances de l'espèce. Dans le cas de SVS^[9] développé par l'United States Department of Agriculture, Forestry Service, l'outil dispose d'un éditeur spécifique. C'est un modèle géométrique d'arbre, basé sur la définition d'une enveloppe paramétrique de la couronne. Elle est définie par une hauteur, un type de forme et un à deux diamètres. Cette couronne est utilisée comme une enveloppe contraignant des branches dont l'utilisateur spécifie la densité et l'inclinaison (figure 16.27). Elle possède une petite fonction d'évolution, montrant la montée et la déformation du houppier au cours du temps.

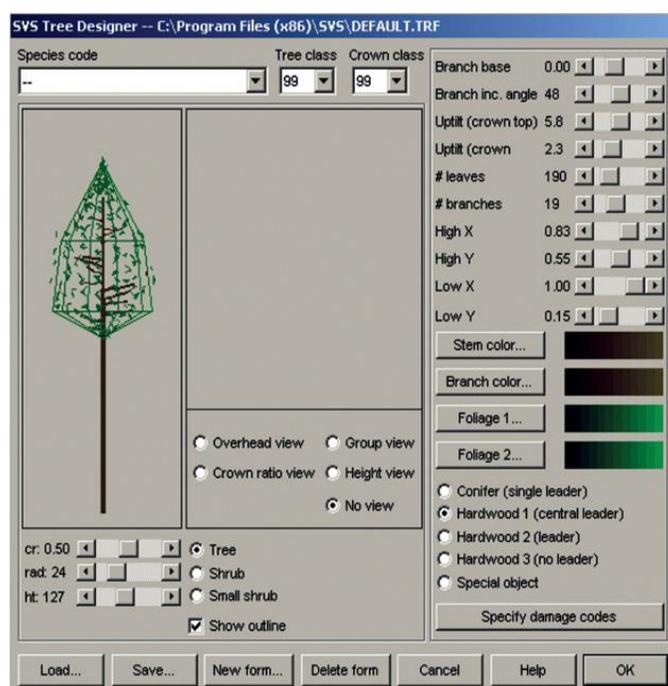


Figure 16.27. Représentation géométrique des arbres dans l'outil SVS.

Sur la gauche, sous la représentation, les paramètres forestiers usuels caractérisant les couronnes. Sur la droite, un jeu de paramètres géométriques et graphiques dédiés à construire une représentation et une visualisation plus ou moins exhaustive de la branchaison et de la couronne. Capture d'écran de l'outil Stand Visualization System de l'USDA.

Représentations issues des acquisitions du monde réel

La reconstruction 3D de plantes à partir d'images simples ou multiples ou d'acquisition laser forme une thématique récente, en plein essor. Les approches de reconstruction s'appuient sur des modalités différentes, de la simple image à l'exploitation de plusieurs jeux d'acquisition laser. En général, le traitement des acquisitions permet de construire soit des squelettes, soit des cibles, qui vont définir la structure ramifiée (Quan *et al.*, 2006 ; Reche-Martinez *et al.*, 2004 ; Shlyakhter *et al.*, 2001 ; Tan *et al.*, 2007 ; Tan *et al.*, 2008). Cette dernière est affinée par des approches utilisant localement des règles (empiriques, systèmes de particules, grammaires) pour garantir la continuité des axes et générer les bout d'axes ou les axes périphériques.

La première reconstruction de ce type (Shlyakhter *et al.*, 2001) s'appuie sur l'enveloppe convexe obtenue par traitement de clichés photos, les axes principaux guidant la définition de règles de L-système. À ces travaux, lourds à mettre en œuvre, ont succédé des approches constructives utilisant une discrétisation régulière de l'espace (dont les cubes unitaires sont appelés des voxels) (Reche-Martinez *et al.*, 2004 ; Quan *et al.*, 2006).

Dans la plupart des approches, on opère en deux temps. Une première étape vise à construire les axes principaux. Dans une deuxième étape, des procédures spécifiques, inspirées des approches de modélisation procédurales, sont employées pour générer les axes secondaires et le feuillage. L'une des approches les plus originales à ce stade est sans doute celle utilisant des particules en migration vers l'enveloppe de la couronne (Neubert *et al.*, 2007).

Avec l'essor des acquisitions laser terrestre (Tlidar), les reconstructions tridimensionnelles à partir d'échantillonnages ponctuels initiés par J. Bloomenthal se sont de plus en plus développées (Cheng *et al.*, 2007 ; Xu *et al.*, 2007 ; Ning *et al.*, 2009).

Dans la majorité de ces travaux, le premier stade de traitement réside dans une classification des données. Elle est obtenue en calculant localement les normales aux points dont on ne conserve que les voisinages et dont les courbures sont proches, propriétés discriminantes des axes par rapport au feuillage. Les portions de branches sont ensuite extraites par propagation d'une fonction géodésique de calcul de distance (Chen *et al.*, 2008). Selon le cas, elles peuvent ensuite être analysées, fusionnées, complétés, jusqu'à l'obtention d'un squelette structuré (Ning *et al.*, 2009).

Dans la thèse de Zhu Cao au Liama, il est également montré que l'enveloppe feuillée pouvait être extraite pour obtenir une surface de couronne ou une décomposition de couronnes via une tétraédrisation. Elle est construite par le formalisme des *Alpha shapes* (Edelsbrunner *et al.*, 1994), une extension paramétrique des diagrammes de Voronoï. Par un processus itératif, nous calculons le paramètre alpha pour lequel l'enveloppe reste une unique surface (Zhu, 2008).

On peut quelque peu réduire la durée des itérations et leur complexité en définissant des groupes au sein des points de la couronne. Pour ce, on extrait d'abord les branches par propagation d'une fonction géodésique de calcul de distance. Puis on construit des groupes (clusters) avec les points de couronnes en prolongeant les axes principaux du squelette. On applique enfin le processus de maillage solide décrit ci-dessus sur chacun des groupes identifié, réduisant notablement les temps de calculs (Zhu *et al.*, 2010) (figure 16.28).

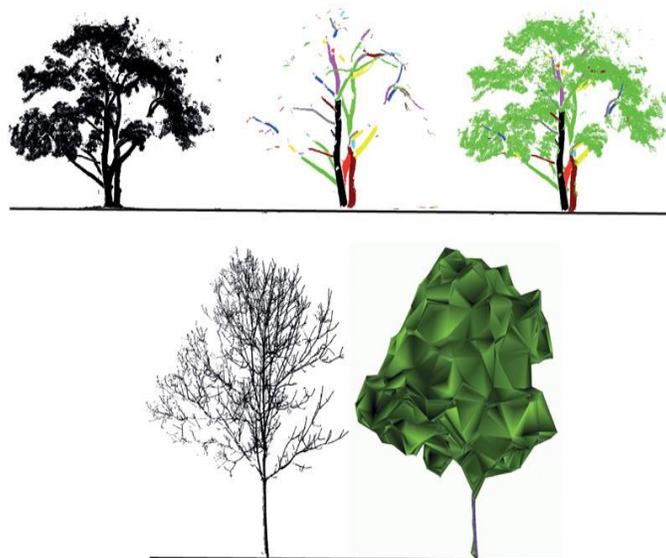


Figure 16.28. Représentations obtenues à partir du traitement d'acquisition du Laser terrestre.

En haut : on sépare les points du feuillage de ceux de la structure par soustraction. **En haut à gauche :** les données laser se présentent selon un grand nombre de points dont les positions sont connues. Les points des branches montrent une continuité géométrique et de courbure dans leur voisinage ; ils sont regroupés et définissent des portions d'axes (**en haut au milieu**). Les autres points sont considérés comme des feuilles (**en haut à droite**). **En bas :** construction d'une représentation polygonale à partir d'un maillage tridimensionnel. Dans cette approche on part d'un maillage tridimensionnel dans lequel on enlève petit à petit les faces internes pour aboutir à l'enveloppe de l'arbre (Zhu Chao, Xiaopeng Zhang, Marc Jaeger, 2009).

Les applications du laser se multiplient chaque jour mais comportent encore de nombreuses difficultés pour un usage massif. Face aux volumes de traitement, à la complexité d'extraction de données dans les cimes, elles privilégient aujourd'hui des développements exploitant des caractéristiques statistiques géo-spatialisés sur les principaux axes, en particulier pour la définition de données d'inventaires forestiers. Dans les usages multimédia, l'analyse de données sur des individus isolés progresse bien et permet des reconstructions convaincantes (Livny *et al.*, 2010), aboutissant à des squelettes que l'on peut analyser finement et autorisant leur reconstruction.

De la plante au paysage virtuel

En introduction de ce chapitre, nous avons souligné l'importance que révélait la représentation et la visualisation de l'individu plante. En sortie des simulations implémentant le modèle GreenLab, il est en effet crucial de représenter le résultat des calculs. Cependant, dans les applications du modèle, il est rare que les questions se limitent à l'individu en tant que tel, et les représentations demandées concernent majoritairement un ensemble de plantes.

Cet ensemble peut se limiter à une seule espèce (champ agricole) en présentant, dans une même vue des individus distincts, issus de calculs pour lesquels des données ou des paramètres changent :

l'âge de la plante, afin de visualiser la croissance d'un individu particulier ;

la graine (l'initialisation aléatoire dans un cas stochastique), pour appréhender la variabilité structurelle intra spécifique ;

un facteur environnemental, pour appréhender la plasticité de l'architecture face à la pression de l'environnement (densité de plantation) ;

un paramètre endogène, pour comparer des architectures de clones différents d'une même espèce, par exemple.

On peut également être amené à s'intéresser à la représentation d'une culture homogène ou non. Plus généralement, c'est un biotope plus ou moins complexe que l'on peut être amené à vouloir représenter. Au-delà du périmètre des activités de recherche, la représentation de biotopes intéresse de nombreux acteurs impliqués dans la gestion et l'aménagement des territoires, selon des entrées variées : urbanisme, écologie, loisir, et parc naturels), des acteurs de la défense, y compris civils (dans la prévention des risques, incendie notamment), mais aussi les acteurs du multimédia, et ceux des jeux vidéo.

À ce jour, toutes les applications courantes impliquant la représentation de végétaux à large échelle font appel à des représentations individuelles. Deux volets bien distincts composent donc ces outils : le premier concerne l'exploitation des représentations individuelles, en employant des techniques multi-échelles ; le deuxième concerne la définition des biotopes et leur interprétation pour la visualisation. Ces deux aspects sont abordés via l'exemple de deux outils de représentations à l'échelle de l'individu, puis à l'échelle du paysage.

Construire les scènes à partir des représentations de l'individu avec l'outil Ligdraw

La représentation d'une plante simulée peut s'appuyer sur de nombreuses techniques plus ou moins performantes en termes de qualité graphique et de vitesse d'affichage, plus ou moins coûteuses en termes de ressources de calcul ou de mémoire. Si l'on exclut les réalisations multimédia de haute qualité (pour le cinéma en particulier), on peut dire que la majorité des applications cherchent à obtenir des représentations manipulables sur des machines usuelles en temps réel. La visualisation de scènes impliquant le végétal va privilégier des modèles géométriques légers, si possible multi-échelles, hybrides, voire uniquement basés sur des images.

Dans notre contexte de recherche, nous avons développé des outils simples de visualisation des plantes simulées. Les techniques employées dans ces développements s'inspirent des travaux présentés jusqu'ici. Nous exposons ici les principales caractéristiques de l'outil LigDraw, l'outil le plus couramment employé pour visualiser les simulations des outils Gloups, QinYuan et DigiPlante. LigDraw s'inscrit dans la logique de la représentation temps réel, à l'échelle de l'individu, mais aussi du paysage via les fonctions de construction de représentations dégradées qu'il mobilise.

LigDraw est un outil qui s'appuie sur des composants algorithmiques développés depuis les origines de GreenLab. Ces modules ont été revisités, traduits en C++ et intégrés dans une interface utilisateur simple. L'application est écrite sous l'environnement de développement Qt^[10] et emploie la librairie graphique OpenGL. L'application est un outil autonome, il est cependant systématiquement associé aux simulateurs Gloups et QinYuan, pour lesquels il constitue l'outil de visualisation de la plante simulée par défaut.

En entrée, l'outil accepte les lignes élastiques, mais également des fichiers de squelettes ramifiés selon le format standard Wavefront (.obj).

LigDraw possède des fonctions d'attribution de formes 3D aux différents organes, incluant un facteur d'échelle local, et des sélections ainsi que des fonctions d'attributions de propriétés graphiques, comme illustré en figure 16.29. Elles associent aux organes les paramètres d'illumination, et de texture tels que décrits plus haut.



Figure 16.29. LigDraw.

L'outil de représentation et de visualisation de la plante générée par des implémentations du modèle GreenLab illustré sur un marronnier virtuel. **En haut** : deux vues de l'outil, à gauche la fenêtre principale avec les fonctions d'attribution des formes géométriques et des matériaux graphique aux organes ; à droite, visualisation des organes choisis avec leurs paramètres d'illumination. **Au milieu** : deux représentations avec deux niveaux de détail de la structure. Les feuilles et fleurs ne sont pas sélectionnées, le niveau de détail le plus faible est représenté en fil de fer alors que le biveau de détail moyen est texturé. En bas, le même vue en perspective avec des habillages de couleurs et textures légèrement différents (Jaeger, 2013).

L'outil propose une représentation interactive de toute plante simulée selon divers choix de représentations, en fil de fer, surfacique, ou limité au squelette, en vue orthographique et en perspective, avec des fonctionnalités de niveaux de détails. Les niveaux de détails sont fondés sur des critères de tailles géométriques, complétés pour les organes, d'un tirage aléatoire. Pour les axes, deux modalités de représentations sont possibles : par composants, autorisant des niveaux de détails selon le diamètre, par conversion en diagramme de Frenet. Dans ce dernier cas, les algorithmes de compression du squelette et de maillage adaptatifs sont utilisés.

L'outil donne accès à des programmes utilitaires spécifiques de conversions et de transformations des représentations, en particulier de compression, dont la génération multi-échelles des axes.

En sortie, LigDraw permet l'enregistrement d'images et de séquences d'images : rotation autour d'une plante, ou à l'opposé, vue fixe effectuée tour à tour sur des modèles distincts, ce qui permet des animations de croissance. Des options permettent ces enregistrements d'image avec leurs profondeurs et leurs transparences. La vue de la source de lumière peut aussi été conservée, pour permettre le calcul ultérieur d'ombrages.

Avec les sorties géométriques dégradées des programmes utilitaires spécifiques, LigDraw permet donc la construction d'imposteurs nécessaires dans des outils de visualisation de paysages ou de visualisation Web.

Création de biotopes

La définition de la composition du couvert végétal sur un site est une problématique en soi, qui ne sera pas couverte dans cet ouvrage. Nous exposons simplement deux approches couramment employées dans les applications, qui partagent une

description statique, descriptive, sans considération écologique. À l'usage, on différencie cependant les approches de définition explicite, à l'image de certaines applications forestières de celle fournissant une définition implicite du couvert.

Au niveau des outils, une approche explicite conduit à l'usage d'outils dits « individu centré ». En effet, dans ce cas, on raisonne à partir de l'individu, dont l'identification (espèce et âge en particulier) ainsi que la position spatiale sont précisément établis ; en d'autres termes tous les éléments végétaux de la scène sont clairement identifiés, caractérisés et positionnés. En pratique de tels outils construisent les scènes à partir d'édition manuelle explicitant les caractéristiques individuelles. Afin d'éviter des tâches répétitives et fastidieuses, de nombreux outils permettent la définition de zones ou de trajectoires dans lesquelles des procédures vont spécifier les attributs des éléments. On peut ainsi construire une plantation ou un alignement en spécifiant les espaces entre individus, avec leur fréquence pour un peuplement hétérogène. Dans l'environnement AmapStudio (chapitre 15), le logiciel éditeur de scènes végétales Simeo[11] illustre parfaitement ce type d'approche.

À l'opposé d'une approche explicite, des outils proposent des approches procédurales. Dans ce cas, on décrit des propriétés génériques du peuplement, sans expliciter individuellement des caractéristiques. Un exemple est celui de l'usage de procédures définissant une probabilité de présence (en fait une densité) en fonction de la pente du terrain (le gradient du modèle numérique de terrain). C'est le cas de nombreux outils en synthèse d'image Terragen[12], ProLand[13], Genesys et Visual Nature Studio, mais aussi forestiers tel que Forester[14], SmartForest[15] ou Stand Visualisation system. Dans ces approches, l'instanciation graphique individuelle est générée très tardivement, lors de l'affichage, en fonction de la visibilité de la zone de plantation. Celle-ci va définir, en fonction de la distance à l'observateur, la pertinence de la génération (inutile pour des petites plantes lointaines) et la modalité de la représentation : par des composants géométriques 3D ou des imposteurs.

La figure 16.30 illustre ces deux modalités en présentant respectivement des fonctionnalités de Simeo et de Forester.

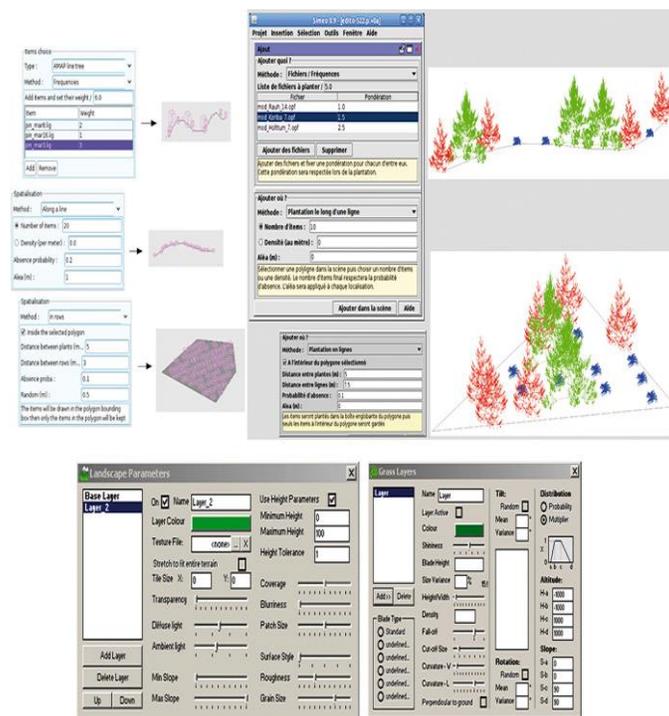


Figure 16.30. Saisie de scènes végétales. Approches explicites et implicites.

En haut, capture d'écran de l'outil Simeo. Le module ajout se décompose de deux parties, la première (en haut) spécifie les individus et leurs fréquences ; la seconde spécifie le placement des individus. L'application est illustrée sur une ligne puis dans une zone triangulaire. En bas, capture d'écran de l'outil Forester. À gauche, un éditeur d'une couche de végétation. On remarquera qu'il n'y a pas de critère individuel mais des critères d'apparitions, de taux d'occupation et de pente du terrain. A droite l'éditeur spécifique de la couche herbacée. Deux classes de paramètres définissent une couche : des paramètres géométriques d'une part et sur la colonne de gauche les paramètres d'apparition impliquant des fonctions probabilistes et des données altimétriques (François de Coligny, 2013 ; Stephen Dartnal, 2002).

Les outils avancés, et en particulier les outils employés pour la visualisation de projets d'aménagement intègrent en général les deux approches, c'est en particulier le cas de l'application LandSim3D[16] de Bionatics SA décrite ci-dessous, où la construction de l'implémentation végétation s'appuie sur la définition de biotope et de cartes, tout en autorisant des placements individuels, par exemple le long de voies ou pour positionner un arbre remarquable.

LandSim3D : exemple d'outil de représentation du paysage

LandSim3D modélise un territoire à partir de couches d'informations géographiques décrivant la cartographie (dont la carte d'occupation des sols), la topographie, l'altimétrie d'un terrain. Elles sont recueillies sous la forme de données sources de type cartographiques, images / ortho photos et altimétriques, assemblées dans un référentiel géographique commun.

Les composants du paysage, en fonction de leur nature, sont ajoutés au modèle géographique, soit individuellement selon des positions spécifiques, soit selon des règles de distribution dans un maillage de zone (carte d'occupation). Pour l'environnement urbain, les bâtiments sont générés sous forme de volumes à partir de leur empreinte au sol et de leur information de hauteur. Les géométries et textures des architectures spécifiques telles que monuments ou ouvrages d'art peuvent être importés selon des formats standards de CAO (3ds, SketchUp, OpenFlight or Collada). Les réseaux (routiers, ferrés, fluviaux) peuvent être modélisés automatiquement en 3D à partir de tracés vectoriels 2D importés ou dessinés. Le profil et l'habillage (chaussée, marquage au sol et bas-côtés) sont fonctions des attributs des vecteurs (largeur en particulier). Une voie communale sera donc visuellement différente d'une route départementale. Les réseaux « géo-spécifiques » peuvent aussi être importées d'outils CAO classiques avec leurs textures, et intégrés au relief naturel du terrain.

Dans les espaces naturels, LandSim3D combine des cartes d'occupation des sols et de végétation (biotope). Ces cartes définissent des modalités procédurales de définition d'objets géométriques à la volée, en fonction de la distance à l'observateur. Les cartes des sols vont paramétrer des superpositions de textures représentant les différentes couches de sol (rocher, terre, herbe, poussière) et de dispersion de modèles 3D représentant des affleurements rocheux, des pierres, cailloux, souches, allées... Les cartes de biotopes vont de même définir, pour une distance à l'observateur donnée, les composants végétaux qui seront représentés dans chaque biotope. L'utilisateur aura par ailleurs décrit les biotopes en termes de distribution de plantes, d'âge, de densité. L'outil génère les représentations à plusieurs niveaux de détail (modèles hybrides, *crossboard*, *billboard*) à partir d'une implémentation du modèle structurel Amap.

Grâce à la génération procédurale de détail, et à l'usage massif d'imposteurs, l'application permet à tout moment de naviguer en temps réel dans des scènes couvrant plusieurs dizaines de km². Elle dispose par ailleurs d'outils de gestion de variantes et d'évolution dans le temps, afin de projeter l'observateur dans divers scénarios. Les représentations de la végétation sont recalculées selon les saisons et l'avancée dans le temps.

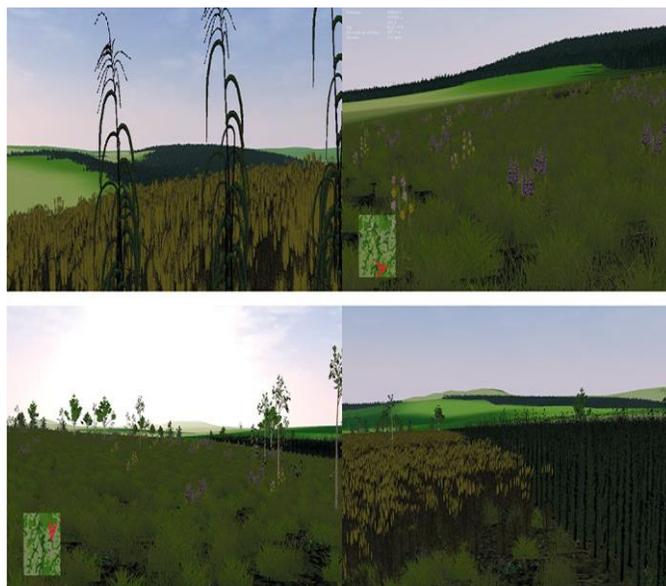


Figure 16.31. Scènes générées interactivement par l'outil LandSim3D.

Ces captures d'écran proviennent sont extraites d'un même parcours interactif sur un site d'Allemagne orientale comprenant des zones cultivées, forestières et de jachère. Les cartes d'élévation du terrain et d'occupation des sols ont été fournies par C. Furst (ZEF, Allemagne) (Bionatics SA, Jaeger, 2012).

Elle dispose enfin d'outils d'annotation et de publication qui permettent la distribution auprès d'acteurs externes voulant communiquer autour d'un projet, explorer ou se déplacer dans la maquette du projet. Cette publication s'appuie soit sur un outil d'exploration libre, soit sur l'Internet.

Vers des paysages fonctionnels ?

On désigne sous le terme abusif de paysage fonctionnel une approche destinée à représenter des dynamiques (végétales) au sein de paysages virtuels, en se focalisant sur l'aspect production. Le terme de fonctionnel est utilisé en référence à l'imagerie médicale, pionnière dans le domaine. Des avancées intéressantes ont été menées sur ce thème, en s'impliquant bien en amont de la représentation, sur la simulation de la dynamique elle-même.

Le monde médical est familier de l'imagerie dite fonctionnelle. Cette imagerie (rayon X, scanner) est obtenue par l'introduction d'un produit de contraste radio opaque. Sa circulation et sa dégradation dans les tissus permettent de mettre en évidence des structures de transport ainsi que les tissus absorbant ou dégradant le produit de contraste. Au-delà de l'image « anatomique » on est en présence d'une imagerie fonctionnelle vis à vis d'un réactif.

Dans le monde végétal, le réactif omniprésent est l'eau, et nous avons vu que nous pouvons relier les stress hydriques à la taille des organes. Il est donc tentant de s'inspirer des techniques d'imagerie pour avoir une autre représentation des peuplements.

La scène végétale simulée est « plongée » dans un espace discret régulier, ce qui revient à la découper en couches successives (Jaeger, Teng, 2003). Constituée de cubes ou de voxels, elle traduit la nature de la végétation en spécifiant s'il s'agit de fruits, de branches ou de feuilles, avec un identifiant de l'espèce et une grandeur que l'on peut rattacher au fonctionnement – surface pour les feuilles, volume pour les parties de branche. Cette opération est relativement rapide car il suffit de transformer les directions principales des organes en section de droites dans l'espace discret (figure 16.32). Cette analyse exploite l'identification et la sommation des voxels décrivant le peuplement. On peut évaluer la biomasse produite par ce peuplement ou par telle ou telle espèce et contrôler la cohérence de la simulation. Dans les applications implémentant ce type de représentations, on parcourt le découpage de l'espace, que l'on interroge pour connaître son contenu, et non pas les composants des scènes.

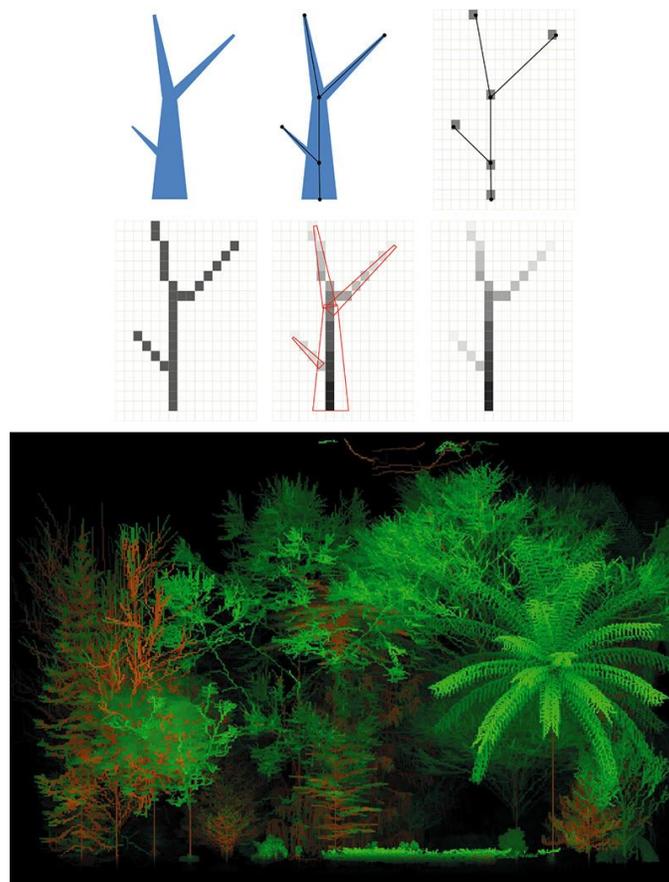


Figure 16.32. Création d'une représentation voxel.

En haut, de gauche à droite : la structure est décrite par les noeuds des axes avec leurs diamètres. Les noeuds sont plongés dans l'espace discret. Les segments de droite liant les noeuds sont tracés. Enfin, le diamètre est codé en niveau de gris. **En bas**, conversion d'une scène selon ce principe (Jaeger, 2012).

Ces types de représentations autorisent aussi des visualisations intéressantes. Avec l'arsenal des techniques de visualisation de l'imagerie médicale, on est en mesure d'effectuer des représentations non seulement réalistes mais de grande complexité. Ainsi, au terme de la conversion du peuplement dans l'espace voxel, une opération dite de morpho-mathématique permet de dilater les axes discrets selon les diamètres stockés (figure 16.33) et va restituer l'occupation explicite des éléments dans les voxels. Les calculs effectués dans ces espaces voxels sont peu dépendants du contenu des voxels. L'hétérogénéité et la complexité du peuplement n'a donc que peu d'incidence sur la vitesse de traitement de l'espace de donnée. Ceci constitue donc un grand point d'intérêt dans le traitement et la visualisation de scènes végétales naturelles ou hétérogènes.

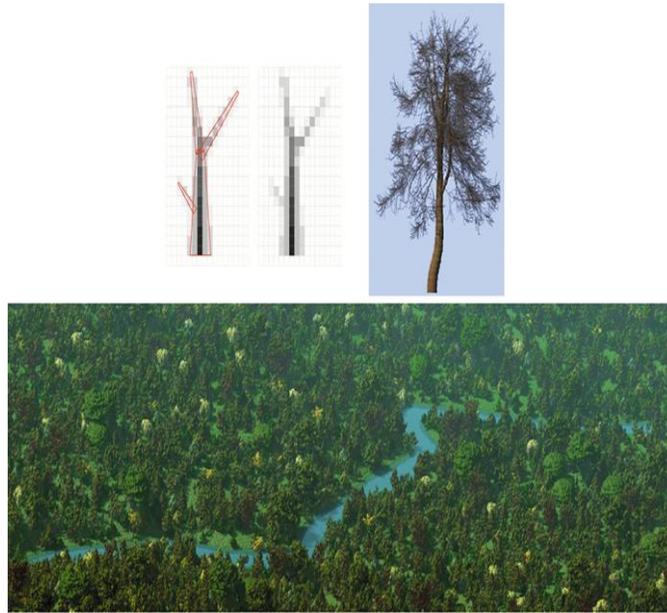


Figure 16.33. Usage de la représentation voxel pour la visualisation.

En haut, le processus de restitution des diamètres. **À gauche** : l'espace voxel est filtré selon un lissage récursif. **À droite** : une image est obtenue selon des techniques classiques de visualisation volumique. **En bas**, cette technique est bien adaptée à de grandes scènes hétérogènes (Jaeger, 2003 et 2012).

Par ailleurs, les découpages définissent des lieux dans lesquels les échanges (en eau) peuvent interagir. Ce type de représentation a conduit à la constitution de prototype de simulation de l'évolution de peuplement intégrant le cycle complet de l'eau : précipitation, ruissellement, diffusion (latérale et en profondeur) dans le sol, évaporation et évapotranspiration.

Ce type de représentation est cependant coûteux et les approches de simulation à l'échelle du paysage fonctionnel se sont orientées vers des représentations mixtes (grilles cellulaires pour le sol, définies par plusieurs couches), proches des représentations des systèmes d'information géographiques.

Dès lors, les représentations fonctionnelles ne se limitent pas à des représentations réalistes du végétal (et du terrain), elles peuvent mettre en œuvre des approches classique de visualisation scientifique de données en masses à partir de cartes décrivant le milieu. On peut ainsi obtenir des représentations présentant la teneur en eau dans le sol, la répartition de la production de la biomasse, ou des indicateurs environnementaux pour la croissance (figure 16.34). Les représentations réalistes gagnent, quant à elles, à intégrer les données climatiques utilisées dans les simulations, la pluviométrie par exemple dont la représentation graphique peut être mimée par un système de particules simples. Les conditions d'exposition (localisation, orientation, horaires) sont aussi utiles pour renseigner le modèle d'illumination éclairant la scène.

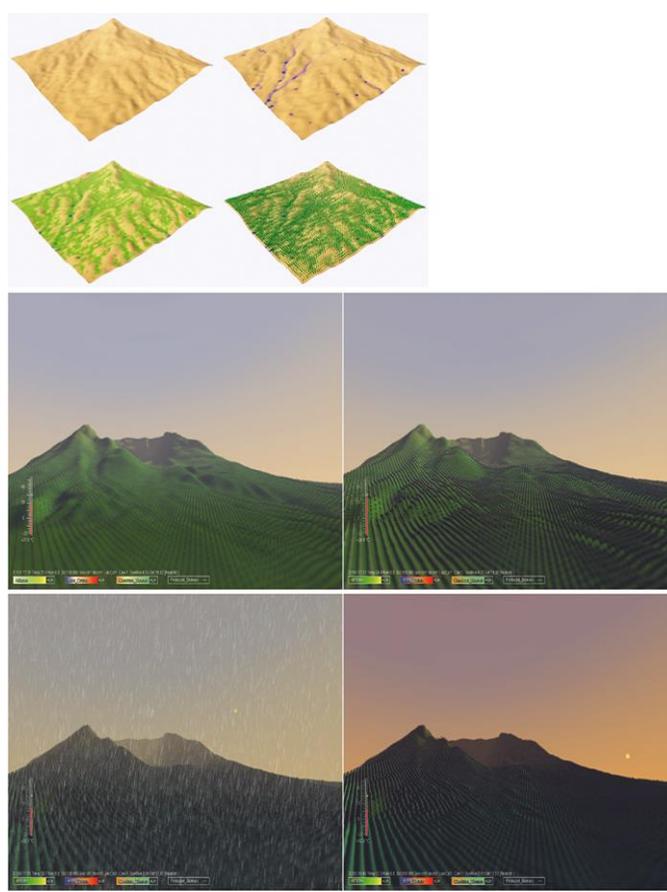


Figure 16.34. Visualisation de paysages dits fonctionnels.

La représentation de tels paysages simulés peut s'effectuer par la fusion de diverses couches. Ici, au modèle numérique de terrain, à gauche, sont ajoutés les cours d'eau, à droite. La biomasse produite est ajoutée ensuite sous forme de texture (vue de gauche) ou de primitives ponctuelles, à droite. En bas, dans ces représentations « plus réalistes », la biomasse cumulée est représentée par des sphères de rayon variable. Un ciel et des effets de pluie (par système de particules) sont ajoutés en fonction de la date, l'heure et des conditions climatiques (Jaeger, 2006, 2007 et 2012).

À retenir

Dans notre petit historique des modèles de création de plantes virtuelles, nous avons distingué trois principales modalités : une approche procédurale, constructive de la structure arborée, s'appuyant sur des règles plus ou moins relatives à une croissance ; une approche descriptive par la définition géométrique d'une enveloppe, voire d'une simple photographie ; et enfin une approche reconstruite, à partir de données réelles acquises par un système automatisé ou non. Cette classification est discutable, car nombreuses sont les approches mêlant deux voire les trois modalités. Pour un état de l'art plus exhaustif, on peut se rapprocher de l'ouvrage de O. Deussen et B. Lintermann (Deussen, 2005) ou s'appuyer sur les cours (anciens) du Siggraph (Siggraph Courses on Natural Phenomena, 1987, 1993, 1996...).

Les approches par règles sont certainement les plus usitées pour générer des plantes virtuelles. Depuis de simples récursivités inspirées des fractales (Kawaguchi, 1982), (Oppenheimer, 1986), la communauté de la synthèse d'image a exploré de nouvelles approches. Basées sur la loi de gravité, les systèmes de particules (Reeves, 1987), basées sur les modèles utilisés en hydrologie (Eyrolles, 1986), et inspirée de la biologie (Lindenmayer, 1968) avec un développement conséquent autour des grammaires L-systèmes (Prusinkiewicz, 1990). Il n'y a pas de cloisonnement entre ces approches, en fait on trouve une multitude d'approches procédurales plus ou moins spécifiques s'appuyant sur des règles qui reflètent la mise en place de la ramification, sans être forcément en liaison avec la croissance au sens biologique du terme. On peut citer l'approche d'Aono et Kunii (Aono, 1984), les graftals (Smith, 1984), ou des combinaisons de composants (Lintermann, 1997). Nos développements anciens ou actuels s'inscrivent dans cette logique de fait, les règles de construction de la structure voulant traduire celles décrites par la botanique architecturale. Il n'y a pas lieu d'opposer fondamentalement les L-systèmes et les approches GreenLab, les grammaires peuvent être employées pour coder les éléments de l'architecture botanique, comme le montre Winfried Kurth (Kurth, Slodoba, 1997).

Les approches par règles sont donc des approches que l'on rencontre dans le milieu agronomique et plus généralement dans les sciences de la plante.

La reconstruction tridimensionnelle est en plein essor. Elle s'appuie sur des modalités différentes, de la simple image à l'exploitation de plusieurs jeux d'acquisition laser. En général, le traitement des acquisitions permet de construire soit des squelettes soit des cibles qui vont définir la structure ramifiée (Quan *et al.*, 2006 ; Reche-Martinez *et al.*, 2004 ; Shlyalkhter *et al.*, 2001 ; Tan *et al.*, 2007 et 2008). Cette dernière est affinée par des approches utilisant localement des règles (empiriques, systèmes de particules, grammaires) pour garantir la continuité des axes et générer les bout d'axes ou les axes périphériques. Des procédures spécifiques, inspirées d'approches semblables, sont ensuite employées pour générer le feuillage, en utilisant des particules en migration vers l'enveloppe de la couronne (Neubert *et al.*, 2007). Les reconstructions tridimensionnelles à partir d'échantillonnages ponctuels initiés par J. Bloomenthal (1985) sont de plus en plus développées avec l'essor des acquisitions laser (Cheng *et al.*, 2007 ; Xu *et al.*, 2007 ; Nin *et al.*, 2009).

Il existe de plus en plus d'interactions et de ponts entre ces diverses approches. Lorsque l'on considère en particulier les travaux visant à construire des structures réalistes depuis la saisie interactive de silhouettes (*sketch based génération*), on met en œuvre des techniques où l'enveloppe est contrôlée par l'utilisateur; ce dernier choisit ensuite des heuristiques pour générer la structure en définissant quelques traits de la structure et des règles (Chen *et al.*, 2008 ; Wither *et al.*, 2009), se rapprochant ainsi des modèles définis par composants, vus précédemment (Deussen, 1997 ; Lintermann, 1999).

Entre les images de plantes simulées par les agronomes — par des modèles structuraux — dans la fin des années 1980 à celles générées aujourd'hui, il est bien difficile de dater et de faire un tri. Il en est de même pour les informaticiens, du Mighty Maple de Bloomenthal aux arbres hybrides dans les jeux scènes de Crytek, où sont les innovations ? Pas dans la précision de la description géométrique des plantes, bien au contraire, elle s'est appauvrie par l'usage massif d'imposteurs ! En fait, dans la représentation des plantes virtuelles, on a surtout gagné en efficacité, on visualise rapidement, avec interactivité dit-on. Et on peut le faire car non seulement le matériel le permet, mais surtout parce que la structure de l'objet est transformée, simplifiée. De la structure on tend vers la forme, au sens littéral du terme, synonyme d'apparence. Et l'apparence dépend du contexte, de la distance à l'objet... ce qui peut expliquer qu'il n'y a pas une méthode efficace multi-échelle pour représenter ces structures mais bien une panoplie.

Mais l'élément déterminant de l'évolution de la représentation des scènes naturelles ne s'inscrit plus dans la vitesse d'affichage. En effet, les applications des modèles structures fonctions et les besoins du multimédia ne portent pas sur la plante isolée mais sur un ensemble de plantes, des cultures, des forêts, des paysages virtuels avec lequel l'utilisateur interagit. Et dans ces scènes, il n'y a aucun intérêt à représenter la même plante à perte de vue. On doit y (re)trouver la variabilité du terrain, et la capacité à interroger les éléments constituant la scène. Mais la variabilité dans les scènes constitue une contrainte importante que les évolutions techniques (mémoire et GPU) ne peuvent surmonter, pour l'heure.

Dans les approches de visualisation de plantes que nous proposons, on perçoit une trame claire, unique dans le cheminement, allant de la simulation (la structure) vers l'apparence : la réduction de la complexité par agrégation de composants. Ce que l'on attendrait d'un modèle efficace est exactement l'inverse : disposer d'une géométrie simple, que l'on raffine en fonction des besoins et contraintes de la visualisation. C'est la manière dont nous percevons l'environnement. Et ce que percevons de premier abord n'est pas une forme. Pour toute civilisation sur Terre, l'apparence de l'environnement végétal est avant tout une couleur : le vert. C'est le vert de la production, celui de la fonction. Il y a donc une autre trame à exploiter, celle de la prise en compte de la fonction, c'est-à-dire de la production végétale comme un support de représentation.

⁵Onyx Computing: <http://www.onyxtree.com/> 

⁶Bionatics SA and LandSim3D tool. <http://www.bionatics.com/> 

⁷Forester tool. URL: <http://www.dartnall.f9.co.uk/forester/> 

⁸World Construction Set, Visual Nature Studio, Scene Express. <http://3dnature.com/> 

⁹Stand Visualization System. <http://forsys.cfr.washington.edu/svs.html> 

¹⁰Qt : <http://qt-project.org/> 

11SIMEO. Free scene editor CAPSIS based. <http://amap-dev.cirad.fr/wiki/simeo/Simeo> 

12Terragen tool. <http://www.planetside.co.uk/terrigen> 

13Proland. <http://proland.inrialpes.fr/index.html> 

14Forester tool. <http://www.dartnall.f9.co.uk/forester/> 

15Smart Forest, 2000. Smart Forest, 2000. User's Manual, Version 6.5, 14 p.

16Bionatics SA and LandSim3D tool. <http://www.bionatics.com/> 

Références citées

A - B - C

- Allen M.-T., Prusinkiewicz P., DeJong T.-M., 2005. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model. *New Phytologist*, 166 (3) : 869-880.
- Aono M., Kunii T.-L., 1984. Botanical Tree Image Generation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 4(5) : 10-34
- Arbenz K., Wohlhauser A., 1986. *Analyse numérique*. PPUR, Presses polytechniques.
- Atger C., Edelin C., 1994. Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Canadian Journal of Botany*, 72(7) : 963-975.
- Baey C., 2014. Modélisation de la variabilité inter-individuelle dans les modèles de croissance de plantes et sélection de modèles pour la prévision. Thèse de doctorat de l'École centrale de Paris. 170 p.
- Baey C., Didier A., Lemaire S., Maupas F., Cournède P.-H., 2014. Parametrization of five classical plant growth models applied to sugar beet and comparison of their predictive capacities on root yield and total biomass. *Ecological Modelling*, 290 : 1120.
- Baey C., Trevezas S., Cournède P.-H., 2014. A nonlinear mixed effects model of plant growth and estimation via stochastic variants of the EM algorithm. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 45(6) : 1643-1669.
- Bao G.-B., Li H., Zhang X.-P., Che W.-J., Jaeger M., 2011. Realistic real-time rendering for large-scale forest scenes. In : *Proceedings of 1st International Symposium on VR innovation ISVRI*. 1st International Symposium on VR innovation ISVRI, 19-20/03/2011, Singapore, p. 217-223.
- Bao G.-B., Zhang X.-P., Che W.-J., Jaeger M., 2010. Billboards for Tree Simplification and Real-time Forest Rendering. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 433-440.
- Barczy J.-F., de Reffye P., Caraglio Y., 1997. Essai sur l'identification et la mise en œuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale : le logiciel AMAPsim. In : Bouchon J., de Reffye P., Barthélémy D., eds. *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*. Paris, Éditions Inra, Sciences Update, p. 255-423.
- Barczy J.-F., Rey H., Caraglio Y., de Reffye P., Barthélémy D., Dong Q., Fourcaud T., 2008. AmapSim: an integrative whole-plant architecture simulator based on botanical knowledge. *Annals of Botany*, 101(8) : 1125-1138.
- Barthélémy D., 1991. Levels of organization and repetition phenomena in seeds plants. *Acta Biotheoretica*, 39 : 309-323.
- Barthélémy D., Caraglio Y., 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99(3) : 375-407.
- Barthélémy D., Caraglio Y., Costes E., 1997. Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique chez les végétaux. In : Bouchon J, de Reffye P, Barthélémy D., eds. *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*. Paris, Éditions Inra, Sciences Update, p. 89-136.
- Basten C.-J., Weir B.-S., Zeng Z.-B., 2005. *QTL Cartographer v1.17*. North Carolina State University.
- Baudouin L., Schwendiman J., de Reffye P., Pallares P., 1984. Principes de l'analyse de la fertilité femelle chez l'hybride F1 de palmier à huile *Elaeis melanococca*, *Elaeis guineensis* et chez les espèces parentales. Modèle probabiliste et interprétation biologique. *Agronomie*, 4(9) : 861-869.
- Behrendt S., Colditz C., Franzke O., Kopf J., Deussen O., 2005. Realistic realtime rendering of landscapes using billboard clouds. In : *Proceedings of Eurographics 2005*, p. 507-516.

- Blaise F., de Reffye P., 1994. Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu : le logiciel AMAPpara. In : Tankoano, J. (Ed). *CARI'94, 2ème colloque africain sur la recherche en informatique*, Ouagadougou, Burkina Faso. Paris, Orstom Éditions, p. 61-75.
- Blaise F., Houllier F., de Reffye P., 1996. Simulation of tree architecture and growth in a forest stand: AMAPpara software. In : Nepveu, G. (Ed). *Proceedings of Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares*, 1st IUFRO WP S5.01-04 Workshop. Hook, Suède, p. 46-55.
- Bloomenthal J., 1985. Modeling the mighty maple. In : *Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 85)*. ACM, New-York, p. 305-311.
- Borianne P., Brunel G., 2012. Automated valuation of leaves area for large-scale analysis needing data coupling or petioles deletion. In : *The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA12) Proceedings*, Shanghai, China, 31 October-3 November 2012. Beijing. IEEE Press, p. 50-57.
- Bosanac B., Zanchi P., 2005. Onyx TREE Professional.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Richard G., Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plénet D, Cellier P, Machet J.-M., Meynard J.-M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6) : 311-346.
- Buis R., Barthou H., 1984. Relations dimensionnelles dans une série organique en croissance chez une plante supérieure. *Rev. Biomath.*, 85 : 1-19
- Caraglio Y., Pimont F., Rigolot E., 2007. *Pinus halepensis* Mill. Architectural analysis for fuel modelling. Proc. Int. Workshop MEDPINE, p. 43-59.
- Castel T., Baudoin A., Floury N., Le Toan T., Caraglio Y., Barczy J.-F., 2001. Deriving forest canopy parameters for backscatter models using the AMAP architectural plant model. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(3) : 571-583.
- Chavaneau C., 1989. Modélisation de la croissance et de l'architecture de l'Abricotier (*prunus armeniaca L.*) D.A.A., spécialité : Agronomie méditerranéenne. Montpellier, ENSA. 77 p.
- Chelle M., 1997. Développement d'un modèle de radiosité mixte pour simuler la distribution du rayonnement dans les couverts végétaux. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes. 154 p.
- Chelle M., Andrieu B., 1998. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling*, 111(1) : 75-91.
- Chen X.-J., Neubert B., Xu Y.-Q., Deussen O., Kang S.-B., 2008. Sketch-based tree modeling using Markov random field. *ACM Trans. Graph*, 27(5-109), 9 p.
- Cheng Z.-L.; Zhang X.-P., Chen B.-Q., 2007. Simple reconstruction of tree branches from a single range image. *Journal of Computer Science and Technology*, 22(6) : 846-858.
- Chew Y.-H, Wenden B., Flis A., Mengin V., Taylor J., Davey C.L., Tindal C., Thomas H., Ougham H.-J., de Reffye P., Stitt M., Williams M., Muetzelfeldt R., Halliday K.-J., Millar A.-J., 2014. Multiscale digital Arabidopsis predicts individual organ and whole-organism growth. *PNAS*, 111(39): E4127-E4136; published ahead of print September 2, 2014, doi:10.1073/pnas.1410238111
- Christophe A., Letort V., Hummel I., Cournède P. H., de Reffye P., Lecœur J., 2008. A model-based analysis of the dynamics of carbon balance at the whole-plant level in Arabidopsis thaliana. *Functional Plant Biology*, 35(11) : 1147-1162.
- Cilas C., Mississo E., Dufour B., Amefia Y.-K., 1987. Étude des variations de la pollinisation naturelle du cacaoyer au Togo. Influence sur le remplissage en graines des cabosses. *Café Cacao Thé*, 31 : 283-290.

- Costes É., 1988. Analyse architecturale et modélisation du Litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) Contribution à l'étude de son irrégularité de production. L'Ile de la Réunion, Thèse de doctorat. Université de Montpellier. 210 p.
- Costes É., 1990. Modélisation de l'architecture de l'hévéa. Rapport scientifique Cirad-Irca.
- Costes É., de Reffye P., 1990. *Modélisation de l'architecture de 3 clones d'hévéa, rapport de convention*. Montpellier, France : Cirad-Irca et Cirad-Gerdat, Laboratoire de Modélisation, 47 p.
- Coudurier T., Barczi J.-F., Barthélémy D., De Reffye P., 1993. Modélisation et simulation de l'architecture de l'Eucalyptus hybride Saligna en plantation au Congo. (Rapport ATP n° 37/93). Montpellier. Cirad-Gerdat, 28 p.
- Cournède P.-H., Chen Y., Wu Q., Baey C., Bayol B., 2013. Development and evaluation of plant growth models: Methodology and implementation in the Pygmalion platform. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 8(4) : 112-130.
- Cournède P.-H., Guyard T., Bayol B., Griffon S., De Coligny F., Borianne P., De Reffye P., 2010. A forest growth simulator based on functional-structural modelling of individual trees. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p 34-41.
- Cournède P.-H., Kang M.-Z., Mathieu A., Barczi J.-F., Yan Y.-P., de Reffye P., 2006. Structural factorization of plants to compute their functional and architectural growth. *Simulation-Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 82(7): 427-438.
- Cournède P.-H., Letort V., Mathieu A., Kang M.-Z., Lemaire S., Trevezas S., Houllier F., de Reffye P., 2011. Some parameter estimation issues in functional-structural plant modelling. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 6(02) : 133-159.
- Cournède P.-H., Mathieu A., Houllier F., Barthélémy D., de Reffye P., 2008. Computing competition for light in the GreenLab model of plant growth: a contribution to the study of the effects of density on resource acquisition and architectural development. *Annals of Botany*, 101(8) : 1207-1219.

D - E - F

- Dabadie P., Reffye P. de, Dinouard P., 1991. Modelling bamboo growth and architecture: *Phyllostachys viridi-glaucescens*. *Journal of the American Bamboo Society*, 8 (1-2) : 65-79.
- Dauzat J., Clouvel P., Luquet D., Martin P., 2008. Using Virtual Plants to Analyse the Light-foraging Efficiency of a Low-density Cotton Crop. *Annals of Botany*, 101(8) : 1153-1166.
- Daviero V., Meyer-Berthaud B., Lecoustre R., 1996. A morphometric approach to the architecture and ontogeny of the extant sphenopsid *Equisetum telmateia* Ehrh. *International Journal of Plant Science*, 157(5) : 567-581.
- Daviero V., Meyer-Berthaud B., Lecoustre R., 2000. Computer simulation of sphenopsids architecture. I. Principles and methodology. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 109 : 121-134.
- De Reffye P., 1974. Le contrôle de la fructification et de ses anomalies chez les *Coffea arabica*, *robusta* et leurs hybrides « Arabusta ». *Café Cacao Thé*, 18(4) : 237-254.
- De Reffye P., 1979. Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea robusta*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud Orsay, 195 p.
- De Reffye P., 1981. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 1ère partie. Étude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs. *Café Cacao Thé*, 25(2) : 83-104.
- De Reffye P., 1981. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 2ème partie. Étude de la mortalité des méristèmes plagiotropes. *Café Cacao Thé*, 25(2) : 219-230.
- De Reffye P., 1999. Calibration of a hydraulic architecture-based growth model of cotton plants. *Agronomie*, 19(3-4) : 265-280.
- De Reffye P., Cognée M., Jaeger M., Traore B., 1988. Modélisation stochastique de la croissance et de l'architecture du cotonnier. 1. Tiges principales et branches fructifères primaires. *Coton et Fibres Tropicales*, 43(4): 269-291.
- De Reffye P., Dinouard P., Barthélémy D., 1991. Modélisation et simulation de l'architecture de l'Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae) : la notion d'axe de référence. Comptes Rendus du 2^e Colloque international sur l'arbre, Montpellier, 10-15 Septembre 1990. *Naturalia Monspeliensia*, Hors-Série : 251-266.
- De Reffye P., Edelin C., Jaeger M., Blaise F., Fournie G., Bree Lefebvre V., 1987. L'arbre et l'ordinateur. In : *Pleasure of landscape*, IFLA World Congress. 14, 1987/09/01-04, Paris, France IFLA, p. 198-201.
- De Reffye P., Elguero E., Costes E., 1991. *Growth units construction in trees: a stochastic approach*. In : 9th Seminar of the Theoretical Biology School, Solignac, France, 21-23/09/1989, p. 325-342.
- De Reffye P., Fourcaud T., Blaise F., Barthélémy D., Houllier F., 1997. A functional model of tree growth and tree architecture. *Silva Fennica*, 31(3) : 297-311.
- De Reffye P., Houllier F., Blaise F., Barthélémy D., Dauzat J., Auclair D., 1995. A model simulating above- and below-ground tree architecture with agroforestry applications. IUFRO World Congress. 20, 1995-08-06/1995-08-12, Tampere, Finland. *Agroforestry systems*, 30(1-2) : 175-197.
- De Reffye P., Hu B.-G., 2003. Relevant qualitative and quantitative choices for building an efficient dynamic plant growth model: GreenLab case. In : Hu BG, Jaeger M (Eds). *Plant growth modelling and applications (PMA03), Proceedings of the 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications*. Tsinghua University Press, Springer, p. 87-107.
- De Reffye P., Jaeger M., 2013. Modèles mathématiques du développement et de la croissance de l'architecture des plantes. Le cas du modèle GreenLab. In : Eds. Franck Varenne & Marc Silberstein. *Modéliser & simuler : épistémologies et pratiques de*

la modélisation et de la simulation. (Tome 1, volume 2). Paris, Éditions Matériologiques, p. 625-658, (Sciences & Philosophie).

De Reffye P., Jaeger M., Cournède P.-H., 2008. Le monde végétal. In : Comité International des Jeux Mathématiques (Ed). *Maths Nature Express*. Paris, CILM, p. 26-35.

De Reffye P., Jaeger M., Edelin C., Françon J., Puech C., 1988. Plant models faithful to botanical structure and development. In: *Computer Graphics, Siggraph 1988*, 22(4) : 151-158.

De Reffye P., Kang M.-Z., Hua J., Auclair D., 2012. Stochastic modelling of tree annual shoot dynamics. *Annals of Forest Science*, 69 : 153-165

De Reffye P., Parvais J.-P., Mossu G., Lucas P., 1978. Influence des aléas de la pollinisation sur les rendements du cacaoyer. Modèle mathématique et simulation. *Café Cacao Thé*, 22(4) : 251-274.

De Witt C.-T., 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. *Plant Physiology*, 23 : 169-187.

Decoret X., Durand F., Sillion F.-X., Dorsey J., 2003. Billboard clouds for extreme model simplification. In : John C. Hart, editor. Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH-03). *ACM Transactions on Graphics*, 22(3) : 689-696.

Deng Q.-Q., Zhang X.-P., Gay S., Lei X.-D., 2007. Continuous lod model of coniferous foliage. *International Journal of Virtual Reality*, 6(4) : 77-84.

Deng Q.-Q., Zhang X.-P., Lei X.-D., Jaeger M., 2007. Fast Forest Visualization on Hierarchical Images and Visibility, Proceedings of FSPM2007, the 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, november 4-9, 2007, Napier, New Zealand.

Deng Q.-Q., Zhang X.-P., Yang G., Jaeger M., 2010. Multiresolution foliage for forest rendering. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 21(1) : 1-23.

Deussen O., Lintermann B., 1997. A modelling method and user interface for creating plants. In : *Proceedings of Graphics Interface 97*. Morgan Kaufmann Publishers, p. 189-197.

Deussen O., Lintermann B., 2005. *Digital design of nature: computer generated plants and organics*. Springer, Berlin, 295 p.

Diao J., De Reffye P., Lei X.-D., Guo H., Letort V., 2012. Simulation of the topological development of young eucalyptus using a stochastic model and sampling measurement strategy. *Computers and electronics in agriculture*, 80(1) : 105-114.

Dinouard P., de Reffye P., Jaeger M., 1987. Modélisation et simulation de l'architecture de l'hévéa. *Revue Générale des Caoutchoucs et Plastiques*, 64(673) : 53-55.

Dong L., Letort V., de Reffye P., Zhan Z.-G., 2010. Modeling branching effects on source-sink relationships of the cotton plant. In : Li B.-G., Jaeger M., Guo Y. *The Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA 09)*, 9-13 november 2009, Beijing, China. Los Alamitos, IEEE Computer Society, 293-302.

Dong Q.-X., Louarn G., Wang Y.-M., Barczy J.-F., de Reffye P., 2008. Does the structure function model GreenLab deal with crop phenotypic plasticity induced by plant spacing? A case study on tomato. *Annals of Botany*, 101(8) : 1195-1206.

Dong Q.-X., Wang Y.-M., Yang L., Barczy J.-F., de Reffye P., 2007. GreenLab-tomato: a 3D architectural model for tomato development. *New zealand journal of agricultural research*, 50 : 1229-1233.

Dreyfus P., 1993. Modelling Austrian black pine response to silvicultural practices in the South East of France. In : Burkhart HE, Gregoire TG, Smith JL (eds). *Proc IUFRO S4.01 conf "Modelling stand response to silvicultural practices"*. Publ FWS-1-93, Virginia Polytech Inst and State Univ, Blacksburg, p. 5-18.

- Edelin C., de Reffye P., Jaeger M., Dinouard P., 1989. La simulation de l'architecture des arbres et son rôle potentiel dans la conception et la gestion des paysages urbains. *Revue Forestière Française*, numéro spécial 41 : 143-153.
- Edelsbrunner H., Mücke E.-P., 1994. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 13(1) : 43-72
- Edmeades G. O., Daynard T.B., 1979. The development of plant-to-plant variability in maize at different planting densities. *Canadian Journal of Plant Science*, 59(3) : 561-576.
- Eichhorn F., 1904. Relationships between dominant height and stand volume. *All. Forst Jagd*, 80 : 45-49.
- El Homazi M. A., Zirari A., Dollé V., Dauzat J., Jaeger M., Lecoustre R., Oihabi A., 2000. Modeling of the architecture of the date palm. Methodology and applications. In : *Date palm international symposium*, Sam Nujoma (Ed.), Windhoek, Namibia, 22-25/03/2000, p. 45-46.
- Eschenbach C., 2005. Emergent properties modelled with the functional structural tree growth model ALMIS: computer experiments on resource gain and use. *Ecological Modelling*, 186 : 470-488.
- Eyrolles G., 1986. Synthèse d'images figuratives d'arbres par des méthodes combinatoires. Thèse Université de Bordeaux I.
- Falque M., Vincent A., Vaissière E. *et al.*, 1995. Effect of pollination intensity on fruit and seed set in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Sexual Plant Reproduction*, 8(6) : 354-360.
- Fan X.-R., Kang M.-Z., Heuvelink E., de Reffye P., Hu B.G., 2015. A knowledge-and-data-driven modeling approach for simulating plant growth: A case study on tomato growth. *Ecological Modelling*, 312 : 363-373.
- Feng L., De Reffye P., Dreyfus P., Auclair D., 2012. Connecting an architectural plant model to a forest stand dynamics model—application to Austrian black pine stand visualization. *Annals of forest science*, 69(2) : 245-255.
- Feng L., Mailhol J.-C., Rey H., Griffon S., Auclair D., De Reffye P., 2014. Comparing an empirical crop model with a functional structural plant model to account for individual variability. *European Journal of Agronomy*, 53 : 16-27.
- Feng L., Mailhol J.-C., Rey H., Griffon S., Auclair D., de Reffye P., 2010. Combining a process based model with a functional structural plant model for production partitioning and visualization. In : *Proceedings of 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models (FSPM)*.
- Feng L., Rey H., Mailhol J.-C., Kang M.-Z., de Reffye P., 2013. Concept and calibration of virtual wheat including stochastic tillering. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013)*, Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 279-281.
- Fernández I.-G., 2007. Generation and interactive visualization of 3D vegetation. Master Thesis, Computing University of Girona.
- Fourcaud T., 1995. Analyse du comportement mécanique d'une plante en croissance par la méthode des éléments finis. Thèse de 3^e cycle en mathématiques appliquées, Université de Bordeaux, 148 p.
- Fourcaud T., Blaise F., Barthélémy D., Houllier F., de Reffye P., 1997. A physiological approach for tree growth modelling in the software AMAPpara. Nepveu, G. (Ed). *Proceedings of 2nd Workshop Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software (WP S5.01.04)*, 25-30/08/1996, Berg-en Dal, Afrique du Sud, p. 321-334.
- Fourcaud T., Blaise F., de Reffye P., Lac P., 1998. Une approche fonctionnelle pour la simulation de la croissance d'arbres fruitiers : le logiciel AmapPara. In : *Architecture et modélisation en arboriculture fruitière*, Montpellier, 5-6/03/1998, p. 307-316.

Fourcaud T., Blaise F., Lac P., Castera P., de Reffye P., 2003. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees II. Implementation in the Amappara software and simulation of tree growth. *Trees - Structure and Function*, 17(1) : 31-39.

Fournier C., Andrieu B., 1998. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Annals of Botany*, 81(2) : 233-250.

Fournier C., Andrieu B., 1999. ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability. *Agronomie*, 19(3-4) : 313-327.

Fournier D., 1989. Modélisation de la croissance et de l'architecture du Merisier (*prunus avium L.*) DAA spécialité : Agronomie méditerranéenne. Montpellier, ENSA. 77 p.

Françon J., 1990. Sur la modélisation informatique de l'architecture et du développement des végétaux. Centre de recherche en informatique. In : 2^{ème} colloque international « L'Arbre » Montpellier: Institut de Botanique, (Naturalia Monspeliensia, Hors-Série), 1991.

Frankin, P., 1972. Modèles mathématiques de structures chez les végétaux. *Cahiers ORSTOM Série. Biologie*, n°17 : 3-21.

G - H - I

- Gang Y., Cao W.-Q., Liu D.-X., Kang M.-Z., Letort V., Xing M.-J., Huang X.-Y., 2011. Growth and development simulation based on functional-structural model GreenLab for poplar (*Salicaceae*). *African Journal of Agricultural Research*, 6(13) : 3071-3077.
- Gardner Y, Geoffrey Y., 1984. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. In : Hank Christiansen (Ed.). *Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 84)*. ACM, New York, p. 11-20.
- Gideon E. Schwarz, 1978. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6(2)2 : 461-464.
- Gilet G., Meyer A., Neyret F., 2005. Point-based rendering of trees. In : Galin E., Poulin P. (Eds.). *Proceedings of the First Eurographics Conference on Natural Phenomena (NPH 05)*. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, p. 67-73.
- Godin C., 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 5-6(57) : 413-438.
- Godin C., Costes É., Caraglio Y. (1997). Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline. 1997. *Silva Fennica*, 31(3) : 355-366.
- Godin C., Guédon Y., Costes E., Caraglio Y., 1997. Measuring and analysing plants with the AMAPmod software. In : Marek T. Michalewicz, eds., *Advances in computational life sciences: Plants to ecosystems*. CSIRO, Australia, 1997, p. 53-84.
- Goethe (von) J.-W., 1790. *La métamorphose des plantes*. Traduction de Bideau, H., 1975, Éditions Triades, Paris.
- Griffon S., Auclair D., 2009. Visualising changes in agricultural landscape. In : Van Ittersum M.K., Wolf J., Van Laar H.H. (Eds). *Proceedings of AgSAP*, Egmond aan Zee, The Netherlands. Wageningen University and Research Centre, 10-12 March 2009, p. 296-297.
- Griffon S., de Coligny F., 2012. AMAPstudio: a Software Suite for Plants Architecture Modelling. In : *Proceedings of Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA12)*, Shanghai, 31 Oct - 3 Nov 2012. IEEE press, p. 141-147.
- Grosfeld J, Barthélémy D, Brion C., 1999. Architectural variations of *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (Araucariaceae) in its natural habitat. In: Kurmann MH, Hemsley AR eds. *The evolution of plant architecture*. Kew: Royal Botanic Gardens, p. 109-122.
- Guédon, Y., Heuret, P., Costes, E., 2003. Comparison methods for branching and axillary flowering sequences. *Journal of Theoretical Biology*, 225(3), :301-325.
- Guimberteau G., Mérillou S., Terraz O., 2004. Simulation de la croissance interne de bois basée sur des subdivisions de volumes. In : *Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*. AFIG 2004.
- Guo H., Letort V., Hong L.-X., Fourcaud T., Cournède P.-H., Lu Y.-C., de Reffye P., 2007. Adaptation of the GreenLab model for analyzing sink-source relationships in Chinese Pine saplings. In : T. Fourcaud and X. P. Zhang. *Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*, PMA06, Beijing, China, November 13-17, 2006. Los Alamos, IEEE Computer Society, p. 236-243.
- Guo Y., Ma Y.-T., Zhan Z.-G., Li B.-G., Dingkuhn M., Luquet D., De Reffye P., 2006. Parameter optimization and field validation of the functional-structural model GreenLab for maize. *Annals of botany*, 97(2) : 217-230.
- Hallé F, Martin R., 1968. Étude de la croissance rythmique chez *Hevea brasiliensis*. *Adansonia*, Série 2(8) : 475-503.
- Hallé F., Oldeman R.-A.-A., Tomlinson P.-B., 1978. *Tropical Trees and Forests*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 441p.

- Heckbert P., 1989. Fundamentals of texture mapping and image warping. Master thesis (technical report no. ucb/csd 89/516), University of California, Berkeley.
- Heuvelink E., 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation. *Annals of Botany*, 75(4) : 369-379.
- Heuvelink E., 1996a. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*, 77(1) : 71-80.
- Heuvelink E., 1996b. Re-interpretation of an Experiment on the Role of Assimilated Transport Resistance in Partitioning in Tomato. *Annals of Botany*, 78(4) : 467-470.
- Heuvelink E., 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany*, 83(4) : 413-422.
- Hirofugu A., 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle ». In: *Second International Symposium on Information Theory*, p. 267-281
- Honjo T., Lim E., 2001. Visualization of landscape by VRML system. *Landscape and Urban Planning*, 55 : 175-183.
- Honjo T., Umeki K., Lim E., Wang D.-H, Yang P.-A, Hsieh H.-C., 2009. Landscape Visualization on Google Earth. In : *Proceedings of the 2009 Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization, and Applications (PMA 09)*. IEEE Computer Society, Washington-DC, p. 445-448.
- Horton R.-E., 1945. Erosion development of systems and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of Geol. Soc. America*, 56 : 275-370.
- Houllier F., Leban J.-M., Colin F. 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *For. Ecol. Manage.*, 74 : 91-102.
- Hua J., Kang M.-Z., 2011. Functional tree models reacting to the environment. ACM SIGGRAPH 2011 Posters. Vancouver, British Columbia, Canada, ACM.
- Hua J., Kang M.-Z., 2011. Management of Crop Pruning Assisted by Computational Experiment In : *2011 International Conference on Agricultural and Biosystems Engineering*.
- Hua J., Kang M.-Z., De Reffye P., 2011. An Interactive plant pruning system based on GreenLab model: Implementation and case study. In *Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 185-188). IEEE.

J - K - L

- Jaeger M., 1987. Représentation et simulation de croissance des végétaux. Thèse doctorat en informatique. Strasbourg ; Université Louis Pasteur, 156 p.
- Jaeger M., 2012. Enhancing computer generated natural scenes using quick and dirty image based recipes. In : *Proceedings of Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA12)*, Shanghai, 31 Oct - 3 Nov 2012. IEEE press, p. 164-171.
- Jaeger M., de Reffye P., 1991. Le logiciel AMAP: un outil de simulation et de représentation des végétaux. In : de Reffye P., Jaeger M. (Eds). *L'informatique scientifique dans l'enseignement de la biologie et de la géologie au lycée : actes du colloque*. Paris, Institut National de la Recherche Pédagogique, p. 243-248 (Colloque Technologies Nouvelles et Education).
- Jaeger M., de Reffye P., 1992. Basic concepts of computer simulation of plant growth. *Journal of Biosciences*, 17(3) : 275-291.
- Jaeger M., Jia J.-Y., Zhang X.-P., Griffon S., 2010. VR Web based tree and vegetation representations for environmental applications and studies, an example on ChongMing Island. In : *LandMod 2010: International Conference on Integrative Landscape Modelling*, Montpellier, February 3-5, 2010, 8 p.
- Jaeger M., Sun R.-X., Jia J.-Y., le Chevalier V., 2010. Efficient virtual plant data structure for visualization and animation. In : *Proceedings of IADIS International Conferences Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2010*, MCCSIS 2010 Freiburg, Germany, July 27-29, 2010 IADIS, p. 65-75.
- Jaeger M., Teng J., 2003. Tree and Plant volume imaging. An introductive study towards voxelized fonctionnal landscapes. *Proceedings of PMA03*, Beijing October 2003. p. 169-181
- Jakulin A., 2000. Interactive vegetation rendering with slicing and blending. In : *Proceedings of the Eurographics 2000 Conference-Short Presentations*, p. 273-282.
- Janey N., 1992. Modélisation et synthèse d'images d'arbres et de bassins fluviaux associant méthodes combinatoires et plongement automatique d'arbres et cartes planaires. Thèse en automatique et informatique de l'université de Franche-Comté, 321 p.
- Jeuffroy M.-H., Bergez J. E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Surleau-Chambenoit C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. *Agronomie*, 18 : 311-346.
- Johnson N., Kotz S. 1969. *Discrete distributions*. John Wiley & Sons.
- Jones C.-A., Kiniry J.R., 1986. (eds.). CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, 194 p.
- Jourdan C., Rey H., 1997. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, 189 : 33-48.
- Jourdan C., Rey H., 1997. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, 190(2) : 235-246.
- Jullien A., Mathieu A., Allirand J.-M., Pinet A., de Reffye P., Cournède P.-H., Ney B., 2011. Characterization of the interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus*) using the GreenLab model. *Annals of Botany*, 107(5) : 765-779
- Kang M.-Z., Cournède P.-H., de Reffye P., Auclair D., 2008. Analytical study of a stochastic plant growth model: application to the GreenLab model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(1) : 57-75

- Kang M.-Z., Cournède P.-H., Le Roux J., de Reffye P., Hu B.-G., 2004. Theoretical study and numerical simulation of a stochastic model for plant growth. CARI04, Tunisia.
- Kang M.-Z., Cournède P.-H., Quadrat J.-P., de Reffye P., 2007. A stochastic language for plant topology. In : Fourcaud, T., Zhang, X. P. (Eds). *Proceedings. Second International Symposium on plant growth modeling, simulation, visualization and applications*, PMA06, 13-17 november 2006, Beijing, P.R. China. Los Alamitos, IEEE Computer Society, 34-39 p.
- Kang M.-Z., de Reffye P., Barczi J.-F., 2003. Fast algorithm for stochastic 3D tree computation and forest simulation. In: *11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2003*. Plzen - Bory, Czech Republic, 3-7/02/2003.
- Kang M.-Z., de Reffye P., Heuvelink E., 2010. Modelling growth of inflorescence. In: Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 311-310.
- Kang M.-Z., Evers J.-B., Vos J., de Reffye P., 2008. The derivation of sink functions of wheat organs using the GreenLab Model. *Annals of Botany*, 101(8) : 1099-1108.
- Kang M.-Z., Heuvelink E., Carvalho S.-M., de Reffye P., 2012. A virtual plant that responds to the environment like a real one: the case for chrysanthemum. *New Phytologist*, 195(2) : 384-395.
- Kang M.-Z., Heuvelink E., de Reffye P., 2006. Building virtual chrysanthemum based on sink-source relationships: preliminary results. In : *III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation*, 718, p. 129-136.
- Kang M.-Z., Heuvelink E., Susana M.-P., Carvalho S.-M., de Reffye P., 2012. A virtual plant that responds to the environment like a real one: the case for chrysanthemum. *New Phytologist*, 195(2) : 384-395.
- Kang M.-Z., Hua J., de Reffye P., Corpetti T., 2012. *Reconstructing LAI Series by Filtering Technique and a Dynamic Plant Model*. INTECH Open Access Publisher.
- Kang M.-Z., Qi R., de Reffye P., Hu B.-G., 2006. GreenScilab: A toolbox simulating plant growth in the Scilab environment. In : *8th Middle Eastern Simulation Multiconference*, 174-178, Alexandria, Egypt, 2006.
- Kang M.-Z., Qi R., de Reffye P., Hu B.-G., 2005. Cultivating virtual plant. In : Kang M.-G., Hu B.-G. and Qi R. *SCILAB Research, Development and Applications*. Beijing, Tsinghua University Press, Springer, 167-181.
- Kang M.-Z., Qi R., de Reffye P., Hu B.-G., 2009. GreenScilab: A toolbox simulating virtual plants in the Scilab Environment. 2009 IEEE International Workshop on Open-source Software for Scientific Computation (OSSC 2009).
- Kang M.-Z., Yang L.-L., Zhang B.-G., de Reffye P., 2011. Correlation between dynamic tomato fruit-set and source sink ratio: a common relationship for different plant densities and seasons? *Annals of Botany*, 107(5) : 805-815
- Kawaguchi Y., 1982. A morphological study of the form of nature. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 16(3) : 223-232.
- Keating B.-A., Carberry P.-S., Hammer G.-L., Probert M.-E., Robertson M.-J., Holzworth D., McLean G., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3) : 267-288.
- Kennedy J., Eberhart R., 1995. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscata way, NJ, IEEE Press, p. 1942-1948
- Kharlamov A., Cantlay I, Stepanenko Y., 2008. Chapter 4. Next-generation SpeedTree rendering. In : Nguyen H. (Eds). *GPU Gems 3*. Canada, Addison-Wesley, p. 69-92.
- Kurth W., Sloboda B., 1997. Growth grammars simulating trees - an extension of L-systems incorporating local variables and sensitivity. *Silva Fennica*, 31 : 285-295.

- Kurth W., 1994. Morphological models of plant growth: possibilities and ecological relevance. *Ecological Modelling*, 75 : 299-308.
- Le Chevalier V., Jaeger M., Mei X., Cournède P.-H., 2007. Simulation and visualisation of functional landscapes: effects of the water resource competition between plants. *Journal of computer science and technology*, 22(6) : 835-845.
- Leban J.-M., Houllier F., Goy B., Colin F., 1991. La qualité du bois d'épicéa commun en liaison avec les conditions de croissance. *Forêt Entreprise*, 80 : 13-26.
- Lecoustre R., de Reffye P., 1984. Contribution to an integrated control of *Coelaenomenodera minuta* Uh., main pest of *Elaeis guineensis* in West Africa. Modelling of *Coelaenomenodera* population dynamics and practical applications. *Oléagineux*, 39(10) : 461-469.
- Lecoustre R., de Reffye P., 1986. Contribution to the development of an integrated control method against *Coelaenomenodera minuta* Uh., main pest of *Elaeis guineensis* in West Africa. *Oléagineux*, 41(8-9) : 367-376.
- Lecoustre R., de Reffye P., 1987. Méthode d'estimation de la part due à la pollinisation dans l'expression du taux de nouaison. *Oléagineux*, 42(5) : 175-183.
- Lecoustre R., de Reffye P., Jaeger M., Dinouard P., 1992. Controlling the architectural geometry of a plant's growth - Application to the Begonia genus. In : Thalmann, D., Thalmann, N. M. (Eds). *Creating and animating the virtual world*. S. l. : Springer Verlag, 199-214 p.
- Lemaire S., 2010. Système dynamique de la croissance et du développement de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.). AgroParisTech (Ph. D. Thesis).
- Lemaire S., Maupas F., Cournède P.-H., de Reffye P., 2008. A morphogenetic crop model for sugar-beet (*beta vulgaris* l.). In : *International Symposium on Crop Modeling and Decision Support : ISCMDS 2008*, April 19-22, 2008, Nanjing, China, 2008.
- Letort V., Cournède P.-H., Mathieu A., de Reffye P., Constant T., 2008. Parametric identification of a functional-structural tree growth model and application to beech trees (*Fagus sylvatica*). *Functional Plant Biology*, 35(9-10) : 951-963.
- Letort V., Heuret P., Zalamea P.-C., de Reffye P., Nicolini E., 2012. Analysing the effects of local environment on the source-sink balance of *Cecropia sciadophylla* : a methodological approach based on model inversion. *Annals of Forest Science*, 69 : 167-180.
- Letort V., Mahe P., Cournède P.-H., de Reffye P., Courtois B., 2008. Quantitative genetics and functional-structural plant growth models: Simulation of quantitative trait loci detection for model parameters and application to potential yield optimization. *Annals of botany*, 101(8) : 1243-1254.
- Letort V., Sabatier S., Akaffou S., Hamon S., Hamon P. *et al.*, 2012. Interspecific variability of biomass production of young Coffea. In : *Proceedings of Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA)*, Oct 2012, Shanghai, China. IEEE Press, p. 224-227.
- Li Z.-P., Le Chevalier V., Cournède P.-H., 2009. Towards a continuous approach of functional-structural plant growth. In : *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*. IEEE, p. 334-340.
- Lindenmayer A., 1968. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, 18(3) : 280-299.
- Lintermann B., Deussen O., 1997. A Modelling Method and User Interface for Creating Plants. *Graphics Interface*, 1997 : 189-198.
- Lintermann B., Deussen O., 1999. Interactive structural and geometrical modeling of plants. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(1) : 56-65.

Livny Y.-T., Yan F.-L., Olson M., Chen B.-Q., Zhang H., El-Sana J., 2010. Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds. *ACM Trans. Graph.* 29(6, 151), 8 p.

Loi C., Cournède, P.-H., 2008. Generating functions of stochastic L-systems and application to models of plant development. *DMTCS proceedings*, Fifth Colloquium on Mathematics and Computer Science, DMTCS proc. AI, 2008, 325–338 .

Loi C., Cournède, P.-H., Françon J., 2010. A symbolic method to analyse patterns in plant structure whose organogenesis is driven by a multitype branching process. *Journal of Computer Science and Technology*, March 2010 :1-14

Luquet D., Dingkuhn M., Kim H., Tambour L., Clement-Vidal A., 2006. EcoMeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice. 1. Concept, validation and sensitivity analysis. *Functional Plant Biology*, 33(4) : 309-323.

M - N - O - P

- Ma Y.-T., Li B.-G., Zhan Z.-G., Guo Y., Luquet D., de Reffye P., Dingkuhn M., 2007. Parameter stability of the functional–structural plant model GREENLAB as affected by variation within populations, among seasons and among growth stages. *Annals of Botany*, 99(1) : 61-73.
- Ma Y.-T., Wen M.-P., Guo Y., Li B.-G., Cournède P.-H., de Reffye P. 2008. Parameter optimization and field validation of the functional–structural model GREENLAB for maize at different population densities. *Annals of botany*, 101(8) : 1185-1194.
- Ma Y.-T., Wubs A.-M., Mathieu A., Heuvelink E., Zhu J.-Y., Hu B.-G., Cournède P.-H., de Reffye P., 2011. Simulation of fruit-set and trophic competition and optimization of yield advantages in six Capsicum cultivars using functional-structural plant modelling. *Annals of Botany*, 107(5) : 793-803.
- Maciel P.-W.-C., Shirley P., 1995. Visual navigation of large environments using textured clusters. In : *ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics*.
- Mailhol J.-C., Revol P., Ruelle P., 1996. Pilote: un modèle opérationnel pour déceler l'apparition de stress hydrique. In : *ICID 16th international congress on irrigation and drainage: workshop on crop-waterenvironment models*, p. 167-182.
- Mailhol J.-C., Ruelle P., Walser S., Schütze N., Dejean C., 2011. Analysis of AET and yield prediction under surface and buried drip irrigation systems using the crop model PILOTE and Hydrus-2D. *Agric. Water Manag.*, 98 : 1033-1044.
- Mangenet T., 2013. Approche rétrospective des cycles phénologiques chez quelques espèces guyanaises. Vers une nouvelle branche de la dendrochronologie. Université de Montpellier 2, thèse de doctorat, systèmes intègres en biologie, agronomie, géosciences, hydrosociences, environnement (SIBAGHE), 234 p.
- Mathieu A., 2006. Essai sur la modélisation des interactions entre la croissance et le développement d'une plante : cas du modèle GreenLab. Thèse de doctorat Mathématiques appliquées. École centrale de Paris.
- Mathieu A., Cournède P.-H., Barthélémy D., de Reffye P., 2007. Condition for the generation of rhythms in a discrete dynamic system. Case of a functional structural plant growth model. In: T. Fourcaud and X. P. Zhang. *Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, PMA06, 13-17 november 2006, Beijing, P.R. China*. Los Alamos, IEEE Computer Society, 26-33.
- Mathieu A., Cournède P.-H., Barthélémy D., de Reffye P., 2008. Rhythms and alternating patterns in plants as emergent properties of a model of interaction between development and functioning. *Annals of Botany*, 101(8) : 1233-1242
- Mathieu A., Cournède P.-H., De Reffye P., 2004. A dynamical model of plant growth with full retroaction between organogenesis and photosynthesis. In : *CARI'04, 7ème Colloque Africain sur la Recherche en Informatique*, Hammamet, Tunisie, 22-25/11/2004.
- Mathieu A., Cournède P.-H., Letort V., Barthélémy D., de Reffye P. 2009. A dynamic model of plant growth with interactions between development and functional mechanisms to study plant structural plasticity related to trophic competition. *Annals of Botany*, 103(8) : 1173-1186.
- Mathieu A., Letort V., Cournède P.-H., Zhang B.-G., Heuret P., de Reffye P., 2012. Oscillations in Functional Structural Plant Growth Models Math. Model. *Nat. Phenom.* 7(6): 47–66.
- Mathieu A., Zhang B.-G., Heuvelink E., Liu S.-J., Cournède P.-H., de Reffye P. 2007. Calibration of fruit cyclic patterns in cucumber plants as a function of source-sink ratio with the GreenLab model. In : *FSPM 2007 The 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models*, Napier, New Zealand, 04-05/11/2007, 1-4
- Max N., 1996. Hierarchical rendering of trees from pre-computed multi-layer z-buffers. In : *Proceedings of the 1996 Eurographics Workshop on Rendering*, 1996, p. 165-174.

- Mialet I., 1990. Le cacaoyer, *Theobroma cacao* La modélisation de son architecture et de sa croissance : exemple de l'hybride UPA402* C410 (Doctoral dissertation).
- Mialet-Serra I., Dauzat J., Auclair D. 2001. Using plant architectural models for estimation of radiation transfer in a coconut-based agroforestry system. *Agroforestry systems*, 53(2) : 141-149.
- Mitchell K.-J., 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas fir. *Forest Sciences*, Monograph 17, 39 p.
- Mossu G., Paulin D., De Reffye P., 1981. Influence de la floraison et de la pollinisation sur les rendements du cacaoyer. Liaisons mathématiques entre les données expérimentales. Équation du rendement. *Café Cacao Thé*, 25(3) : 155-168.
- Naylor T., Balintfy J. 1966. *Computer simulation techniques*. John Wiley & Sons.
- Neubert B., Franken T., Deussen O., 2007. Approximate image-based tree-modeling using particle flows. In : *ACM, Transactions on Graphics*, T06, 88.
- Nicolini E, Chanson B., 1999. La pousse courte, un indicateur du degré de maturation chez le hêtre (*Fagus Sylvatica* L.). *Canadian Journal of Botany*, 77 : 1539-1550.
- Nicolini, E., 1998. Architecture et gradients morphogénétiques chez de jeunes hêtres *Fagus sylvatica* L. (Fagaceae) en milieu forestier. *Canadian Journal of Botany*, 76(7) : 1232-1244.
- Ning X.-J., Zhang X.-P., Wang Y.-G., Jaeger M., 2009. Segmentation of architecture shape information from 3D point cloud. In : S.N. Spencer ed. *VRCAI 09. Proceedings of the 8th international Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in industry* (Yokohama, Japan, December 14-15, 2009). ACM, New York, p. 127-132.
- Nosenzo R., de Reffye P., Blaise F., Le Dimet F.-X., 2001. Modèles mathématiques de conduite culturale. In : Malézieux É., Trébuil G., Jaeger M. (eds.). *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Montpellier, Cirad, p. 145-172. (Repères).
- Oldeman R.-A.-A., 1974. L'architecture de la forêt guyanaise. Mémoire n. 73. Paris, Orstom.
- Oppenheimer P.-E., 1986. Real time design and animation of fractal plants and trees. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4) : 55-64.
- Pagès L., Vercambre G., Drouet J. L., Lecompte F., Collet C., Le Bot J., 2004. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. *Plant and Soil*, 258(1) : 103-119.
- Pallas B., Loi C., Christophe A., Cournède P.-H., Lecoœur J., 2009. A stochastic growth model of grapevine with full interaction between environment, trophic competition and plant development. In : *Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications* (PMA09), IEEE, p. 95-102.
- Palubicki W., Horel K., Longay S., Runions A., Lane B., Měch R., Prusinkiewicz P., 2009. Self-organizing tree models for image synthesis. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3) : 58.
- Papert S., 1980. *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. Basic Books, Inc. 244 p.
- Parvais J.-P., de Reffye P., Lucas P., 1977. Observations sur la pollinisation libre chez *Theobroma cacao*: analyse mathématique des données et modélisation. *Café Cacao Thé*, 21(4) : 253-260.
- Paulin D., 1981. Contribution à l'étude de la biologie florale du cacaoyer. Bilan de pollinisations artificielles. *Café Cacao Thé*, 25 : 105-112.
- Perttunen J., Sievänen R., and Nikinmaa E., 1998. LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees. *Ecological Modelling*, 108(1-3) : 189-198.

- Perttunen J., Sievänen R., Nikinmaa E., Salminen H., Saarenmaa H., Väkevä J. LIGNUM: a tree model based on simple structural units. *Annals of Botany*, 77 : 87-98, 1996.
- Pfister H., Zwicker M., van Baar J., Gross M., 2000. Surfels: surface elements as rendering primitives. In : *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., p. 335-342.
- Poisson C., Rey H., 1997. Modélisation de l'architecture et de la croissance de 5 espèces du genre *Nicotiana*. *Ann. du Tabac*. Section 2(29) : 37-54.
- Poisson C., Rey H., Caraglio Y., Rabaste S., Barczi J.-F., Guedon Y., Modélisation de l'architecture et de la croissance de 5 espèces du genre *Nicotiana*. *Annales du Tabac*, France (1997).
- Pressler R., 1865. *Das Gesetz der Stammbildung*. Arnoldische Buchhandlung (Leipzig), 153 p.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., Hanan J., 1988. Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes. *Computer Graphics*, 22 : 141-150.
- Prusinkiewicz P., 1986. Applications of L-systems to computer imagery. In : Hartmut Ehrig, Manfred Nagl, Grzegorz Rozenberg, and Azriel Rosenfeld (Eds.). *Proceedings of the 3rd International Workshop on Graph-Grammars and Their Application to Computer Science*. Springer-Verlag, London, p. 534-548.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, New York, 228 p. (The Virtual Laboratory).
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., Hanan J., Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes, Proceedings of SIGGRAPH 88. *Computer Graphics*, 22 (4) : 141-150.
- Puntieri J., Barthélémy D., de Reffye P., Blaise F., Brion C., 1995. *Analisis, modelizacion y simulacion de la arquitectura de las plantas*. *Avances y aplicaciones en la region andino-patagonia*. In : Actas de las IV Jornadas Forestales Patagonias, San Martin de los Andes, Argentine, 547-573.

Q - R - S - T - U

- Qi R., 2009. Optimization and Optimal Control of Plant Growth: Application of the GreenLab Model for the Decision Help in Agriculture. Doctorat École centrale de Paris.
- Qi R., Cournède P.-H., de Reffye P., 2009. Tri-trophic Ecosystem Oil Palm-Pests-Auxiliaries: II. Sensitivity Analysis, Parameter Identification and Control. In : *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*. IEEE, p. 327-333.
- Qi R., Letort V., Kang M.-Z., Cournède P.-H., de Reffye P., Fourcaud T., 2009. Application of the GreenLab model to simulate and optimize tree stability and wood production: a theoretical study. *Silva Fennica*, 43(3) : 465-487
- Qi R., Ma Y.-T., Hu B.-G., de Reffye P., Cournède P.-H., 2010. Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1) : 96-105.
- Quan L., Tan P., Zeng G., Yuan L., Wang J.-D., Kang S.-B., 2006. Image-based plant modeling. In : *SIGGRAPH 06. ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, p. 599-604. Also published In : *ACM Transactions on Graphics* 25(3) : 772-778.
- Raboin L.-M., Paulin D., Cilas C., Eskes A. B., 1993. Analyse génétique de quelques caractères quantitatifs des fleurs du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). Leur intérêt pour l'évaluation de la diversité de l'espèce. *Café, cacao, thé*, 37(4) : 273-282.
- Reche-Martinez A., Martin I., Drettakis G., 2004 Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3) : 720-727.
- Reeves W.-T., 1983. Particle systems, a technique for modeling a class of fuzzy objects. In : Peter P. Tanner (Ed.). *Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 83)*. ACM, New York, p. 359-375.
- Reeves W.-T., Salesin D., Cook R.-L., 1987. Rendering antialiased shadows with depth maps. In : *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87)*, p. 283-291.
- Remolar I., Chover M., Ribelles J., Belmonte O., 2003. View-dependent multiresolution model for foliage. In : *Proceedings 11-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, p. 370-378.
- Rey H., 2003. Utilisation de la modélisation 3D pour l'analyse et la simulation du développement et de la croissance végétative d'une plante de tournesol en conditions environnementales fluctuantes (température et rayonnement). Doctoral dissertation, Montpellier, ENSA.
- Rey H., Barczy J.-F., Caraglio Y., de Reffye, P., 1998. AMAPsim : un outil de construction et simulation de plantes numériques tridimensionnelles : principes et applications. In : *Architecture et modélisation en arboriculture fruitière*, 11ème colloque sur les recherches fruitières, Montpellier, France 5-6/03/1998. INRA-Ctifl; p. 296-306.
- Rivals P., 1965. Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison (Application aux espèces fruitières). *Journal d'Agronomie Tropicale et de Botanique Appliquée*, 12 : 655-686.
- Sabatier S., Barthélémy D., 2001. Bud structure in relation to shoot morphology and position on the vegetative annual shoots of *Juglans Regia* L. (*Juglandaceae*). *Annals of Botany*, 87 : 117-123.
- Sabatier S., Barthélémy D., Ducouso I., Germain É., 1998. Modalités d'allongement et morphologie des pousses annuelles chez le noyer commun, *Juglans regia* L.'Lara'(Juglandaceae). *Canadian Journal of Botany*, 76(7) : 1253-1264.
- Saito K., Kumagai Y., Honjo T., Ishida Y., Lecoustre R., de Reffye P., 1993. Photo-realistic forest landscape simulation - Application of GIS and plant modeling technique. In : *Proceedings of NICOGRAPH'93*. Tokyo, Japon, NICOGRAPH'93, 11/1993, p. 226-236.

- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T., 1964. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I: Basic analyses, *Jpn. J. Ecol.*, 14 : 97-105.
- Shlyakhter I., Rozenoer M., Dorsey J., Teller S., 2001. Reconstructing 3d tree models from instrumented photographs. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(3) : 53-61.
- Smart Forest, 2000. User's Manual, Version 6.5, 14 p.
- Smith A.-R., 1984. Plants, fractals, and formal languages. In : Hank Christiansen (Ed.). *Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 84)*. ACM, New York, p. 1-10.
- Soler C., Sillion F.-X., Blaise F., de Reffye P., 2003. An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models. *ACM Transactions on Graphics*, 22(2) : 204-233.
- Sousa T., 2008. Chapter 16. Vegetation Procedural Animation and Shading in Crysis. In : Nguyen H. (Eds). *GPU Gems 3*. Canada, Addison-Wesley, p. 105-121.
- Strahler A.-N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Bull. Geol. Soc. America*, 63 : 17-42.
- Sun R.-X., Jia J.-Y., Jaeger M., 2009. Intelligent Tree Modeling Based on L-system. In : *IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009*. November 26-29, 2009, Wenzhou, China. p. 1096-1100.
- Sun R.-X., Jia J.-Y., Li H., Jaeger M., 2009. Image-based Lightweight Tree Modeling. In : S.N. Spencer Ed. *VRCAI 09. Proceedings of the 8th international. Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in industry* (Yokohama, Japan, December 14 - 15, 2009). ACM, New York, p. 17-22.
- Szafran N., Despreaux S., Biard L., Blaise F., 2003. Sawing of logs in virtual trees using 3D intersections algorithms. In : Hu B.-G., Jaeger M. (Eds), *Plant growth modelling and applications (PMA03)*, Proceedings of the 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications, Beijing, Chine, 13-16 octobre 2003. Beijing: Tsinghua University Press, Springer, p. 372-384.
- Tan P., Fang T., Xiao J.-X., Zhao P., Quan L., 2008. Single image tree modeling. *ACM Transactions on Graphics*, 27(5) : 108.
- Tan P., Zeng G., Wang J.-D., Kang S.-B., Quan L., 2007. Image-based tree modeling. In : *Proceedings of SIGGRAPH 2007*.
- Taugourdeau O., Delagrangé S., de Reffye P., Messier C., 2013. Modelling Sugar maple development along its whole ontogeny : modelling hypotheses and calibration methodology. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013)*, Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013.
- Thomas-Domenech J.-M., 1970. *Encyclopédie en couleur de la botanique, Marabout université 1970*.
- Tondjo K., 2016. Étude et modélisation des relations structure-fonctions chez le *Tectona grandis* (Teck) en plantation au Togo. Thèse soutenue, université de Lomé, Togo.
- Trevezas S., Malefaki S., Cournède P.-H., 2014. Parameter estimation via stochastic variants of the ECM algorithm with applications to plant growth modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*, 78 : 82-99.

V - W - X - Y - Z

- Varenne F., 2007. *Du modèle à la simulation informatique*. Paris, Vrin.
- Varenne F., Silberstein M., Dutreuil S., Huneman P., 2013. Modéliser & simuler. *Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, 1*.
- Vavitsara M.-E., 2014. Modélisation de l'architecture et de la production végétale des herbacées. Application à l'amélioration de la production *du Spilanthes acmelea* L. Thèse es Science. Université de Mahajanga, Madagascar.
- Viennot X.-G., Eyrolles G., Janey N., Arquès D., 1989. Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees, Actes de SIGGRAPH 89, Boston, Juillet 89. *Computer Graphics*, 23(3) : 31-40.
- Wang F., Kang M.-Z., Lu Q., Letort V., Han H., Guo Y., de Reffye P., Li B.-G., 2011. A stochastic model of tree architecture and biomass partitioning : application to Mongolian Scots pines. *Annals of Botany*, 107(5) : 781-792
- Wang H.-Y., Kang M.-Z., Hua J., Wang X.-J., 2013. Modeling plant plasticity from a biophysical model: biomechanics. In : *Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*. ACM, p. 115-122.
- Wang H.-Y, Kang M.-Z., Hua J., 2012. Simulating plant plasticity under light environment: A source-sink approach. In : *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2012 IEEE Fourth International Symposium on*. IEEE, p. 431-438.
- Wang X.-J., *et al*, 2014. Application of a probabilistic model for analysing the abortion of seeds and pods in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *Annals of Applied Biology*, 165(3) : 414-428.
- Wernecke P., Buck-Sorlin G., Diepenbrock W., 2000. Combining process- with architectural models: the simulation tool VICA. *Systems Analysis Modelling Simulation*, 39(2) : 235-277.
- Wither J., Boudon F., Cani M.P., Godin C., 2009. Structure from silhouettes: a new paradigm for fast sketch-based design of trees. In : *Proceedings of EUROGRAPHICS 2009*.
- Woo M., Neider J., Davis T., Shreiner D., 1999. *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 1.2* (3rd ed.). Boston, Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Wu L., Le Dimet F.-X., de Reffye P., Hu B.-G., Cournède P.-H., Kang, M.-Z. , 2012. An optimal control methodology for plant growth—Case study of a water supply problem of sunflower. *Mathematics and Computers in Simulation*, 82(5) : 909-923.
- Wu Q.-L., Cournède P.-H., Mathieu A., 2012. An efficient computational method for global sensitivity analysis and its application to tree growth modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 107 : 35-43.
- Xplo : an open source software for plant architecture eXploration. <http://amapstudio.cirad.fr/soft/xplo/start>
- Xu H., Gossett N., Chen B.-Q. 2007. Knowledge and heuristic-based modeling of laser- scanned trees. *ACM Transactions on Graphics*, 26(4), p. 19.
- Yan H.-P., de Reffye P., Pan C.-H., Hu BaoGang., 2003. Fast construction of plant architectural models based on substructure decomposition. *Journal of Computer Science and Technology*, 18(6) : 780-787.
- Yan H.-P., Barczy J.-F., de Reffye P., Hu B.-G., Jaeger M., Leroux J., 2002. Fast Algorithms of plant computation based on substructure instances. *Journal of WSCG*, 10(1-3) : 145-153
- Yan H.-P., Kang M.-Z., de Reffye P., Dingkuhn M., 2004. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany*, 93(5) : 591-602.

- Zhan Z.-G., de Reffye P., Houllier F., Hu B.-G., 2003. Fitting a Functional-Structural growth model with plant architectural data. In: Hu B.-G., Jaeger M., eds. *Proceedings of 1st International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA03)*. Beijing, China, Springer and Tsinghua University Press, p. 108-117.
- Zhang B.-G., Kang M.-Z., Letort V., Wang X.-J., de Reffye P., 2010. Comparison between empirical and functional sinks of organs - Application on tomato plant. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 191-197.
- Zhang W., Li B.-G., 2009. General structural model of crop root system based on the dual-scale automaton. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 161-164.
- Zhang X.-P., Blaise F., Jaeger M., 2006. Multiresolution Plant Models with complex organs. In : *Proceedings of ACM VRCIA 2006*, June 14-17, Hong-Kong, p. 331-334.
- Zhao X., de Reffye P., Barthélémy D., Hu B.-G., 2003. Interactive simulation of plant architecture based on a dual-scale automaton model. In: P. de Reffye and X. Zhao. *Plant growth modeling and applications. Proceedings PMA03 : 2003' International symposium on plant growth modeling, simulation, visualization and their applications, Beijing, China, October 13-16, 2003*. Beijing, Chine. Beijing, Tsinghua University Press-Springer, p. 144-153.
- Zhao X., de Reffye P., Xiong F.-L., Zhan Z.-G., 2001. Dual-scale automaton model for virtual plant development. *Chinese Journal of Computers*, 24(6) : 608-617
- Zheng B.-Y., Ma Y.-T., Li B.-G., Guo Y., Deng Q.-Y., 2009. Assessment of the effects of leaf angle combinations on potential photosynthesis capacity of rice with 3-D models using high performance computing. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 237-244.
- Zhu C., Zhang X.-P., Hu B.-G., Jaeger M., 2008. Reconstruction of Tree Crown Shape from Scanned Data. In : Z. Pan *et al.* (Eds.). Edutainment 2008, LNCS 5093. Proceedings of Third International Conference of E-Learning and Games. Edutainment 08. Nanjing, China, p. 745-756.
- Zhu C., Zhang X.-P., Jaeger M., 2009. New Method for Construction of Tree Crown from Scanned Data. In : Li B.-G., Jaeger M. and Guo Y. (Eds). 2010. *Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09)*. Beijing, China, November 9-13, IEEE CPS, p. 352-359.

Glossaire

Voir aussi : <http://amap.cirad.fr/architecture/glossaire.html> 

Âge chronologique. Caractérise, pour un axe ou un phytomère, le nombre de cycles de développement écoulés depuis leurs créations par le méristème terminal.

Âge ontogénique. Égal pour un phytomère à l'âge chronologique de la plante au moment de sa création par le méristème terminal. Âge physiologique. Index qui mesure qualitativement le degré de différenciation morphologique d'un axe végétatif qui est assimilé à un vieillissement. En général, l'âge physiologique augmente avec l'ordre de ramification.

Architecture végétale (botanique). L'architecture végétale est l'étude des formes extérieures des végétaux et de leur organisation (Wikipédia).

Axe de développement. Représentation axiale simplifiée de la tige feuillée ou représentation des entités phytomères en alternance avec des entités vides (issues des pauses du méristème) et des caractéristiques des productions axillaires (organes et âges physiologiques des sous-structures portées).

Axe végétatif. Tige feuillée composée d'une série de phytomères avec leurs organes et leurs méristèmes axillaires.

Croissance primaire. Allongement des axes végétatifs sous l'action de l'expansion des entrenœuds en longueurs.

Croissance secondaire. Accroissement en diamètre des axes végétatifs sous l'action d'un empilement de cernes formés par le cambium assise méristématique périphérique chez les plantes ligneuses.

Croissance végétale. Résultat de la photosynthèse qui assure la production de la biomasse et de sa répartition dans les organes de la plante pour assurer leurs expansions.

Cycle de croissance (CC). Temps unitaire choisi pour contrôler la croissance d'une plante en biomasse.

Cycle de développement (CD). Temps unitaire nécessaire à la formation d'un phytomère par un méristème.

Développement végétal. Résultat de l'activité des méristèmes qui met en place une structure végétale. Le développement est continu en l'absence de pauses de longue durée (cas des herbacées) ou rythmique dans le cas contraire avec formation d'unités de croissance (cas des arbres.)

Estimation (de paramètres). Valeurs (de paramètres) calculés par optimisation à partir de mesures échantillonnées sur les plantes.

Fonction puits. Demande individuelle d'un organe pour capturer la biomasse à partir du pool commun afin d'assurer son expansion.

Fonction source. Fonction photosynthétique qui exprime la production de biomasse en fonction de l'efficacité climatique, de la lumière et de la surface foliaire. Méristème. Tissu dont les cellules sont en division active et qui engendre les autres parties de l'appareil végétatif.

Identification (de paramètres). Opération consistant à déterminer les paramètres importants pour un modèle à partir d'échantillons

Implémentation (d'un modèle). Réalisation logicielle (d'un modèle) dédiée à un environnement informatique (un système d'exploitation et une architecture matérielle).

LAI. Surface foliaire de la culture au m², également appelé indice foliaire.

LUE. Efficacité de la lumière

Organe puits. Organe assurant son expansion en prélevant de la biomasse du pool commun proportionnellement à sa force de puits. Tous les organes sont organes puits.

Organe source. Organe produisant de la biomasse (généralement les feuilles et les graines au début de croissance, parfois des tiges).

PAR. Radiation photosynthétique active, fraction de la radiation du soleil utilisable par la photosynthèse.

Phytomère. Entité botanique de base produite par un méristème apical comprenant un entrenœud, un nœud qui porte les organes (feuilles, fruits, et les méristèmes axillaires).

Plante computationnelle. Plante virtuelle calculée par un modèle de simulation, présentant des aspects structuraux ou fonctionnels.

Réitération (botanique). Capacité que peut offrir l'arbre adulte à dupliquer son unité architecturale.

Structure chronologique. Structure explicite à représentation planaire et temporelle incluant la représentation des pauses des méristèmes.

Structure explicite. Structure d'une plante computationnelle décrite sous forme d'une liste d'organes connectés autorisant une représentation géométrique.

Structure implicite. Structure d'une plante computationnelle décrite sous forme de tableaux qui donne les nombres des différents types de phytomères produits en fonction de l'âge chronologique de la plante et des âges physiologiques.

Structure morphologique. Structure explicite planaire montrant les organes avec leurs dimensions compte tenu de leur biomasse et de leurs allométries.

Structure potentielle. Structure incluant toutes les réalisations possibles des simulations stochastiques en mode chronologique. Chaque entité de la structure potentielle existe avec une probabilité calculable à partir du fonctionnement de l'automate botanique.

Structure topologique. Structure explicite planaire n'incluant pas la représentation des pauses des méristèmes.

Structure végétale. Représentation simplifiée de l'architecture d'une plante constituée d'un axe de développement qui porte des sous-structures.

Surface de production. Notion introduite dans le formalisme GreenLab permettant le passage de la plante isolée au peuplement. Cette surface intervient dans la relation liant à chaque cycle, la production à la surface foliaire.

Surface de projection. Projection verticale au sol du contour du houppier de la plante.

Surface disponible. Surface disponible au sol pour la croissance d'une plante individuelle égale à l'inverse de la densité.

Temps calendaire. Temps exprimé en nombre de jours.

Temps thermique. Temps exprimé en nombre de degré-jour, somme des températures moyennes journalières sur un temps calendaire donné.

Unité (ou diagramme) architectural(e) (botanique). Description conceptuelle de la structure de jeunes plantes fondée sur une typologie de différentes catégories d'axes, intégrant le nombre de ces catégories d'axes, leur nature et la manière dont elles s'agencent entre elles.

Unité de croissance. Portion d'axe feuillé produite par un méristème entre deux pauses de longue durée qui confère un aspect rythmique au développement.

Opérateurs et variables

Variables	Significations, codage
φ	Âge physiologique
a	Probabilité de ramification
b	Probabilité de développement
c	Viabilité (probabilité)
$D(t)$	Demande de la plante au cycle t
$E, E(t)$	Conditions environnementales (au cycle t)
k	Coefficient d'extinction (loi de Beer)
M	Opérateur (matriciel) descripteur de ramification
$max\varphi$	Nombre d'âges physiologiques
N, N_o, N_o^φ	Nombre de phytomères, d'organes
o	Paramètre indicé par l'organe o selon le code : a : feuilles ou limbes ; g : pétioles ou gaines ; e : entrenœuds ; c : cernes ; r : racines ; f : fruits femelles ; m : fruits mâles. On utilise p pour l'ensemble des organes d'un phytomère
p_o	Puits de l'organe o
p_a	Puits des feuilles (ou limbes)
p_g	Puits des pétioles (ou gaines)
p_e	Puits des entrenœuds
p_c	Puits des cernes
p_r	Puits des racines
p_f	Puits des fruits (femelles)
p_m	Puits des fruits (mâles)
P_p	Puits du phytomère
B_o	Variations du puits de l'organe o (paramètres bêta)
B_{o_1}, B_{o_2}	Variation du puits des feuilles
B_{e_1}, B_{e_2}	Variation du puits des entrenœuds
B_{f_1}, B_{f_2}	Variation du puits des fruits

Variation du puits des autres organes

$Q(t)$	Production de la plante au cycle t
$Q0$	Biomasse de la graine
$q_{o\varphi}(i, t)$	Production de l'organe o au rang i au cycle t
r	Coefficient d'efficience de l'eau
$S_{t\varphi}$	Structure d'âge t et d'âge physiologique φ
S_f	Surface des feuilles fonctionnelles
S_p	Surface de production
t	Cycle courant
t_a	Temps de fonctionnement des feuilles
t_x	Temps d'expansion (feuilles par défaut)
t_{xa}	Temps d'expansion des feuilles
t_{xf}	Temps d'expansion des fruits
U	Opérateur (matriciel) descripteur d'unité de croissance
w	Rapport de rythme

Liste des principaux sigles

Amap (UMR), unité de recherche mixte de botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations.
CAF. Académie chinoise de foresterie
CAS. Académie chinoise des sciences
CAU. Université chinoise d'agriculture, Chinese Agriculture University
CEF. Centre d'études forestières du Canada
Cirad. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNRS. Centre national de recherche scientifique
CTIFL. Centre technique interprofessionnel fruits légumes
ECP. École centrale de Paris, devenue Centrale Supelec
Groups. GreenLab Operator and Universal Plant Simulator
IDF. Institut du développement forestier
IFCC. Institut français du café et du cacao
Inra. Institut national de recherche agronomique
Inria. Institut national de recherche en informatique et en automatique
IRCC. Institut de recherches du café, du cacao et autres plantes stimulantes
IRD. Institut de recherche pour le développement
Irstea. Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
ITB. Institut technique français de la betterave industrielle
ITL. Institut technique du Lin
Liama. Laboratoire franco-chinois de recherche en informatique, automatique et mathématiques appliquées
LIRMM. Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier
Mas. Laboratoire de mathématiques appliquées aux systèmes à CentraleSupelec
UQAM. Université du Québec à Montréal
WUR. Université de Wageningen, Wageningen University and Research

LAI, indice foliaire, *leaf area index***LUE**, efficacité de la lumière, *light use efficiency***PAR**, radiation photosynthétique active, *photosynthetic active radiation***WUE**, efficacité de l'eau, *water use efficiency*

Codes couleurs des figures

Âges physiologiques

-  Phytomère en pause
-  Âge physiologique 5
-  Âge physiologique 4
-  Âge physiologique 3
-  Âge physiologique 2
-  Âge physiologique 1

Fonctionnement des organes

-  Phytomère en pause
-  Fruit ayant terminé son expansion
-  Fruit en expansion
-  Feuille morte non fonctionnelle
-  Feuille fonctionnelle
-  Axes ou phytomères

Auteurs

Daniel	Barthélémy	(Cirad),	daniel.barthelemy@cirad.fr	✕
Frédéric	Blaise	(Cirad),	frederic.blaise@cirad.fr	✕
Paul-Henri	Cournède	(ECP),	paul-henry.cournede@centralesupelec.fr	✕
Philippe	De Reffye,	(Cirad),	retraité, ph.dereffye@gmail.com	✕
Ep	Heuvelink	(WUR),	ep.heuvelink@wur.nl	✕
François	Houllier, Université	Sorbonne	Paris-Cité, fma.houllier@gmail.com	✕
BaoGang	Hu	(CASIA),	hubaogang@gmail.com	✕
Marc	Jaeger	(Cirad),	marc.jaeger@cirad.fr	✕
MengZhen	Kang	(CASIA),	mengzhen.kang@ia.ac.cn	✕
Véronique	Letort	(ECP),	veronique.letort@mas.ecp.fr	✕
Amélie	Mathieu	(AgroParisTech),	amelie.mathieu@agroparistech.fr	✕
Hervé	Rey	(Cirad),	herve.rey@cirad.fr	✕
Sylvie	Sabatier	(Cirad),	sylvie-annabel.sabatier@cirad.fr	✕
Gérard	Subsol	(CNRS-Lirmm),	gerard.subsol@lirmm.fr	✕
Guo	Yan	(CAU),	yan.guo@cau.edu.cn	✕
BaoGui Zhang (CAU),	zhangbg@cau.edu.cn			✕

Contributeurs

Sélastique Akaffou, Jean-Marie Allirand, Daniel Auclair, Charlotte Baey, Jean-François Barczy, Yves Caraglio, Thierry Castel, Christian Cilas, Claire Chavaneau, Stéphane Chemouny, Michel Cognée, Évelyne Costes, Brigitte Courtois, Pascal Dabadie, Jean Dautat, QingQiong Deng, Jun Diao, Mickaël Dingkuhn, Pierre Dinouard, XiaoXue Dong, Claude Edelin, Éric Elguero, XingRong Fan, Lu Feng, Thierry Fourcaud, Dominique Fournier, Sébastien Griffon, Nicolas Janey, Tondjo Kodjo, Hua Jin, Alexandra Jullien, René Lecoustre, Vincent Le Chevalier, Sébastien Lemaire, Jonathan Leroux, Dong Li, YunTao Ma, Thomas Mangenet, Guy Mossu Natacha Motisi, Robert Nosenzo, Éric Nicolini, Jean-Paul Parvais, Didier Paulin, Rui Qi, Fabienne Ribeyre, Cyril Soler, Nicolas Szafran, Olivier Taugourdeau, Marie-Élodie Vavitsara, XiuJuan Wang, Bénédicte Wenden, Lin Wu, HongPing Yan, LiLi Yang, Xing Zhao, XiaoP