

MODÉLISATION DE LA PRODUCTION LIGNEUSE ET DES PAYSAGES : DES TECHNOLOGIES NOUVELLES POUR L'ÉVALUATION DES RESSOURCES FORESTIÈRES

FRANÇOIS HOULLIER

CONTEXTE : UNE ÉVOLUTION RAPIDE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

L'émergence des nouvelles technologies de l'information concerne aussi bien l'acquisition des données (nouveaux capteurs en télédétection, sur le terrain ou à l'entrée des scieries) ou l'organisation et la gestion des informations [diffusion des systèmes de gestion des bases de données (SGBD) et des systèmes d'information géographique (SIG)] que l'analyse des données et la modélisation [imagerie tridimensionnelle (3D), calcul intensif, nouveaux formalismes mathématiques et informatiques] ou la diffusion des informations (réseaux télématiques, puis Internet).

Cette évolution technologique a déjà eu un impact considérable sur l'organisation et la diffusion des données produites par les inventaires forestiers nationaux. Initialement, ceux-ci étaient principalement conçus en vue de générer des résultats agrégés selon des formats prédéfinis, par exemple, les tableaux standardisés des publications départementales de l'IFN. En forçant le trait : les données étaient utilisées une fois, afin de produire ces résultats, puis elles étaient archivées. Avec la diffusion des SGBD, sur des grands systèmes, puis des serveurs et des micro-ordinateurs, il est devenu plus facile de gérer et d'analyser de grands ensembles de données. Ce mouvement a affecté l'IFN (Wolsack, 2001) aussi bien que d'autres "observatoires forestiers" : par exemple, les données du GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers⁽¹⁾ sont gérées dans une base de données relationnelles centralisée qui peut être dupliquée chez les coopérateurs.

Dans le cas de l'IFN, il est ainsi devenu possible de répondre plus facilement aux attentes des gestionnaires, des industriels et des pouvoirs publics, en élaborant des requêtes multiples. En permettant l'interrogation à distance des bases de données brutes ou des "bases de résultats calculés", les réseaux télématiques, puis Internet, ont fourni les moyens techniques de répondre aux attentes suscitées par les nouvelles possibilités offertes par les SGBD (Deheeger *et al.*, 1990). Ces facilités techniques ont aussi posé, avec plus d'acuité que dans le passé, la question de la formation des utilisateurs de l'IFN : la possibilité technique de formuler des requêtes diversifiées d'une manière de plus en plus automatisée ne prend tout son sens que si les utilisateurs sont capables d'évaluer la pertinence de ces requêtes et de leurs résultats.

Pour la cartographie des peuplements forestiers, l'évolution des technologies a suivi un chemin similaire, avec un décalage temporel lié à la complexité et au coût des SIG. L'effort de numéri-

(1) Groupement d'intérêt scientifique associant l'AFOCEL, le CEMAGREF, l'ENGREF, l'IDF, l'INRA, et l'ONF sous l'égide de la Direction de l'Espace rural et de la Forêt (DERF) du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

sation des cartes de peuplements a permis de constituer des bases de données géographiques à partir desquelles il est devenu possible d'analyser la localisation, l'extension ou la fragmentation des massifs forestiers, et d'effectuer des requêtes croisant les données dendrométriques, écologiques et cartographiques.

Conjointement à cette évolution technologique, d'autres changements ont eu lieu dans notre manière d'appréhender les ressources forestières. Il ne s'agit plus seulement d'évaluer le volume de bois ou la biomasse dans une zone et à un moment donnés, ni de suivre leur évolution au cours du temps. Les inventaires nationaux sont aussi interrogés sur la qualité des produits ligneux, sur la contribution des forêts au cycle global du carbone ou d'autres éléments minéraux, sur les paysages et leur dynamique, etc. Toutes ces questions ont en commun de nécessiter une description dendrométrique de l'état et de la dynamique des peuplements, à des échelles allant de la parcelle à la région voire au-delà.

L'accélération des évolutions technologiques et l'élargissement de la notion de ressources forestières vont sans doute se traduire par de nouveaux changements dans les processus d'acquisition, d'analyse et de valorisation des données cartographiques, dendrométriques ou écologiques de l'IFN. Dans ce contexte, cet article s'intéresse plus spécialement au couplage entre ces données et les nouvelles méthodes de modélisation et de simulation⁽²⁾ dans les deux champs particuliers de la production ligneuse et de la dynamique des paysages.

MODÉLISATION DE LA PRODUCTION LIGNEUSE

Approche dendrométrique de la croissance des peuplements homogènes

Les connaissances issues des expérimentations sylvicoles et le savoir-faire acquis à partir des travaux de modélisation menés depuis les années 1960 (Houllier *et al.*, 1991) ont été formalisés au sein d'une "théorie dendrométrique de la production des peuplements homogènes" (Houllier, 1992) qui a été déclinée, en France, sur plus d'une douzaine de couples "espèce x région". L'articulation entre les données de l'IFN et les modèles déduits de cette théorie peut être envisagée de trois façons complémentaires :

- les données dendrométriques et écologiques de l'IFN peuvent servir à construire des modèles de croissance nouveaux (Ottorini, 1981 ; Dreyfus *et al.*, 2001a), à calibrer et évaluer des modèles de croissance existants (Salas Gonzalez, 1995) ou à établir des relations station-production (Guéro et Houllier, 1989, 1990 ; Dreyfus *et al.*, 2001b). Il s'agit ici de valoriser les données de l'IFN à des fins autres que celles pour lesquelles elles ont été principalement recueillies ;

- dans le but de prédire l'évolution de la ressource et de la disponibilité en bois, les données de l'IFN peuvent servir d'entrées à des modèles de croissance (Salas Gonzalez, 1995). À cette fin, il est nécessaire de formuler des scénarios sylvicoles "macroscopiques", définis à une échelle régionale ou nationale : les observations effectuées par l'IFN (relevé des souches de moins de 5 ans, densité moyenne des peuplements par classe d'âge) peuvent y contribuer ;

- enfin, ces données et modèles peuvent être combinés en vue d'analyser des variations biogéographiques de la production (Dreyfus *et al.*, 2001b) ou de diagnostiquer les changements de productivité à long terme (Houllier *et al.*, 1995).

Sauf pour le dernier thème qui pose des problèmes délicats d'échantillonnage et d'analyse des données, la manière d'aborder ces problèmes commence à être bien connue (Dreyfus *et al.*,

(2) La plupart des références seront françaises, mais les tendances décrites dans cet article ont une portée internationale.

2001a). Les écueils majeurs restent la structure rarement complète et équilibrée du plan d'échantillonnage, la taille de l'échantillon pour les espèces peu fréquentes, la faible surface des placettes d'inventaire et l'existence d'un seuil de recensabilité individuel qui ne permet pas de caractériser complètement les jeunes peuplements (Salas Gonzalez *et al.*, 1993). L'existence d'une théorie éprouvée, la puissance de calcul des ordinateurs et la diffusion des logiciels statistiques professionnels facilitent et accélèrent la conception des modèles, mais elles ne nous affranchissent pas d'un "travail artisanal" de modélisation : analyse des données, sélection et ajustement statistique des équations, évaluation de leur précision. Il n'est donc pas envisageable, ni souhaitable, de parvenir à une automatisation totale de ces procédures.

Un autre problème, qui reste ouvert, concerne ce qu'il est convenu d'appeler les "changements d'échelles" : est-il plus pertinent d'adopter une procédure de type "projection d'inventaire, placette par placette voire arbre par arbre" — c'est-à-dire de considérer chaque placette d'inventaire comme un peuplement réduit, de simuler son évolution en appliquant un scénario local de gestion, puis d'agrèger les prédictions —, ou d'agrèger *a priori* les données d'inventaire (par classe de fertilité, par classe de densité et/ou par classe d'âge), puis d'appliquer un simulateur global (Houllier, 1986) ? Malgré les travaux effectués sur le massif aquitain (Salas Gonzales, 1995), cette réflexion mériterait d'être complétée par d'autres études de cas appuyées sur une réflexion théorique.

Prédiction de la qualité de la production ligneuse

Depuis la fin des années 1980, la théorie dendrométrique de la production des peuplements homogènes a été étendue afin de caractériser les produits forestiers aux diverses étapes de leur transformation le long de la "chaîne forêt-bois" : la qualité des arbres sur pied et des grumes, les propriétés du bois et des produits issus de la première transformation (Leban et Duchanois, 1990 ; Colin *et al.*, 1992 ; Houllier *et al.*, 1995). En commençant par des cas simples (plantations d'Épicéa commun), les chercheurs se sont attachés :

— à modéliser le défilement des troncs et la croissance passée des arbres inventoriés, dans le but de prédire la répartition des accroissements ligneux dans la grume et le rendement des processus de transformation (Courbet, 1999). Les données de cubage de l'IFN ont ainsi été utilisées pour évaluer et extrapoler des modèles établis sur un nombre limité d'analyses de tige (Saint-André *et al.*, 1999) ;

— à modéliser la branchaison des arbres (nombre, position, dimension, insertion et statut des branches) à partir des dimensions actuelles et passées des arbres, dans le but de prédire la nodosité des grumes et des sciages ;

— à modéliser les variations des propriétés physiques et mécaniques du bois (densité, retrait) dans l'arbre en fonction de la largeur et de la position des cernes, dans le but de prédire le comportement des produits dérivés (Constant *et al.*, 1999).

Ces modèles ont donné naissance à une nouvelle méthode, non destructive, d'évaluation de la qualité des peuplements qui a été mise en œuvre dans le logiciel WinEPIFN[®] (Saint-André *et al.*, 1995) et qui a atteint un stade pré-opérationnel sur l'Épicéa (Daquitaine *et al.*, 1999) : estimation et suivi de la qualité d'un peuplement de sa commercialisation jusqu'à l'entrée de la scierie (Saint-André, communication personnelle) ; évaluation de la qualité de la ressource régionale existante par couplage aux données de l'IFN (Leban *et al.*, 1999b). L'extension de cette approche à d'autres espèces nécessite des adaptations et pose des problèmes nouveaux (Leban *et al.*, 1999a) :

— l'élaboration des modèles propres à chaque espèce pour la forme des tiges, les branches et les propriétés du bois requiert un travail expérimental et d'analyse de données important ;

— la prise en compte de nouveaux traits morphologiques ou de nouveaux critères de qualité — le polycyclisme (Pin maritime) ; la forme des troncs et le bois de réaction (Pin maritime, Pin sylvestre) ; l'irrégularité du houppier et les variations brutales du défilement des tiges (feuillus) ; la distinction entre aubier et duramen (Chêne, Pin laricio) — motive le développement de nouveaux modèles qui commencent seulement à être intégrés dans des simulateurs (Fourcaud, 1995 ; Dhôte *et al.*, 2000).

L'intégration de ces modèles dans des procédures d'évaluation de la qualité de la ressource repose sur des procédures délicates "d'inversion" des modèles de croissance (exemple : comment reconstituer l'évolution de la forme d'un arbre et en déduire la quantité et la localisation du bois de réaction à partir des seules données d'inventaire ?) dont la résolution nécessite l'acquisition de données complémentaires sur l'inclinaison, la sinuosité ou la torsion des troncs [cas du Pin maritime ou du Pin sylvestre (Thomas, 2000 ; Ancelin, communication personnelle)], ou sur la position de la première branche verte ou de la fourche [cas du Chêne (Dhôte, communication personnelle)].

L'ensemble de ces travaux se rattache à l'étude des relations entre la morphologie externe des arbres et leur structure interne. Dans ce domaine, nous assistons à des progrès technologiques rapides qui sont autant liés aux nouveaux capteurs non destructifs (lasers, scanners, photogrammétrie 3D, etc.) qu'aux techniques d'imagerie 3D (Thomas, 2000 ; Saint-André, 1998). Par assimilation des données issues de ces capteurs dans des modèles de croissance et de structure des arbres, ces progrès sont susceptibles d'être rapidement intégrés dans la "chaîne forêt-bois", dans les inventaires forestiers mais aussi sur les chantiers d'exploitation ou à l'entrée des scieries.

L'évaluation de la qualité de la production ligneuse commence aussi à être envisagée sous l'angle de l'intégration d'informations sur le bilan environnemental de la gestion forestière. Si nous considérons la fonction de stockage du carbone ou des éléments minéraux dans la biomasse aérienne et racinaire, et si nous cherchons à évaluer les quantités exportées à l'occasion d'une coupe, la logique adoptée pour la qualité technologique de la ressource en bois reste valide : il s'agit de prédire le volume et la masse des organes (feuilles, branches, bois du tronc, écorce, racines, etc.) en fonction des grandeurs mesurées dans les inventaires forestiers, puis les variations de la teneur en carbone ou de la concentration en éléments minéraux dans ces mêmes organes. Nous pouvons ainsi étendre la plate-forme logicielle WinEPIFN[®] à la prise en compte de ces grandeurs (Leban et Ranger, communication personnelle) en vue de réaliser une évaluation multifonctionnelle des ressources forestières.

Dynamique des forêts hétérogènes

Contrairement à une idée trop couramment répandue en France, il existe déjà des modèles de dynamique des forêts mélangées ou irrégulières (Peng, 2000), tempérées (Courbaud, 1997 ; Buongiorno *et al.*, 1995) ou tropicales (Favrillon, 1995 ; Gourlet-Fleury, 1997). Deux classes de modèles empiriques ont ainsi été employées dans le contexte des inventaires nationaux :

— des modèles matriciels qui opèrent au niveau de la parcelle ou d'un agrégat de parcelles et qui résument les probabilités de recrutement, de croissance et de mortalité. En Amérique du Nord, dès les années 1970-80, de tels modèles ont été conçus et calibrés à partir de placettes issues d'inventaires forestiers permanents ;

— des modèles individuels où la croissance et la mortalité de chaque arbre sont exprimées en fonction de ses dimensions et de son environnement (station, densité locale du peuplement). Les modèles proposés par Monserud et Sterba (1996, 1999) ont ainsi été construits à partir des données de l'inventaire forestier national autrichien.

L'existence de ces modèles ne doit cependant pas dissimuler le déséquilibre entre la grande attention traditionnellement accordée aux forêts homogènes et la faiblesse des efforts consacrés aux forêts hétérogènes qui posent pourtant des problèmes théoriques et expérimentaux plus délicats et, à de multiples égards, plus intéressants (Franc *et al.*, 2000).

Modèles à base écophysologique

Afin de s'affranchir de l'hypothèse de stabilité de l'environnement — hypothèse qui est implicite dans la théorie dendrométrique de la production des peuplements homogènes et qui est invalidée par les changements climatiques globaux ou par une intervention telle que la fertilisation —, une nouvelle génération de modèles de production plus mécanistes apparaît depuis une quinzaine d'années (Deleuze, 1996 ; Porté, 1999). Ces modèles sont généralement basés sur un bilan de carbone effectué au niveau de l'arbre ou du peuplement et tiennent compte des régulations induites par les conditions environnementales (disponibilité en eau, en lumière, etc.).

Ces modèles, qui ont été surtout développés dans les pays scandinaves, en Australie ou en Nouvelle-Zélande, visent d'abord à améliorer et synthétiser nos connaissances ou à explorer les conséquences possibles de modifications environnementales. Des modèles simples peuvent aussi être couplés aux inventaires forestiers régionaux, par exemple par assimilation des données issues de la télédétection, en vue d'évaluer les variations spatiales (à petite échelle) et temporelles (inter-annuelles) de la productivité de massifs forestiers homogènes et étendus. Sauf dans le cas du massif aquitain de Pin maritime, des études de ce type n'ont guère été envisagées en France.

MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE DES PAYSAGES ET SYSTÈMES D'INFORMATION

Simulation de l'architecture des plantes et des paysages

Parallèlement aux recherches classiques sur la production ligneuse, des travaux apparemment éloignés des préoccupations de l'IFN ont été menés depuis plus de 20 ans sur l'architecture des plantes (Hallé et Oldeman, 1990), puis sur la modélisation et la simulation en trois dimensions (3D) de leur croissance (de Reffye *et al.*, 1989 ; Prunskiewicz et Lindenmeyer, 1990). Issus de problématiques agronomiques sur le rendement et la stabilité mécanique du Caféier, ces travaux ont débouché sur une gamme diversifiée de logiciels (Bouchon *et al.*, 1997) :

— la simulation botaniquement cohérente de la croissance d'arbres génère des maquettes 3D visuellement réalistes qui sont mises en scène pour représenter des paysages urbains ou ruraux (Barthélémy *et al.*, 1995). Ces logiciels sont aujourd'hui industrialisés et commercialisés ; ils sont utilisés par des bureaux d'étude pour illustrer des projets d'aménagement, analyser leur impact et servir de support à la concertation entre les décideurs, les concepteurs et les "utilisateurs" de ces aménagements ;

— la simulation plus précise du développement architectural et de la croissance radiale (Barczy *et al.*, 1997) génère des maquettes 3D qui peuvent être utilisées pour évaluer la biomasse des compartiments de l'arbre tout au long de son développement ;

— la simulation de la compétition pour l'espace et la lumière, et des relations entre le développement aérien et la croissance radiale du tronc permet d'envisager une nouvelle génération de logiciels de prédiction de la production ligneuse en quantité et qualité en fonction de la sylviculture pratiquée (de Reffye *et al.*, 1997 ; Blaise *et al.*, 1997).

Dès le début des années 1990, l'idée de coupler les logiciels de visualisation des paysages et des bases de données géographiques (topographie, parcellaire, composition et âge des peuplements)

ments) a été explorée en vue d'analyser l'impact paysager d'aménagements forestiers (Lecoustre *et al.*, 1997). Les principales difficultés consistaient alors :

- à renseigner les entrées des logiciels de visualisation des paysages à partir des données cartographiques disponibles (utilisation du territoire, carte des peuplements, modèle numérique de terrain, etc.). Ce problème est aujourd'hui en passe d'être résolu grâce à la conception d'interfaces avec les SIG (Perrin, 2000) ;

- à visualiser des "grands paysages" contenant un très grand nombre d'arbres, chacun d'entre eux étant potentiellement représenté par plusieurs milliers de polygones : l'accroissement des performances des ordinateurs (vitesse de calcul et mémoire) et la mise au point d'algorithmes de simplification permettent aujourd'hui de représenter des paysages de plusieurs km² (Perrin, 2000) ;

- à paramétrer la croissance 3D des plantes en fonction de l'espèce, de la densité du peuplement et des conditions environnementales. La modélisation d'une nouvelle espèce dans un environnement défini est plus ou moins longue en fonction de l'objectif poursuivi : de quelques jours, si l'objectif est la simulation paysagère (Lecoustre, communication personnelle), à quelques années, si l'objectif est d'obtenir une maquette précise utilisable à des fins d'estimation de biomasse (Castel, 1998). En revanche, la modélisation de plantes virtuelles réactives à leur environnement et aux interventions sylvicoles reste un sujet difficile pour lequel les recherches en cours (de Reffye et Houllier, 1997) renvoient à l'acquisition de connaissances sur le comportement écophysologique des espèces, à l'organisation de ces connaissances dans des modèles et des logiciels, et à des problèmes de calcul intensif (exemple : comment simuler sur de nombreuses années des dizaines de milliers d'arbres en interaction avec leur environnement ?).

Nous avons commencé d'explorer l'utilisation de ces modèles et logiciels pour visualiser, à partir des données de l'IFN, des grands paysages (Auclair *et al.*, 2001). Il est cependant vraisemblable que les seules informations disponibles dans les bases de données de l'IFN ne seront pas suffisantes. Comme « *la reconstruction procédurale d'un site réel n'est pas pertinente lorsque celui-ci est particulièrement riche en "amers", c'est-à-dire en éléments paysagers très singuliers* » (Perrin, 2000), l'échelle des cartes de l'IFN et les données dendrométriques moyennes associées aux éléments cartographiés ne permettront sans doute pas de visualiser avec précision les paysages formés de boisements morcelés, de haies et d'alignements, paysages qui sont pourtant ceux pour lesquels les questions se posent souvent avec le plus d'acuité⁽³⁾. La visualisation semi-automatique de grands paysages devra donc combiner de manière astucieuse les données cartographiques, dendrométriques et écologiques de l'IFN avec des informations complémentaires, telles celles contenues dans la base de données topographiques BDTOPO® de l'Institut géographique national (IGN) ou celles qui pourraient être obtenues à partir d'une interprétation plus détaillée des photographies aériennes utilisées par l'IFN (exemple : estimation de la hauteur des peuplements) ou des nouveaux capteurs [exemple : la nouvelle caméra numérique 3D de l'IGN qui permet d'obtenir des modèles numériques d'élévation (Burette, communication personnelle)].

Vers des systèmes d'information territoriaux en 3D

Bien que nous sachions aujourd'hui extraire les données d'un SIG pour visualiser un paysage, nous ne disposons pas pour autant de véritables systèmes d'information 3D. En effet, nous n'avons pas encore développé d'outils permettant de "relire" les scènes tridimensionnelles

(3) Ce problème n'est pas spécifique à la question des paysages. Il touche plus généralement l'évaluation de la biodiversité : les inventaires nationaux sont plus conçus en vue d'estimer des grandeurs moyennes, que pour caractériser des singularités.

simulées pour en extraire des paramètres utilisables dans le SIG. Une telle fonctionnalité serait pourtant utile pour aborder des problématiques importantes pour l'aménagement des forêts et du territoire ou pour simuler la dynamique de la végétation (exemple : colonisation naturelle d'anciennes terres agricoles).

C'est ainsi que l'analyse des risques (sensibilité au vent, interception des précipitations en relation avec des problèmes d'érosion ou de crues, propagation des incendies ou d'une épidémie) et les procédures de zonage qui en découlent requièrent non seulement de disposer d'informations sur la topographie, la météorologie, l'utilisation du territoire, les types de peuplements, mais aussi de caractériser les couverts par des grandeurs synthétiques : la rugosité ou les variations de hauteur au voisinage des lisières, la densité moyenne du feuillage et ses variations horizontales, la répartition 3D de la biomasse par grands types d'organes, etc. À partir du moment où nous disposons de maquettes d'arbres précises, ces calculs sont en principe faisables. Ils ont déjà été réalisés de manière *ad hoc* pour des études sur la télédétection radar ou sur les incendies de forêt (Castel, 1998 ; Caraglio, communication personnelle), mais nous manquons encore d'outils génériques pour les effectuer à l'échelle d'un paysage ou d'un bassin versant puis pour en restituer automatiquement les résultats dans une base de données géographiques afin qu'ils soient croisés avec d'autres informations ou injectés dans d'autres modèles (météorologiques, épidémiologiques, de propagation d'incendies, etc.).

CONCLUSIONS

Les évolutions technologiques qui ont été décrites sont autant motivées par l'émergence de méthodes nouvelles ou plus performantes (de mesure, d'organisation et d'analyse des données, de modélisation numérique et de communication) que par la diversification des attentes de la société, des gestionnaires forestiers ou des industriels, par le souhait d'une meilleure valorisation des informations disponibles et par l'émergence du concept de "transparence". Il existe en effet un jeu dialectique entre le renouvellement et la diversification de l'offre d'informations portés par l'évolution technologique, d'une part, et l'élargissement des demandes des utilisateurs de l'IFN, d'autre part.

Une mauvaise interprétation de ces évolutions pourrait laisser croire qu'elles nous conduisent à des "systèmes d'information virtuels" capables de fournir par eux-mêmes les réponses aux multiples questions posées par l'extension de la notion de ressources forestières. L'expérience de ces dernières années montre en fait que la modélisation des paysages, des peuplements, des arbres et du bois requiert des observations et expériences bien réelles : en botanique pour l'architecture des plantes, en dendrométrie et sylviculture pour la production ligneuse, en anatomie et mécanique pour la qualité des bois. Elle montre aussi que les progrès méthodologiques passent souvent par l'innovation en métrologie. Par exemple, la faiblesse actuelle des modèles de dynamique des forêts hétérogènes tient largement à la difficulté que nous avons pour les décrire quantitativement et pour y définir un cadre expérimental rigoureux. Dans les différents cas que nous avons examinés, les nouvelles technologies ne nous affranchissent donc pas d'un travail d'observation et de modélisation. En revanche, elles favorisent l'automatisation de ce travail. Elles offrent aussi la possibilité de concevoir des outils et méthodes génériques qui peuvent ensuite être déclinés par espèce ou type de peuplement.

La combinaison des informations dendrométriques et cartographiques de l'IFN avec certains de ces nouveaux outils a d'ores et déjà été testée dans quelques situations particulières : simulation de l'évolution de la ressource en Pin maritime, évaluation de la qualité de la ressource en Épicéa commun, visualisation de paysages. En fonction de l'évaluation de leurs performances

— en termes de précision et d'exactitude, mais aussi de facilité de mise en œuvre ou de capacité à traiter des situations diversifiées —, ces méthodes diffuseront plus ou moins vite. Il n'en est pas moins certain qu'elles dessinent une nouvelle génération de systèmes d'information qui associeront des données de base de plus en plus variées et des algorithmes de simulation de plus en plus sophistiqués. La diffusion de ces systèmes ne pourra pas être automatique et aveugle. Comme cela a été le cas lorsque l'IFN a commencé à ouvrir ses bases de données dans les années 1980, elle nécessitera un effort particulier de formation et d'information ainsi qu'une réflexion approfondie sur la "valeur" et le caractère "public" des données et des outils. Ainsi que le suggère Barthod (2000) à propos de l'une des ressources forestières, la biodiversité, « *il est absolument essentiel que tous les partenaires [...] puissent avoir accès à un bon et même niveau d'information technique sur les problèmes particuliers à traiter* ». Tel est bien l'enjeu du développement et de l'ouverture de ces systèmes d'information.

François HOULLIER

Directeur de recherches à l'INRA
Unité mixte de Recherches Botanique et bioinformatique
de l'Architecture des Plantes (AMAP)
CIRAD-CNRS-INRA-UNIVERSITÉ Montpellier II
Boulevard de la Lironde
TA40/PS2
F-34398 MONTPELLIER CEDEX 5
(houllier@cirad.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- AUCLAIR (D.), LECOUSTRE (R.), NAUDET (J.-P.), PIGNARD (G.). — Visualisation des paysages forestiers à partir des bases de données de l'IFN. *In* : Séminaire des 40 ans de l'Inventaire forestier national, Nancy, 13-14 avril 2000. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, pp. 468-474.
- BARCZI (J.-F.), REFFYE (Ph. de), CARAGLIO (Y.). — Essai sur l'identification et la mise en œuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale : le logiciel AMAPsim. *In* : Modélisation et simulation de l'architecture des arbres / J. Bouchon, Ph. de Reffye, D. Barthélémy Eds. — Paris : INRA, 1997. — pp. 205-254 (Science Update).
- BARTHÉLÉMY (D.), BLAISE (F.), FOURCAUD (T.), NICOLINI (E.). — Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 71-96.
- BARTHOD (C.). — Quelques libres réflexions sur le concept de gestion durable des forêts. — *La biodiversité en forêt wallonne*, 2000, pp. 443-451.
- BLAISE (F.), REFFYE (Ph. de), HOULLIER (F.). — Sawing logs in virtual trees. *In* : Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares, IUFRO WP S5.01.04 Second Workshop (Berg-en-Dal, South Africa, 26-30/08/96) / G. Nepveu Ed. . — 1997. — pp. 203-212.
- BOUCHON (J.), REFFYE (Ph. de), BARTHÉLÉMY (D.), Eds. — Modélisation et simulation de l'architecture des arbres. — Paris : INRA, 1997. — 434 p. (Science Update).
- BUONGIORNO (J.), PEYRON (J.-L.), HOULLIER (F.), BRUCIAMACCHIE (M.). — Growth and management of mixed-species, uneven-aged forests in the French Jura : implications for economic returns and tree diversity. — *Forest Science*, vol. 41, 1995, pp. 397-429.
- CASTEL (T.). — Estimation de paramètres de la ressource forestière par la télédétection radar à synthèse d'ouverture. — Montpellier : ENGREF, 1998. — 250 p. (Thèse de Doctorat).

- COLIN (F.), HOULLIER (F.), LEBAN (J.-M.), NEPVEU (G.). — Modélisation de la croissance des arbres, des peuplements et de la qualité des bois. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 3, 1992, pp. 248-254.
- CONSTANT (-) *et al.* — The French project SICRODEF : a chain of simulators from the tree growth to the distortion of boards due to the release of growth stresses during sawing. First results. *In* : Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, IUFRO 3rd Workshop WP S5.01-04 (La Londe-les-Maures, France, 5-12/08/1999) / G. Nepveu Ed. . — 1999. — pp. 377-386.
- COURBAUD (B.). — Modélisation de l'éclaircissement et de la croissance de l'Épicéa (*Picea abies* L. Karst.) en forêt irrégulière de montagne. — Université Claude Bernard - Lyon I, 1997. — 238 p. (Thèse de Doctorat).
- COURBET (F.). — A three-segmented model for the vertical distribution of annual ring area. Application to *Cedrus atlantica* Manetti. — *Forest Ecology and Management*, vol. 119, 1999, pp. 177-194.
- DAQUITAINE (R.), SAINT-ANDRÉ (L.), LEBAN (J.-M.). — Modelling the boards properties distribution for a forest stand. Analysis of the propagation of errors in the simulation process. Application in Norway spruce (*Picea abies* Karst.). *In* : Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, IUFRO 3rd Workshop WP S5.01-04 (La Londe-les-Maures, France, 5-12/08/1999) / G. Nepveu Ed. . — 1999. — pp. 426-435.
- DEHEEGER (J.-C.), GUÉRO (M.-C.), HOULLIER (F.), PIGNARD (G.). — An Integrated Information System about French Forest Resources. *In* : XIX^e Congrès mondial de l'IUFRO (Montréal, Canada, 05-11/08/90). — 1990, 8 p. [communication et texte].
- DELEUZE (C.). — Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration des connaissances écophysiologiques dans les modèles de production ligneuse. — Université Claude Bernard - Lyon I, 1996. — 305 p. (Thèse de Doctorat).
- DHÔTE (J.-F.), HATSCH (E.), RITTIÉ (D.). — Forme de la tige, tarifs de cubage et ventilation de la production en volume chez le Chêne sessile. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, 2000, pp. 121-142.
- DREYFUS (Ph.), BRUNO (E.), NAUDET (J.-P.). — Indices de fertilité stationnelle alternatifs fondés sur des données écologiques : évolution de la hauteur dominante des peuplements réguliers de Pin d'Alep. *In* : Séminaire des 40 ans de l'Inventaire forestier national, Nancy, 13-14 avril 2000. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001b, pp. 378-390.
- DREYFUS (Ph.), HAMZA (N.), PIGNARD (G.). — Construction de modèles de croissance pour les peuplements réguliers à partir des données dendrométriques de l'Inventaire forestier national. *In* : Séminaire des 40 ans de l'Inventaire forestier national, Nancy, 13-14 avril 2000. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001a, pp. 434-441.
- FAVRICHON (V.). — Modèle matriciel déterministe en temps discret. Application à l'étude de la dynamique d'un peuplement forestier tropical humide (Guyane française). — Université Claude Bernard - Lyon I, 1995. — 252 p. (Thèse de Doctorat).
- FOURCAUD (T.). — Analyse du comportement mécanique d'une plante en croissance par la méthode des éléments finis. — Université de Bordeaux I, 1995. — 148 p. (Thèse de Doctorat).
- FRANC (A.), PICARD (N.), GOURLET-FLEURY (S.). — Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes. — Nancy : ENGREF, 2000. — 312 p.
- GOURLET-FLEURY (S.). — Modélisation individuelle spatialement explicite de la dynamique d'un peuplement de forêt dense tropicale humide (Guyane française). — Université Claude Bernard - Lyon I, 1997. — 274 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- GUÉRO (M.-C.), HOULLIER (F.). — La Base de données de l'Inventaire forestier national : nature et utilisation de ses données dynamiques. — *Bulletin des Recherches agronomiques de Gembloux*, vol. 25, n° 1, 1990, pp. 49-64.
- GUÉRO (M.-C.), HOULLIER (F.). — Construction et utilisation de modèles de croissance en hauteur à partir des données dendrométriques de l'IFN en vue de l'étude des relations station-production. *In* : Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques / M. Buffet & D. Girault Eds. — Nogent-sur-Vernisson : CEMAGREF, 1989. — pp. 79-96.
- HALLÉ (F.), OLDEMAN (R.A.A.). — Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. *In* : Monographie de Botanique et de Biologie végétale, vol. 6. — Paris : Masson, 1970. — 176 p.
- HOULLIER (F.). — Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : applications à la gestion des ressources forestières. — Université Claude Bernard - Lyon I, 1992. — 67 p. (Mémoire d'habilitation à diriger des recherches).

- HOULLIER (F.). — Échantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : application au cas de l'Inventaire forestier national. — Université Claude Bernard - Lyon I, 1986. — 267 p. (Thèse de Doctorat).
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- HOULLIER (F.), LEBAN (J.-M.), COLIN (F.). — Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. — *Forest Ecology and Management*, vol. 74, 1995, pp. 91-102.
- HOULLIER (F.), PIGNARD (G.), SCHMITT (F.), BERTRAND (Ph.). — Medium term evolution of forest productivity : the use of national forest inventory data. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann & M. Bonneau Eds. — Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1995. — pp. 157-173.
- LEBAN (J.-M.), DHÔTE (J.-F.), HERVÉ (J.-C.). — Modelling past growth and timber quality in forest stand. State-of-art in France for Norway spruce. Perspective application for some other softwood species and for Oak stem morphology. *In* : Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software (La Londe-les-Maures, France, 5-12/08/1999), IUFRO 3rd Workshop WP S5.01-04 / G. Nepveu Ed. . — 1999a. — pp. 478-487.
- LEBAN (J.-M.), DUCHANOIS (G.). — SIMQUA : un logiciel de simulation de la qualité des bois. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 47, 1990, pp. 483-493.
- LEBAN (J.-M.), HOULLIER (F.), PIGNARD (G.), SAINT-ANDRÉ (L.). — Assessment of long-term changes in timber quality : combining national forest inventory data and growth and wood quality models. *In* : Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe / T. Karjalainen, H. Spiecker, O. Laroussinie Eds. — Joensuu : European Forest Institute, 1999b. — pp. 181-195 (EFI Proceedings, 27).
- LECOUSTRE (R.), SAITO (K.), KUMAGAI (Y.), HONJO (T.), REFFYE (Ph. de), ISHIDA (Y.). — Simulation d'un paysage forestier à partir d'un SIG et de la technique de modélisation des plantes. *In* : Modélisation et simulation de l'architecture des arbres / J. Bouchon, Ph. de Reffye, D. Barthélémy Eds. — Paris : INRA, 1997. — pp. 425-434 (Science Update).
- MONSERUD (R.), STERBA (H.). — A basal area increment model for even- and uneven-aged forest stands in Austria. — *Forest Ecology and Management*, vol. 80, 1996, pp. 57-80.
- MONSERUD (R.), STERBA (H.). — Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. — *Forest Ecology and Management*, vol. 113, 1999, pp. 109-123.
- OTTORINI (J.-M.). — Application des données de l'Inventaire forestier national à l'étude de la production du Pin sylvestre en Margeride. B. Étude de la production totale en volume. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, 1981, pp. 487-502.
- PENG (C.). — Growth and yield models for uneven-aged stands : past, present and future. — *Forest Ecology and Management*, vol. 132, 2000, pp. 259-279.
- PERRIN (L.). — Imago Metropolis ou la modélisation procédurale du "grand paysage". — *Note rapide sur l'occupation du sol*, n° 3, mars 2000, IAURIF, Paris, 4 p.
- PORTÉ (A.). — Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait) en Lande humide. — Université Paris XI - Orsay, 1999. — 196 p. (Thèse de Doctorat).
- PRUNSINKIEWICZ (P.), LINDENMEYER (A.). — The algorithmic beauty of plants. — New York : Springer Verlag, 1990.
- REFFYE (Ph. de), EDELIN (C.), JAEGER (M.). — Modélisation de l'architecture des plantes. — *La Recherche*, vol. 20, n° 207, 1999, pp. 158-168.
- REFFYE (Ph. de), HOULLIER (F.). — Modelling plant growth and architecture : some recent advances and applications to agronomy and forestry. — *Current Science*, vol. 73, n° 11, 1997, pp. 984-992.
- REFFYE (Ph. de), HOULLIER (F.), BLAISE (F.), FOURCAUD (T.). — Essai sur les relations entre l'architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs. *In* : Modélisation et simulation de l'architecture des arbres / J. Bouchon, Ph. de Reffye, D. Barthélémy Eds. — Paris : INRA, 1997. — pp. 255-423 (Science Update).
- SAINT-ANDRÉ (L.). — Modélisation tridimensionnelle des profils de largeur de cerne dans un billon d'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) compte tenu de la mesure de son enveloppe externe et des caractéristiques dendrométriques usuelles de l'arbre d'origine. — Nancy : ENGREF, 1998. — 215 p. (Thèse de Doctorat).
- SAINT-ANDRÉ (L.), LEBAN (J.-M.), HOULLIER (F.). — WinEPIFN 1.0 : logiciel d'évaluation de la qualité de la ressource en bois, version PC sous Windows. — Champenoux : INRA - Équipe de recherche sur la qualité des bois, 1995 (Code APP : IDDN.FR.001.360012.00R.X.1996.000.00000).

Thème 4. Modélisation et cartographie des peuplements et des paysages

- SAINT-ANDRÉ (L.), LEBAN (J.-M.), HOULLIER (F.), DAQUITAINE (R.). — Comparaison de deux modèles de profil de tige et validation sur un échantillon indépendant. Application à l'Épicéa commun de la région Nord-Est de la France. — *Annals of Forest Science*, vol. 56, 1999, pp. 121-132.
- SALAS GONZALEZ (R.). — Modélisation de l'évolution de la ressource du massif de Pin maritime (*Pinus pinaster*) des Landes de Gascogne. — Nancy : ENGREF, 1995. — 187 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- SALAS GONZALEZ (R.), HOULLIER (F.), LEMOINE (B.), PIERRAT (J.-C.). — Représentativité locale des placettes d'inventaire en vue de l'estimation de variables dendrométriques de peuplement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 50, 1993, pp. 469-486.
- THOMAS (R.). — Analyse des formes de troncs par photogrammétrie pour caractériser la qualité des bois. Application au Pin sylvestre de Lozère. — Montpellier : ENGREF, 2000 (Thèse de Doctorat).
- WOLSACK (J.). — 10 giga-octets de données en ligne. *In* : Séminaire des 40 ans de l'Inventaire forestier national, Nancy, 13-14 avril 2000. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, pp. 247-256.