

1. Modèles de croissance de plante

1.1 Modèles de développement des plantes informatiques (Growth Models)

Les arbres informatiques couplent un algorithme d'organogénèse avec des règles géométriques de mise en place d'organes pré dimensionnés dans une structure tridimensionnelle. Les organes ne jouent ici qu'un rôle figuratif et le seul fonctionnement pris en compte est celui de l'organogénèse.

Il n'est pas besoin d'avoir des connaissances en botanique pour obtenir des maquettes 3D d'arbres réalistes. Il faut laisser suffisamment de points de contrôle sur les algorithmes du développement et de la géométrie du végétal à un « designer » pour qu'il puisse modeler une forme complexe avec une bonne esthétique. Des logiciels comme Onyx tree¹ ou Xfrog².en sont une belle démonstration. De toute façon, généralement la perception de l'homme ordinaire de ce qu'est un végétal est très en dessous de la réalité botanique et il est inutile de raffiner au-delà ... Le plus souvent c'est à la forme des feuilles ou des fleurs qu'une plante est reconnue et non pas à son architecture.

Dans le domaine de l'image de synthèse « *what is good is what looks good* » selon O. Deussen le développeur d'XFrog On est loin des exigences scientifiques de la réalité botanique. Par contre sur le plan informatique on peut parler de prouesses dans les améliorations du rendu des scènes végétales : des algorithmes ingénieux pour simuler le développement végétal, (Grammaires, Automates, fractals, lancé de particules) et de rendu (textures, radiosité, lancé de rayons) contribuent à fournir des scènes de plus en plus réalistes pour l'image de synthèse et le paysagisme. Les plantes virtuelles sont devenues les auxiliaires indispensables des projets d'aménagements autour de la simulation du bâti.

Deux exceptions notables des arbres informatiques sont le cas des L-system et le cas d'AMAP³ qui ont visé la qualité botanique des architectures de plantes simulées comme préalable à leur visualisation. On peut parler d'une sous classe botanique des arbres informatiques. En particulier l'organogénèse est simulée le plus exactement possible afin d'engendrer la structure topologique correspondante. Par contre l'habillage géométrique de cette structure utilise les mêmes algorithmes. Il s'agit ici de modéliser le fonctionnement des méristèmes et de simuler la production d'organes en relation par exemple avec le rendement. Les L-system se sont davantage focalisés sur la structure des inflorescences et AMAP sur la structure des arbres.

Les grammaires ou les automates stochastiques peuvent être calibrés à partir des données architecturales prélevées sur les plantes réelles, on obtient ainsi un modèle de développement entièrement dédié à la plante étudiée.

1.1.2 Modèles de croissance de plantes de l'agronomie. (Process Based Models)

En agronomie ce n'est pas la représentation géométrique de la plante qui compte, mais la production végétale de celle-ci au niveau du m².Le mètre carré de plante est ainsi divisé en compartiments qui regroupent les différents types d'organes (feuilles, tiges, fruits, racines) provenant du mélange de plantes considérées. On parle de source en ce qui concerne les feuilles productrices de biomasse et de puits pour les autres organes attracteurs de biomasse (y compris les feuilles). La croissance peut être abordée comme un problème de relation source puits c'est-à-dire de production et d'allocation de biomasse dans les différents compartiments.

¹ 3D and 2D vegetation modeling program.

² Xfrog is a procedural organic 3D modeller that allows you to create and animate 3d trees, flowers, nature based special effects or architectural forms

³ botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétation.

Les paramètres environnementaux principaux (en supposant la plante non stressée hydriquement) sont la température et la lumière. Tant qu'elle reste dans la plage de réponse linéaire, la température agit essentiellement sur la vitesse de développement des plantes (Bonhomme, 2000).

La lumière agit de deux façons :

- L'intensité utile perçue par la plante (PAR). Seule une partie de la radiation solaire est utilisée par la photosynthèse.
- La quantité de lumière interceptée par m². Les feuilles sont des capteurs étalés au-dessus de la surface du sol. L'indice foliaire (LAI) est la somme des surfaces de feuilles par mètre carré de sol. La production de biomasse /m² sature rapidement à partir du moment où l'interception de lumière par les feuilles atteint un maximum, ce qui arrive pratiquement à partir de LAI=4. Il ne sert plus à rien à partir de ce seuil d'augmenter la densité de plantation (Jones 1992).

Le taux de production/m² est donné par l'équation :

$$Q = LUE \cdot PAR \cdot (1 - e^{-k \cdot LAI}) \quad (\text{Monsi, 1953})$$

Le paramètre LUE est l'efficacité de la lumière pour convertir l'énergie en biomasse,

le paramètre k est lié à l'orientation des feuilles et en général est voisin de 0.8 (de Reffye, 2008).

En été le PAR peut avoisiner 8 MJ/j/m² et la LUE 30g Mf/m²/j. Ce qui fait que l'on peut produire un peu plus de 200 g de matière fraîche/m²/jour. Le formalisme robuste de l'effet du LAI sur l'interception de la lumière est celui de la loi dite de Beer-Lambert (Monsi, 1953).

Les modèles de croissance sont très utilisés. Leur qualité principale est la robustesse de la relation biomasse-énergie reçue par le couvert qui repose sur le fait que l'on peut considérer la photosynthèse nette (coût de respiration déduit) et qui repose également sur une notion de pool commun des réserves qui alimentent les compartiments selon une règle de puits proportionnels. La simplicité de leur formulation rend leur calibration possible.

L'inconvénient est qu'ils ne suivent pas la phénologie de la plante, c'est-à-dire les changements progressifs du fonctionnement dus entre autres à des modifications de la morphogénèse. La qualité de prédiction de ces modèles diminue quand les données de l'environnement changent. Par exemple si on change la densité de plantation la production au m² ne changera pas à partir d'un certain niveau de LAI, mais cela recouvrira des architectures de plantes très différentes avec des changements phénologiques importants qui modifient les proportions allouées aux compartiments.

La principale cause du manque de qualité de prédiction en environnement variable est reconnue comme l'absence de prise en compte de l'architecture de la plante et des feed-back entre l'organogénèse et la photosynthèse (de Reffye2003).

1.1.3 Modèles structure-fonction (Functional Structural Process Models)

Pour pallier aux inconvénients des PBM, les agronomes et les informaticiens ont créé les modèles structures fonctions qui consistent à donner aux organes mis en place par les méristèmes un rôle fonctionnel. On se place dans la classe botanique des arbres informatiques.

Pour autant les modèles structure-fonction n'ont pas essayé de rivaliser avec les PBMs dans le domaine de la production végétale, mais plutôt se sont concentrés sur le fonctionnement physiologique détaillé de l'individu plante. La structure topologique issue du développement permet d'interconnecter les organes

entre eux et la structure géométrique par le biais des maillages, permet de calculer l'interception de la lumière par chaque feuille et de faire circuler les sèves brute et élaborée dans le réseau ramifié de l'architecture de la plante. Toutes les simplifications validées et utilisées dans les PBMs sont ignorées dans les FSPMs ou l'objectif est le recours à tout simuler dans le détail en concentrant un maximum de connaissances (Marcelis 1998) :

1. L'interception de la lumière sera simulée par des logiciels de transferts radiatifs opérant sur la maquette 3D maillée par des polygones.
2. La photosynthèse sera simulée au niveau de chaque feuille compte tenu de son microclimat.
3. un modèle transport-résistance diffuse selon un pas de temps et un gradient physiologique, la matière produite par les organes sources aux organes puits en utilisant le réseau des branches maillé en éléments finis.
4. les coûts de la respiration (transport, entretien) sont évalués, ils diminuent d'autant l'assimilation par la structure de la matière produite par les feuilles.

Toutes ces opérations sont coûteuses en temps et en mémoire dès que l'on monte à l'échelle d'un arbre qui produit des milliers voire des centaines de milliers d'éléments. Le temps de calcul du développement de la plante est proportionnel au nombre d'éléments à mettre en place auquel il faut ajouter le temps de calcul de la croissance. Se pose alors le problème de la fiabilité de la simulation elle-même, qu'il est difficile voire impossible de calibrer sur des fonctions mathématiques. Ces simulations sont sans preuves au sens informatique du terme.

La dérivation du code est généralement impossible, ce qui empêche la résolution des problèmes inverses, l'optimisation et le contrôle de s'appuyer sur des algorithmes mathématiques efficaces et il faut recourir aux méthodes heuristiques qui obligent à lancer des milliers de fois le calcul de la plante.

Les codes des FSPMs apparaissent davantage donc comme des outils de capitalisation des connaissances et sont utiles en tant que tels à l'enseignement par exemple, plutôt que comme des nouveaux outils utilisables en Agronomie.

Bonhomme R. 2000. Review: bases and limits to using « degree.day » units. European journal of agronomy 13 : 1-10.

Marcelis LFM, Heuvelink E, Goudriaan j. 1998. Modeling biomass production and yield of orthicultural crops; a review. Scientia horticultrae. 74 (1/2), 83-111.

2. Simulation

Quand le modèle a été établi on peut le programmer dans un ordinateur afin de le simuler. On peut ainsi obtenir rapidement des sorties du modèle en fonction des valeurs de ses paramètres d'entrée. Cela permet d'étudier le comportement du modèle, sa robustesse et sa sensibilité afin d'éprouver notre propre connaissance (Jorgensen, 1994).

Ce tour d'horizon nous montre différentes tendances dans le domaine de la simulation de l'architecture des plantes. Chacune des approches présentées offre des avantages et des inconvénients.

Les simulateurs purement géométriques permettent d'obtenir des formes végétales dont le réalisme est obtenu au travers des outils de l'image de synthèse (textures, shading...) mais dont l'organisation au sein de l'architecture n'est pas forcément conforme aux lois de la botanique. Certains présentent une interface de modelage très ergonomique et intuitive, d'autres offre la possibilité d'inclure de la connaissance supplémentaire et tous proposent plusieurs formats de sortie propres à assurer l'interface avec des logiciels d'image de synthèse. En aucun cas leurs sorties ne sont prévues pour être utilisées dans un cadre d'application agronomique.

Les simulateurs qui proposent une approche botanique permettent de produire des maquettes de plantes possédant une caution scientifique et donc peuvent non seulement produire des maquettes à l'usage de la visualisation mais également s'inclure dans des applications qui requièrent des plantes virtuelles réalistes. Leur programmation est destinée à des spécialistes connaissant les plantes et nécessite éventuellement une bonne connaissance de la programmation informatique dans le cas des simulateurs basés sur les L-system. On a affaire à des systèmes fermés de type Amap ou bien des architectures ouvertes de type GroImp.

Les simulateurs qui incluent de la connaissance écophysologique mêlent les aspects développement avec le fonctionnement, ils permettent de calculer la biomasse produite par la photosynthèse et de la répartir dans l'architecture simulée. Certains permettent de simuler une rétroaction de la photosynthèse sur le développement de la plante. D'une manière générale leur calibration se révèle difficile voire impossible. Certains sont spécialisés dans la simulation d'une espèce particulière, d'autres proposent une approche plus générale mais sont organisés en architecture fermée et les autres ne proposent pas de formalisme préformaté pour la description générique d'une architecture végétale. De plus, les choix qui sont effectués au niveau des modèles de production et de partage des assimilats diffèrent d'un simulateur à l'autre sans qu'on puisse à priori retenir l'un plutôt que l'autre.

2.1. Simulateurs de plante

Nous donnons ici un panorama général des différentes classes de simulateurs de plante qui proposent en sortie une apparence géométrique de la simulation et donc une description individuelle des organes qui la composent. Nous mettons volontairement de côté les simulateurs de type purement agronomique (appelés en anglais Process Based Model) qui, s'ils peuvent fournir des résultats très précis en termes de production de biomasse, occultent l'aspect architectural de l'organisation végétale.

Nous avons classé ces simulateurs en trois catégories qui s'approchent de plus en plus de représentations botaniquement correctes et qui intègrent de plus en plus de connaissance écophysologique. Dans chacune de ces classes nous avons choisi de décrire quelques simulateurs représentatifs.

2.1.1. Simulateurs géométriques

OnyxTree (Bosanac et Zanchi, 2002)

Ce logiciel est orienté pour des applications de type image de synthèse. Il propose la modélisation très intuitive par catégories de plante (feuillus, conifères, bambous, fleurs) et pour chacune d'elle permet de régler l'apparence de la plante par ordre de ramification. L'approche en est essentiellement géométrique et fait peu de place à l'organisation. Les notions de pousse, d'acrotonie ou de mélange n'y sont pas abordées, restreignant d'autant le champ d'application du simulateur. Pour finir, la modélisation est effectuée pour un âge donné, empêchant ainsi toute idée de croissance. Le logiciel est commercialisé avec une base de données de quelques centaines de plantes dont l'apparence satisfait les utilisateurs qui ne sont pas attachés au détail botanique.



Figure 1. Exemples d'arbres produits par OnyxTree.

XFrog (Deussen 2003)

Basé sur le formalisme L-System, il permet de modéliser quasiment n'importe quelle espèce de plante mais malheureusement se base essentiellement sur la géométrie et propose peu d'outils basés sur la connaissance biologique des plantes. L'outil, d'après ses créateurs, demande un fort niveau d'utilisation pour produire une plante même très simple.



Figure 2. Exemples d'arbres produits par XFrog.

2.1.2. Simulateurs botaniques

Amap (de Reffye, 1988)

Issu du laboratoire éponyme du Cirad, ce modèle repose sur une approche relativement similaire à celle proposée par OnyxTree. Par contre, la composante botanique y est plus présente et la notion de croissance y est abordée en tant que paramètre du simulateur. Les sorties de ce modèle sont validées d'un point de vue botanique. Deux versions du modèle de croissance ont été créées. La première a été développée par M. Jaeger et implémente stricto sensu la connaissance botanique proposée par Hallé, 1970 et améliorée par de Reffye, 1979. Ses applications résident essentiellement dans l'image de synthèse, une suite de logiciels permettent de mettre en scène les maquettes produites par la simulation et proposent un outil dédié au paysagisme. L'ensemble de ces outils a été externalisé dans une société à but commercial nommée Bionatics. Une seconde version du modèle a été développée dans le cadre de la thèse de F. Blaise (1991). Cette version possède la particularité de simuler un pseudo-parallélisme du fonctionnement des méristèmes de la plante (ce qui n'était pas le cas de la première version pour des considérations de performance). Cet aménagement a permis de mettre en place les premiers essais d'interaction entre la géométrie et la topologie de la plante ou entre la plante et son environnement.



Figure 3. Exemples d'arbres produits par Amap.

GroImp (Kniemayer, 2004)

Issu du laboratoire de foresterie de Göttingen, ce simulateur étend le modèle de croissance de plantes proposé par Prusinkiewicz. Le moteur de croissance est basé sur un formalisme de type L-system qui a été progressivement enrichi de fonctions adaptées à la simulation de la croissance des plantes. En particulier les notions de Relational Growth Grammar et Sensitive Growth Grammar offrent un cadre formel très puissant pour tester dynamiquement des hypothèses concernant la simulation de la croissance des plantes tant au niveau topologique que géométrique ou bien fonctionnel. En particulier, cet environnement propose des fonctionnalités dédiées à la description en mode « objet » des blocs fonctionnels d'un modèle. Nous avons ici affaire à un environnement qui relève plus du domaine des langages de programmation que de la simulation de la croissance des plantes en tant que telle.

Par défaut aucun modèle de plante n'existe dans cet environnement. Le modélisateur doit tout d'abord écrire les règles du modèle de croissance qu'il veut tester pour ensuite le paramétrer avant de le simuler.



Figure 4. Exemples d'arbres produits par GroImp.

2.1.3. Simulateurs écophysologiques

La production végétale est le résultat final du processus de croissance de la plante, et l'optimisation de sa valeur économique est le but de la recherche agronomique. La récolte utile concernera différents organes selon l'espèce considérée : feuilles, fruits, racines, tubercules, tiges, troncs qui sont autant de récoltes partielles et spécialisées, prélevées sur l'architecture de la plante. Le but des itinéraires culturaux et de la sélection est d'optimiser sur une espèce donnée la production de l'organe végétal utile, en quantité, mais également en qualité. Un même poids de récolte peut correspondre à des nombres d'organes variables associés à des calibres différents qui donneront autant de valeurs économiques. Si l'on disposait d'un modèle de croissance et d'architecture fiable, où toute la structure géométrique serait décrite avec tous les organes selon leurs volumes et leurs poids, la production serait exactement connue. Tout le problème consiste donc à savoir si un tel modèle est nécessaire et s'il est possible de l'obtenir théoriquement.

Dans un premier temps les agronomes ont, à l'instar des informaticiens, préféré contourner la difficulté en créant des modèles empiriques, qui par calibration sur des observations globales de la plante (nombre d'organes, poids, surface foliaire,...) donnent une cinétique de la croissance en fonction des paramètres de l'environnement (lumière, température, ...).

Ici les organes ne jouent aucun rôle individuellement mais sont rassemblés

en compartiments qui deviennent sources (surface foliaire) et puits (feuilles, tiges, fruits, racines). L'organogenèse et la photosynthèse ne sont pas couplées bien qu'elles progressent ensemble (figure 5).

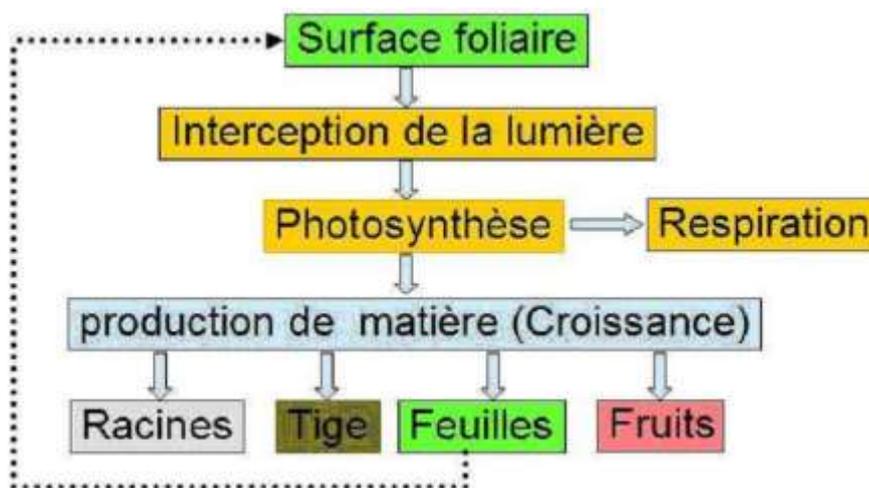


Figure 5. Principes de la simulation de la production végétale chez les modèles agronomiques (Heuvelink, 2004)

En conditions expérimentales contrôlées ces modèles peuvent donner de bons résultats dans le suivi de la production, grâce à la connaissance physiologique du fonctionnement végétal qu'ils intègrent, bien que l'architecture comme support du fonctionnement soit ignorée. Le pas de temps pour intégrer les paramètres de l'environnement est souvent court, de l'ordre de l'heure, ce qui peut donner lieu à de nombreuses itérations sur un cycle cultural. La photosynthèse est calculée par une estimation de l'interception de la lumière par la surface foliaire. La matière produite, respiration végétale déduite, est alors distribuée dans les compartiments qui rassemblent les organes produits par catégories. Ici, c'est la connaissance physiologique qui prime avec la mise en œuvre des lois simples et empiriques directement mesurées par des régressions statistiques sur les données expérimentales. Les programmes informatiques qui simulent la production végétale, sont donc de facture simple sans formalisme particulier et à la portée des chercheurs non mathématiciens ou informaticiens. De Ceres pour le maïs (1986), jusqu'à Tomsim (2000) pour la tomate, de nombreux logiciels spécifiques basés sur ce principe ont ainsi vu le jour. Mais leur limitation est vite apparue par leur incapacité de suivre convenablement la phénologie de la plante et sa plasticité : c'est-à-dire l'évolution du fonctionnement architectural qui change progressivement dans son organogenèse et ses relations sources puits, avec des modifications importantes de la forme et de la dimension des organes. C'est pourquoi les agronomes après avoir exploré les limites de l'approche empirique des modèles de production se tournent de plus en plus vers des modèles qui intègrent l'architecture en tant que support du fonctionnement.

Aujourd'hui, les recherches s'orientent principalement vers des modèles qui prennent en compte le couplage de l'organogenèse et de la photosynthèse, en faisant fonctionner l'architecture et en donnant aux organes (bourgeons, feuilles, entre-nœuds, fruits, racines) leurs véritables rôles fonctionnels. De tels modèles qui sont une réunion des modèles architecturaux de l'informatique et des modèles fonctionnels de l'agronomie ont reçu le qualificatif de « structure-fonction » (Figure 6) (Sievanen, 2000).

Mais il apparaît des écueils importants dès que l'on considère des architectures complexes comme celles des arbres :

- La fusion et la synthèse des connaissances nécessitent une coopération pluridisciplinaire car aucune des sciences en présence (Botanique, Agronomie, Informatique, Mathématiques) ne possède l'ensemble des compétences nécessaires pour la réaliser toute seule. Comment adapter de façon pertinente les acquis des différentes disciplines pour les faire cohabiter dans un même modèle ?

- Comment vont se comporter les modèles structure-fonction si à la lourdeur des calculs liés au fonctionnement de l'organogenèse, on ajoute celle des relations sources-puits qui créent et distribuent la matière dans l'architecture à chaque pas de temps ?
- Comment parvenir à des simplifications pertinentes de façon à obtenir un modèle général avec un nombre réduit de paramètres, et ainsi pouvoir calibrer celui-ci sur les données expérimentales ?
- Finalement, quel formalisme adapter pour décrire de tels systèmes complexes et surtout pour les analyser ?

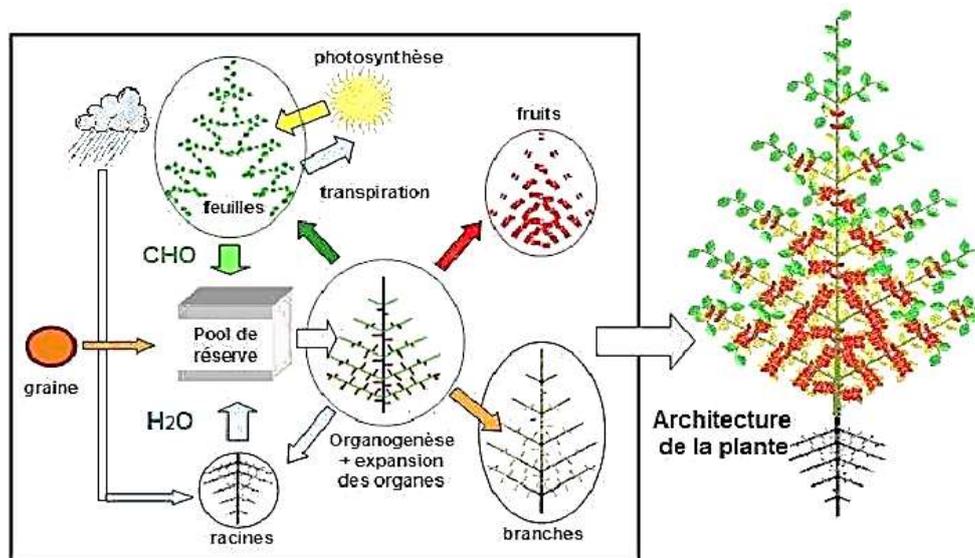


Figure 6. Principes de la simulation de la morphogénèse des plantes chez les modèles structure-fonction (deReffye, 2008)

Vica (Wernecke 2000)

Ce simulateur est très fortement orienté vers une programmation de type objet. Il propose une structure d'objets principaux qui permettent une description structurée de la plante. Chacun de ces objets possède des attributs qui lui sont propres et qui permettent d'une part de décrire leur géométrie et d'autre part leur capacité à produire de la matière et à l'échanger avec les autres objets décrivant la plante.

Les attributs décrivant la géométrie sont des triangles positionnés dans l'espace selon des règles empiriques. La cinématique d'apparition des éléments peut être contrôlée par le fonctionnement physiologique de la plante et leur âge compté en somme de température par unité de temps. Chaque objet de plante possède de plus des propriétés optiques qui permettront le calcul de la photosynthèse.

Les attributs décrivant les propriétés physiologiques concernent d'une part la capacité de l'élément à produire de la matière (photosynthèse) et d'autre part à séquestrer, consommer ou bien transmettre cette matière aux autres éléments de la plante. La matière détenue par chaque élément peut être séparée en plusieurs catégories qui auront chacune leurs propriétés de production, séquestration et transmission. On peut ainsi séparer les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau.

La photosynthèse est basée sur le principe d'efficacité de la lumière, des algorithmes de transfert radiatifs sont proposés pour calculer la quantité de lumière interceptée par chaque triangle de la plante (Ross and Marshak 1991 ; Soler et al.2003 ; Andrieu et al.1997 ; Jacquemoud et al. 1996).

Ce simulateur a été essentiellement utilisé pour des applications sur des graminées. Un organe virtuel a été programmé dans cet environnement pour tester sa capacité de production en fonction de différentes

conditions climatiques de température et d'apport en azote. La plante est divisée en trois classes d'objets (tige, feuille, racine). La géométrie des éléments de la plante est fixée selon des mesures expérimentales pour les feuilles (on découple donc la dimension des feuilles de la quantité de matière qu'elles reçoivent !) et selon une loi dépendante de l'âge pour la tige. Le système racinaire ne possède pas de géométrie. La vitesse d'apparition des organes est contrôlée par le tempsthermique, le nombre d'épis est couplé à la masse en carbone des organes. Les paramètres physiologiques de production, consommation, transmission sont les mêmes pour tous les objets d'une même classe. Les lois d'échange sont dédiées entre les différents types d'organes. Ce modèle simplifié a pu être calibré sur des données de terrain par méthode d'inversion.

Le modèle Vica semble très souple pour ce qui concerne la définition des modalités de production et de partage des différents flux à l'intérieur de la plante. On peut cependant imaginer que la généricité du modèle Vica de base place la responsabilité de la définition de la géométrie et de la calibration des paramètres retenus sous la responsabilité du modélisateur.

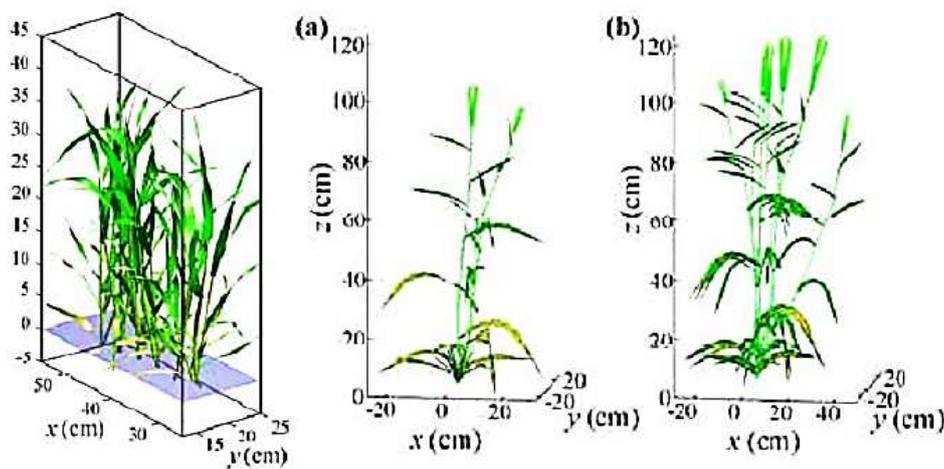


Figure 7. Exemples de plantes produites par VICA.

DigiPlante (Cournède et al.2006)

Ce simulateur est basé sur le modèle GreenLab (Yan 2004) et propose une approche générale qui inclut tant l'aspect architectural qu'écophysologique. Il propose de plus un outil de calibration des paramètres qui contrôlent la production et la répartition de la matière. Le modèle mélange d'une part un formalisme de représentation du développement de la plante par un automate dont le changement d'état est réglé par une distribution discrète de phases type (Neuts, 1975) et d'autre part un modèle de photosynthèse/allocation qui permet de calculer la dimension des organes et éventuellement interagir avec leur nombre.

GreenLab décrit l'organogenèse à l'aide d'un système d'automates à double échelle, déterministe ou stochastique. Celui-ci contrôle, à partir des bourgeons, la fabrication des unités de croissance et des phytomères qui les composent. Les états de cet automate qui représentent l'âge physiologique caractérisent les UC (macro-état) et les phytomères (microétats) comme décrit dans Zhao 2001. Chaque état contient tous les renseignements de types fonctionnels ou géométriques pour créer l'élément botanique correspondant. Un bourgeon peut rester dans un même état selon une loi d'occupation ou changer d'état (métamorphose) selon une loi de transition. Il met en place des phytomères avec leurs bourgeons axillaires d'âges physiologiques différents qui correspondent à autant de transitions selon les règles botaniques observées. Le formalisme des relations entre états dans GreenLab est typiquement celui

des chaînes de « Markov ». Dans un but de simplicité, certains phénomènes botaniques tels que le polycyclisme ou bien la dynamique de démarrage des axes ne sont pas pris en compte (figure 8).

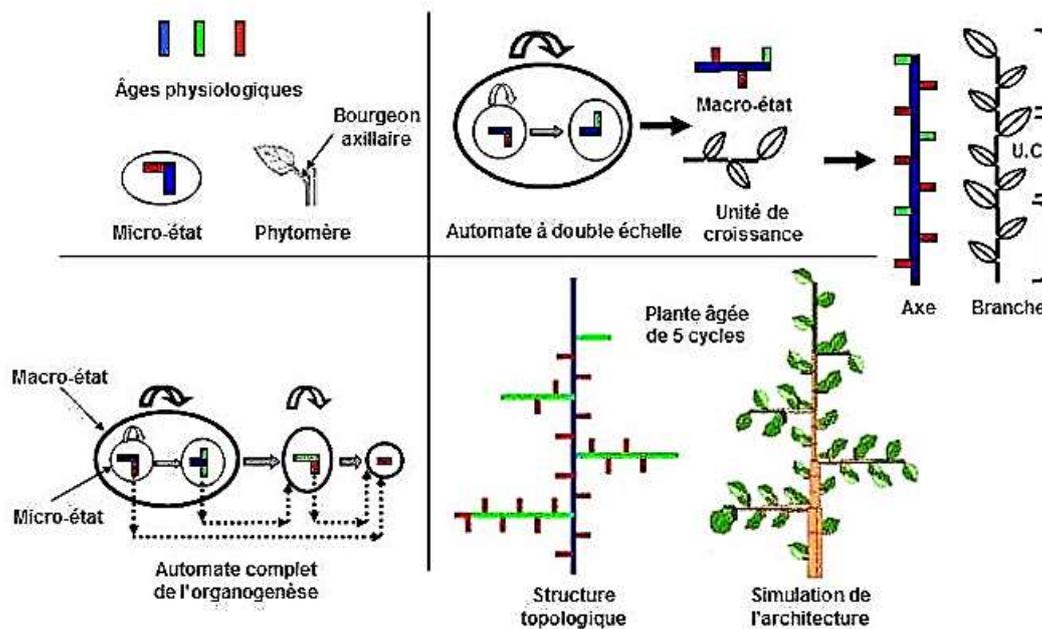


Figure 8. Modélisation de l'organogénèse dans GreenLab : automate et âge physiologique. (Zhao, 2001)

GreenLab propose un modèle de photosynthèse basé sur le principe d'efficacité de la lumière et simule l'interception du rayonnement atténué dans une canopée par analogie avec la loi de Beer Lambert (Monsi, 1953). Le partage de la matière fabriquée est effectué à partir d'un pool commun selon une règle de proportionnalité entre les différentes valeurs de puits affectées aux organes de la plante. Ceux-ci sont de quatre natures : feuilles, bois, racines et bourgeons. Les feuilles produisent de la matière, leur surface est proportionnelle à leur masse. Le bois peut accumuler de la matière dans son cœur puis dans ses cernes, le rapport diamètre/longueur des éléments de branche est déterminé selon une loi empirique. Les racines sont présentes uniquement en tant que puits. Les bourgeons captent de la matière mais ne peuvent produire une pousse que s'ils en ont accumulé suffisamment selon un seuil. Le nombre d'organes produits dépendra également de la quantité de matière accumulée (Matthieu 2006). L'ensemble de la matière produite est entièrement consommée entre chaque cycle, le modèle ne considère ni la respiration d'entretien ni la mobilisation/relâchement de matière par le bois de la plante. On peut cependant reproduire une croissance rythmique ou bien l'apparition de réitération uniquement par réglage des paramètres écophysologiques. Quand l'automate a une production sûre, c'est-à-dire quand ses probabilités de réalisation valent 1 ou 0, on peut calculer le nombre d'organes présent dans la plante et leur masse respective à tout moment sans le simuler. Si l'automate n'est pas à réalisation sûre, on peut alors prédire la moyenne et la variance de sa production tant en nombre d'organes qu'en masse de ceux-ci. Cette capacité de calcul analytique provient de « bonnes » propriétés de la formulation du modèle qui permettent de l'exprimer sous forme d'équations récurrentes.

Contrairement aux autres modèles implémentés par les simulateurs de la classe FSPM, GreenLab reprend à son compte les choix des Process Based Model pour exprimer le Figure 8. Modélisation de l'organogénèse dans GreenLab : automate et âge physiologique.(Zhao, 2001) fonctionnement (pool commun, interception de la lumière utilisant la loi de Beer...). La construction géométrique de la plante n'est pas nécessaire dans ce simulateur.

DigiPlante propose une interface conviviale de saisie de ses paramètres et propose également des outils pour leur calibration. Cependant le système est totalement fermé et contraint l'utilisateur à globalement accepter ou bien refuser les composantes du modèle qu'il implémente.



Figure 9. Exemples de plantes produites par DigiPlante.

Lignum (Perttunen, 2001)

Ce simulateur a été développé pour des applications aux espèces forestières cultivées dans les forêts du nord de l'Europe. Son architecture a été adaptée et paramétrée pour différentes espèces telles que le pin sylvestre, l'érable à sucre ou le pin noir. Un modèle de photosynthèse basé sur l'interception lumineuse permet de calculer la production de biomasse au pas annuel. Une balance du carbone est calculée qui inclut la production, la respiration, l'accroissement et la sénescence des feuilles, éléments de branche et racines. La répartition de matière est effectuée selon le modèle de Makela, 1997 qui propose un pool commun de production des feuilles diminué de leur respiration d'entretien. Ce pool commun est partagé entre tous les éléments de la plante selon une proportion de puits. Chaque élément possède également une perte de masse par mortalité cellulaire. Le rapport diamètre/longueur des éléments de branche est ajusté selon le modèle de Shinozaki (Shinozaki et al 1964). Le moteur de croissance est basé sur un formalisme à base de L-system qui permet d'empiler des éléments de plantes selon les règles fournies à l'interpréteur. Chaque élément de plante est composé d'un segment portant éventuellement une feuille et des bourgeons axillaires. Ces éléments sont placés dans l'espace selon des règles géométriques empiriques. La description de l'arbre est très structurée et permet grâce au formalisme L-system d'inclure des traitements spécifiques pour décrire les interactions entre son développement et sa physiologie ou sa géométrie.

L'environnement de simulation propose donc une description structurée d'arbre sur laquelle un ensemble de traitements de simulation de la photosynthèse et de l'allocation est prévu. Le développement de la plante est effectué grâce à l'interprétation d'un jeu de règles de type L-system qui mettent en place des éléments de plante tant au niveau topologique que géométrique. Ce formalisme permet d'étendre un noyau de simulation à des applications spécifiques qui permettent d'affiner les modalités de croissance. Le défaut de cette approche est que l'utilisateur doit écrire les règles puis donner les valeurs à leurs paramètres pour décrire une espèce particulière. De ce fait, à notre connaissance, un nombre restreint d'espèces a pu être décrit.

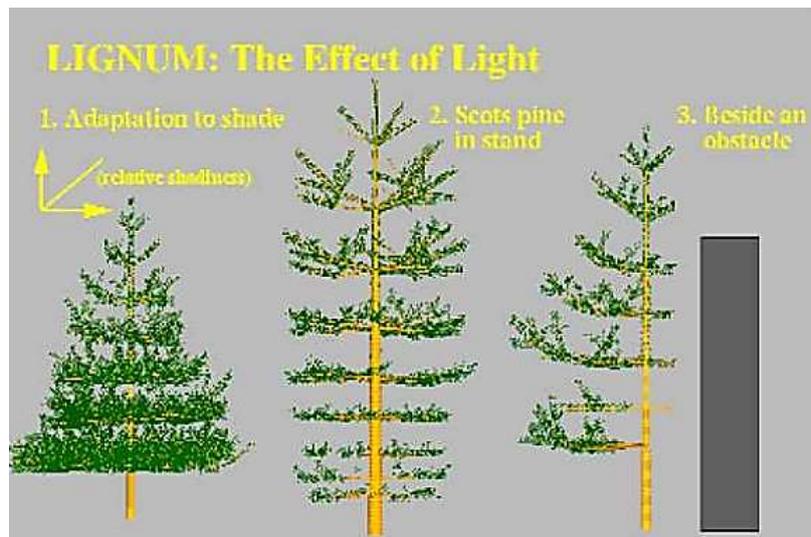


Figure 10. Simulation du pin sylvestre par Lignum.

L-peach (Allen, 2004)

Ce simulateur est entièrement dédié à la simulation de l'architecture et de la production de fruits du pêcher. Il s'appuie sur un formalisme Open L-system (Mech, 1996) et décrit une architecture qui ressemble géométriquement au pêcher mais qui manque de finesse quant aux détails botaniques de cette espèce (absence de polycyclisme, pas de développement anticipé, nombre de feuilles grossièrement approximé...). Il propose un modèle de photosynthèse, de respiration d'entretien et de partage de la production d'assimilats. La production de biomasse est asservie d'une part à l'interception de la lumière et d'autre part à la disponibilité en eau (au travers d'une masse de racines). Le partage des ressources est effectué selon un équilibre source-puits-résistances. Le modèle prévoit la réaction du développement aux balances source-puits. En particulier, il permet l'abscission quand l'offre est trop faible, la préparation du stock des entre-nœuds préformés et la fabrication des entrenœuds néoformés quand l'offre est suffisante. De plus le bois est capable de stocker de la biomasse qu'il libère à de 6 moments choisis par l'utilisateur. On a donc affaire à un réel simulateur FSPM qui mêle les interactions entre croissance et fonctionnement. Cependant il est entièrement dédié au pêcher et la calibration de ses paramètres est effectuée manuellement



Figure 11. Simulations du pêcher par L_peach.

Cotons (Jallas 2003)

Ce simulateur est basé sur le modèle GOSSYM (Baker 1989). Il est entièrement dédié à la simulation de la culture du cotonnier en plantation. Il prend en compte tant des aspects architecturaux

qu'écophysiologiques qu'agronomiques que pédologiques ou que phytosanitaires. Il intègre une connaissance très pointue de cette espèce et est utilisé dans le cadre d'applications agronomiques. Plusieurs modèles simulant l'organogénèse, la photosynthèse et la géométrie sont interconnectés. Nous avons affaire ici à un exemple type de simulateur qui intègre de la connaissance dans un but précis et dont on peut difficilement imaginer de l'appliquer facilement à d'autres espèces.



Figure 12. Croissance de cotonnier par Cotons.

Quelle est la différence entre modélisation et simulation?

La modélisation consiste à essayer d'expliquer des résultats concrets par un ensemble d'équations logiques, c'est à dire mettre en équation un phénomène connu et mesurable.

La simulation consiste à prédire à partir des équations déjà connues des résultats inconnus.

La différence est là : on modélise ce que l'on mesure, on simule ce que l'on ne peut ou veut pas mesurer. Les interactions entre modélisation et simulation sont très fortes. la modélisation d'un phénomène fournit des équations qui sont utilisés pour simuler des phénomènes éventuels ressemblant a ceux de départs.