

Une gestion forestière virtuelle ?

« Arbres et paysages virtuels », « gestion digitale des forêts » : s'agit-il là d'oxymores, de gadgets ou de rêves de geeks ? ou bien d'outils et de services destinés aux forestiers, aux industriels ou aux citoyens ? C'est parce que les arbres sont des organismes complexes et longévifs qu'il est utile de disposer de méthodes numériques pour prédire leur développement en fonction de leur environnement biologique ou physique, ou pour visualiser en 3D la structure interne de leur tronc afin, par exemple, d'optimiser le débit au sciage. C'est aussi parce que la sylviculture ou l'aménagement ont des effets multiples et différés qu'il est précieux de pouvoir simuler le devenir d'un peuplement ou d'un paysage en fonction de la gestion forestière.

Qu'est-ce qu'un arbre, un peuplement forestier ou un paysage virtuel ?

Dès le 18^e siècle, les dendrométriciens (voir fiche 8.07) se sont attachés à estimer le volume des arbres et des peuplements forestiers à partir de la mesure de leur diamètre, de leur circonférence ou leur hauteur. Ils ont aussi cherché à décrire et prédire leur croissance et leur production en fonction de leur espèce et de leur âge, de la sylviculture pratiquée et des conditions écologiques (sol, climat, ...) ou, plus tard, de leur génotype. Ils ont ainsi créé des outils qui ont été progressivement perfectionnés au fil de l'évolution des connaissances et des technologies : les « tarifs de cubage » et les « tables de production » en sont les exemples classiques les plus connus.

Au début, les données étaient peu nombreuses et les méthodes employées étaient essentiellement graphiques. Dans la seconde moitié du 20^e siècle et depuis le début du 21^e siècle, la situation a progressivement et profondément évolué.

D'une part, les données se sont diversifiées et massifiées : par exemple, la photographie aérienne, la télédétection ou aujourd'hui le « lidar » (acronyme de l'expression anglaise « light detection and ranging » ou « laser detection and ranging », le « lidar » désigne une technique de détection et d'estimation de la distance par la lumière ou par laser, fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur ; voir fiches 1.10 et 7/03 et <http://computree.onf.fr>) génèrent des images à haute densité et à haute fréquence des forêts (Fig. 1) qui permettent de caractériser leur composition, leur structure et leur géométrie et d'obtenir ainsi un grand nombre de variables d'intérêt qui n'étaient pas faciles à obtenir ; la tomographie et les scanners fournissent aussi des données fines sur la structure interne des troncs (Fig. 2). Nous disposons ainsi d'outils numériques pour représenter les forêts, depuis l'anatomie des arbres jusqu'au panorama d'un grand paysage.



Figure 1. *Numérisation de placettes de l'Inventaire forestier national par Lidar terrestre et reconstitution algorithmique de la géométrie des arbres d'une placette pour l'estimation du volume total aérien des ressources forestières.* Source : d'après Hervé et al. 2016. Evaluation des ressources forestières pour la bioéconomie : quels nouveaux besoins et comment y répondre ? Innovations Agronomiques, 56 : 71-80).



Figure 2. Reconstruction tridimensionnelle et visualisation d'un quartier de grume d'épicéa scannée. Source : projet européen FAIR CT 96 – 1915: STUD – Marc Jaeger [Cirad] et Jean-Michel Leban [Inra] (2000).

D'autre part, des approches de plus en plus puissantes de modélisation ont été développées en faisant appel aux statistiques, aux mathématiques appliquées et à l'informatique (voir : i) Houllier, Bouchon et Birot, 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Revue forestière française*, XLIII (2) : 87-108 ; ii) Houllier F. 2001. Modélisation de la production ligneuse et des paysages : des technologies nouvelles pour l'évaluation des ressources forestières. *Revue forestière française*, LIII (3-4) : 423-432.)

Simultanément, la finesse, le nombre et la complexité des mécanismes pris en compte se sont aussi accrus : on sait aujourd'hui modéliser — au moins jusqu'à un certain point — l'architecture, la biomécanique ou la physiologie des arbres aussi bien que la dynamique de peuplements irréguliers et mélangés.

Dès les années 1990 et plus encore depuis 2000, ces nouveaux modèles ont conduit à parler d'arbre, de peuplement ou de paysage « virtuel » ; les adjectifs « digital » ou « numérique » sont aussi utilisés et rendent compte de la place de l'informatique dans ces nouveaux modèles. Au-delà de la grande diversité des modèles sous-jacents, les arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels partagent, à des degrés variés, quelques caractéristiques communes.

En premier lieu, ils fournissent des capacités de visualisation à plusieurs échelles : représentation tridimensionnelle de la silhouette d'un arbre ou, plus finement, de son architecture ; exploration de sa structure interne, de l'empilement des cernes, des nœuds ou d'autres défauts ; simulation d'un couvert forestier depuis un bouquet d'arbres jusqu'à une scène de plusieurs centaines d'hectares ; possibilité de modifier le niveau de détail visualisé, de changer de point de vue, de simuler le parcours d'un promeneur en forêt ou des paysages du passé (Fig. 3).



Figure 3. Simulation de paysages avec les logiciels issus d'AMAP : ci-dessus, paysage fonctionnel ; ci-contre, paléopaysage (image calculée par R. Lecoustre) - Source : de Reffye et al. 2009, https://interstices.info/jcms/c_38032/

En second lieu, ces modèles offrent aux utilisateurs des possibilités d'interaction dynamique à différentes échelles : simulation du débit d'une grume et de la qualité des produits dérivés ; élagage ou éclaircie d'un peuplement et prédiction de sa réponse ; dynamique à court et long terme d'un paysage en fonction des choix d'aménagement. Il est ainsi possible de représenter les effets et impacts des décisions ou des événements simulés.

A quoi les forêts virtuelles servent-elles ?

Les arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels sont d'abord des outils pour explorer ces systèmes complexes et en approfondir la compréhension.

Les modèles d'architecture des plantes, notamment des arbres forestiers (voir fiche 2.08), synthétisent ainsi les connaissances botaniques sur leur développement : les séquences d'événements qui caractérisent le fonctionnement des méristèmes (élongation des tiges, ramification, floraison, ...) sont modélisées par des méthodes probabilistes et statistiques ; la simulation informatique permet de représenter la topologie et la géométrie d'un arbre en fonction de son stade de développement, et de générer une maquette tridimensionnelle qui peut ensuite être manipulée.

De tels modèles peuvent aussi intégrer des connaissances sur les interactions de l'arbre avec son environnement (interception de la lumière, compétition pour l'espace, ...) et sur son fonctionnement écophysio-physiologique (transpiration, photosynthèse, croissance secondaire, ...) ou biomécanique (Fig. 4). Le modèle repose alors sur un véritable dialogue entre la structure et la fonction de l'arbre, entre son développement propre et son environnement. Un exemple récent est présenté par Eloy et al (2017) qui ont simulé l'évolution d'une forêt pendant plus de 200 000 ans afin d'expliquer comment la forme des arbres a pu émerger au cours de l'évolution en réponse à l'action conjointe du vent et de la lumière (Fig. 5).



Figure 4. Déformation d'un pin maritime qui croît le long d'un mur : la simulation combine développement architectural, croissance en diamètre du tronc et des branches et comportement biomécanique de l'arbre. Source : Thierry Fourcaud [Cirad].

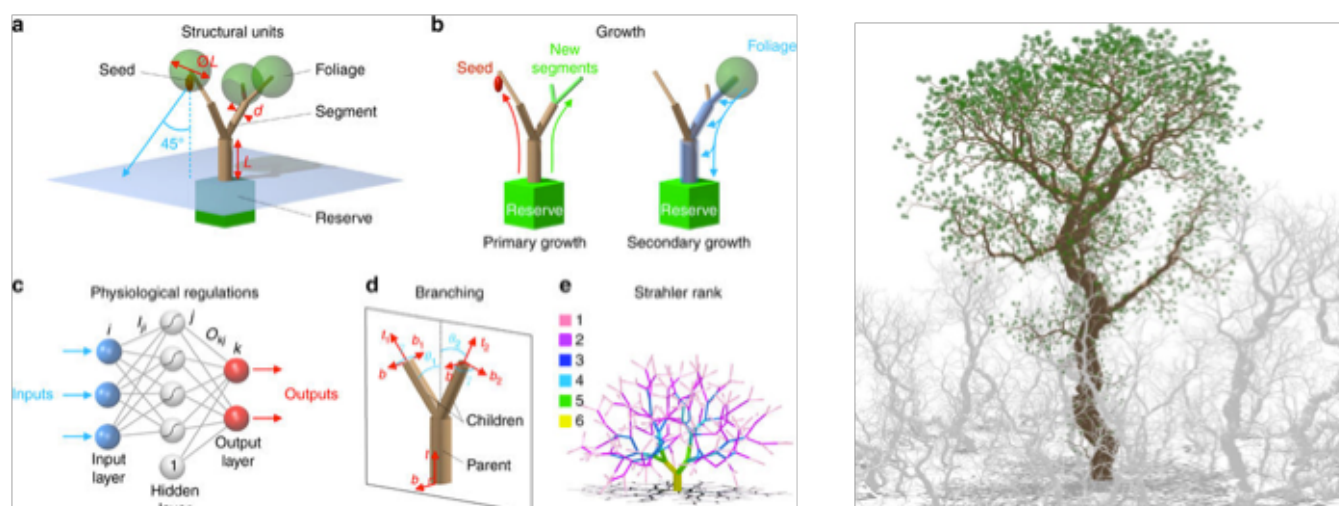


Figure 5. MECHATREE : simulation du développement d'un arbre en réponse à la lumière et aux contraintes biomécaniques. A gauche : principes du modèle. A droite : arbre simulé au milieu d'une forêt virtuelle. Source : Eloy C., Fournier M., Lacointe A., Mouliat B. 2017. Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structures. Nature Communications, 8. DOI: 10.1038/s41467-017-00995-6.

Pour des raisons pratiques (ampleur des ressources informatiques requises) aussi bien que scientifiques (pour représenter la dynamique d'un peuplement forestier il n'est pas nécessaire de connaître tous les détails de la croissance des arbres qui le composent), les modèles de peuplements et de forêts peuvent être obtenus selon des approches plus synthétiques que celles évoquées ci-dessus.

Au-delà de leur visée cognitive, ces arbres et forêts virtuels ont aussi des applications variées. En premier lieu, ils permettent d'obtenir, par le calcul des grandeurs d'intérêt peu accessibles à la mesure directe. Par exemple : les différentes fractions de la biomasse (tronc, branches, feuillage) et la quantité de rayonnement intercepté par le feuillage pour calibrer des modèles utilisés en télédétection ; ou encore la distribution spatiale du matériel végétal combustible qui est un facteur clé dans la propagation d'un incendie de forêt.

En Rhénanie-du-Nord–Westphalie, le projet « Der virtuelle Wald » (<http://www.virtueller-wald.de/de/der-virtuelle-wald/>) illustre les applications concrètes des arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels pour la gestion forestière. Dans un usage tactique, les modèles prédisent l'évolution d'un peuplement particulier en fonction de la sylviculture pratiquée (éclaircies, élagage, ...) (Fig. 6). Ils fournissent également des indications sur la qualité des produits attendus (densité du bois, nodosité des planches débitées, ...). Ils permettent aussi d'optimiser des opérations d'exploitation forestière ou des procédés de transformation tels que le sciage. La génération de scènes virtuelles sert enfin pour des aménagements paysagers ou dans des simulations en temps réel.

Dans un usage stratégique, ils servent à élaborer des principes plus généraux pour la sylviculture (choix des espèces, composition et densité des peuplements, ...) en fonction du milieu, par exemple en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques. Ils ont aussi des usages pédagogiques et ludiques quand ils prennent la forme de supports de formation ou de jeux (voir, par exemple le projet mené par des étudiants de l'école Epitech : <http://www.rfi.fr/emission/20151206-une-foret-virtuelle-evolutive> ou <http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/informatique-foret-virtuelle-pousse-mmo-science-60538/>).

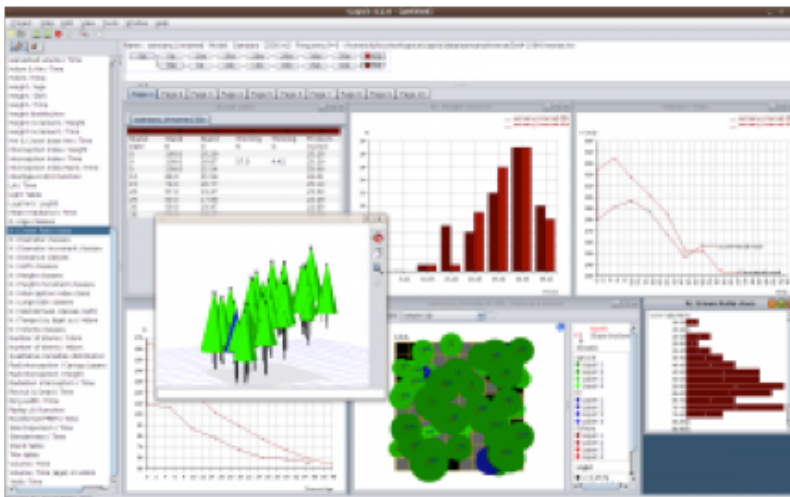


Figure 6. Différentes fenêtres permettant à un utilisateur de visualiser les caractéristiques d'un peuplement forestier simulé par le logiciel CAPSIS (Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture). Source : François de Coligny [Inra].

Ce qu'il faut retenir

- Issus des travaux des dendrométriciens, les forêts virtuelles s'inscrivent dans le cadre général de la transition numérique qui affecte tous les secteurs d'activité
- Elles reposent ainsi sur trois grands volets : la production massive de données par de nouvelles technologies ; la modélisation des processus biologiques, écologiques et technologiques ainsi que des comportements ; l'intégration de ces données et modèles dans des systèmes de visualisation et de simulation de plus en plus interactifs
- Depuis le niveau de l'arbre jusqu'à celui du paysage, leurs usages sont nombreux et se diversifient : ils vont de l'exploration des frontières des connaissances à la gestion forestière concrète, des jeux à la formation.