

LA MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE : définitions et objectifs, entrées nécessaires, sorties possibles

G. NEPVEU

Plutôt que de présenter une revue bibliographique sur la question, ce qui dépasserait largement nos compétences, nous avons essentiellement pris le parti dans les lignes qui suivent d'indiquer ce que nous comprenons de l'expression "modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance" et de décrire à l'aide de quelques exemples comment nous nous attachons dans notre pratique quotidienne à évaluer la qualité du bois en fonction de la croissance par une "approche modélisatrice".

Dans cette perspective, nous aborderons successivement plusieurs points. En premier lieu, nous présenterons une étude en cours dans notre Équipe de Recherches, étude dans laquelle (il nous semble que) nous mettons en œuvre une démarche typiquement modélisatrice.

Ce point sera suivi par un inventaire des grandes étapes de la modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance, puis par une comparaison des avantages et inconvénients des approches "classique" et "modélisatrice" de prévision de la qualité du bois.

Nous mentionnerons ensuite les deux grands types d'objectifs et les sorties possibles de la modélisation de la qualité du bois.

Nous terminerons en évoquant les difficultés qui restent encore à surmonter pour une mise en œuvre optimum de cette approche.

Avant que d'envisager ces différents points, il convient d'attirer l'attention du lecteur sur quelques éléments :

● **Tous les aspects de la modélisation de la qualité du bois ne pourront être traités dans la limite de ces quelques pages.** Nous pensons en particulier au cas de la branchaison (et donc de la nodosité) des arbres (et donc des grumes et des pièces de bois débité), au cas de la forme de l'arbre, des contraintes internes et du bois de réaction associés, au cas des risques de gélivure et au cas de la prévision du comportement au séchage, des propriétés physiques et mécaniques à partir de l'anatomie du bois ("modélisation micro-macro"). Les progrès acquis récemment dans des domaines aussi divers que l'architecture de l'arbre, la mécanique, les transferts de chaleur et de masse, l'analyse d'image appliquée à l'anatomie du bois sans oublier l'informatique ont déjà permis d'obtenir ou laissent espérer beaucoup en matière de prévision de ces importantes propriétés grâce à la modélisation. À titre d'exemple d'application de la modélisation aux différents cas évoqués ci-dessus, on pourra se reporter respectivement aux travaux de Colin (1992), Fourcaud (1995), Fournier (1989), Cinotti (1989) et Perré (1992 et 1993).

● **Le terme de qualité du bois est fort commode et nous continuerons à ce titre de l'employer. Il demeure cependant fort imprécis** et son acception dépend largement de l'utilisateur intermédiaire ou final des arbres, des billons, des produits débités et des pièces mises en œuvre. Pour simplifier, nous pouvons avoir deux niveaux d'approche de cette qualité du bois :

— la description d'un billon ou d'une pièce de bois en terme de **caractéristiques de base** nécessaires à son classement en fonction des normes existantes ou à venir (nodosité, largeur de cerne, densité du bois, angle du fil, couleur,...). Cette description peut être obtenue sitôt que l'on connaît la "carte" de ces caractéristiques de base dans la grume et que l'on est capable de débiter cette grume par l'informatique. Ce débit informatique ne consiste pas simplement à calculer l'intersection de deux volumes : il peut aussi consister à décrire, par exemple, le rendu esthétique des faces de la pièce, ce qui est loin d'être simple ;

— la description du comportement ou **des propriétés technologiques** d'une pièce de bois (poutre, placage) vue par son utilisateur : résistance mécanique, déformations après libération des contraintes internes et/ou après séchage,...

● **Il existe deux grandes sources de variabilité de la qualité du bois :**

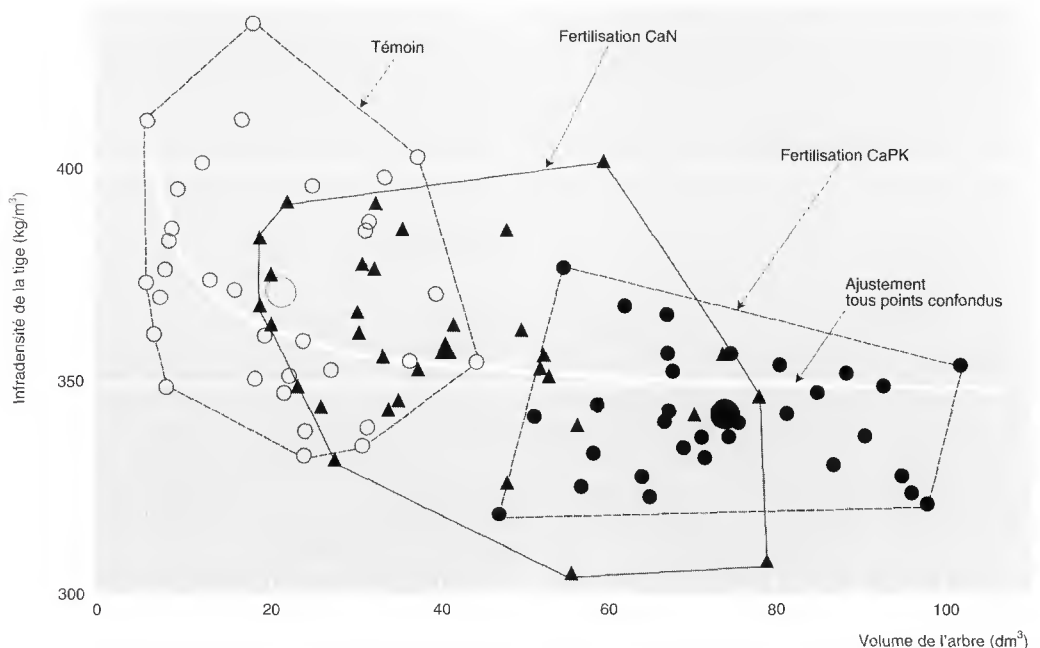
— celle qui résulte de la répartition des largeurs et des âges (depuis la moelle le plus souvent) des cernes dans les billons ou les pièces débitées. Cette répartition peut être identifiée sitôt que l'on connaît la distribution des largeurs de cerne et le plan de débit dans les grumes d'origine ;

— celle qui résulte de la variabilité de structure du cerne une fois fixées les conditions de croissance. Au niveau d'un cerne particulier, cette variabilité de structure à croissance fixée peut s'expli-

Figure 1

**RELATION ENTRE VOLUME ET INFRADENSITÉ DU BOIS (ensemble de la tige)
pour des épicéas communs fertilisés à la plantation (CaN, CaPK + témoin)
plantation de 21 ans ; chaque point est un arbre**

Bonneau, Nepveu, Thiercelin, 1990, non publié, in Polge (1992)



quer par des raisons climatiques. Au niveau d'un groupe de cernes — niveau qui intéresse l'utilisateur du bois — c'est l'effet "arbre" qui explique cette variabilité. Cet effet "arbre" peut être tout à fait considérable ainsi qu'en témoigne la figure 1 (p. 36).

Cette figure empruntée à l'article de Polge (1992) montre que, par-delà une relation "tendancielle", au cas d'espèce négative, entre croissance et qualité du bois (ici l'infra-densité du bois), on observe à croissance égale des différences individuelles tout à fait considérables pour la qualité.

De l'existence de ces deux sources de variabilité sur la qualité du bois (effet "vitesse de croissance à population d'arbres bloquée" et effet "arbres à vitesse de croissance bloquée") résulte le fait que la connaissance de l'empilement des cernes dans un arbre ou dans quelques arbres est une condition nécessaire mais non suffisante pour évaluer la qualité des produits. Si l'on souhaite aller plus loin, c'est-à-dire, par exemple, prévoir la **moyenne** et la **distribution** d'une propriété de base des pièces de bois issues d'une population d'arbres (ce qui en général constitue les éléments intéressant l'industriel utilisateur), il faut, en sus de la connaissance de l'empilement des cernes dans la population d'arbres et d'un ajustement donnant la propriété de base du bois en question en relation avec des paramètres de "position" dans l'arbre liés à la vitesse de croissance (âge depuis la moelle, largeur de cerne,...), disposer d'une bonne estimation des effets "arbre" autour de l'ajustement sus-mentionné. Une fois pourvu de cet ajustement et de cette connaissance des effets "arbre" autour de lui, on a tout ce qu'il faut (en principe) pour simuler la moyenne et la distribution de la propriété de base des pièces tirées de cette population d'arbres.

Il nous a semblé indispensable de rappeler en introduction l'existence de ces deux sources de variabilité de la qualité du bois. Leur non-prise en compte simultanée dans nombre d'études est à l'origine de bien des contradictions et confusions dans l'interprétation des résultats délivrés.

UN EXEMPLE DE MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE

La partie "qualité du bois" de la Convention de recherches ONF-INRA "Sylviculture et Qualité du bois de Chêne (Chêne rouvre)" nous semble constituer un assez bon exemple d'une démarche "modélisatrice" d'évaluation de l'effet de la sylviculture sur la qualité du bois.

La question principale à résoudre au cours de cette Convention peut être résumée ainsi : « *Si je fais croître les Chênes plus vite en circonférence, quid de la qualité de leur bois en terme de stabilité dimensionnelle (déformations au séchage) et d'aspects esthétiques (couleur,...) ?* ».

Nous nous concentrerons ici sur l'aspect "stabilité dimensionnelle" en renvoyant le lecteur pour plus de détails à Nepveu (à paraître).

En admettant dans un premier temps quelques simplifications, la démarche que nous avons décidé d'adopter sur ce point peut être décrite en quatre étapes successives :

— **Étape 1** : établissement d'ajustements arbre par arbre ou au niveau d'une population d'arbres donnant les variations intraarbre de la densité, des retraits et de l'angle du fil du bois en fonction d'informations délivrées (ou délivrables) par les modélisateurs de la croissance en hauteur et en grosseur des arbres.

Ces ajustements ont la forme — très générale — suivante :

propriétés (densité, retraits, angle du fil) = f (largeur de cerne, âge depuis la moelle et, si nécessaire, hauteur dans la grume).

Les caractères de base du bois : densité, retraits et angle du fil du bois ont été considérés car on les sait très influents pour la mise en œuvre de l'étape 4 décrite ci-après.

— **Étape 2** : étude de la variabilité des paramètres de l'ajustement délivré par l'étape 1 : effet "arbre", effet "placette dans région", effet "région".

Cette étape 2 nous servira notamment à savoir si nous pouvons nous considérer autorisé à "faire tourner" le même ajustement dans des régions différentes pour prévoir la distribution intraarbre des propriétés de base du bois sitôt que l'on connaît son empilement de cerne (cf. étape 3). On imagine les économies de mesure qui peuvent en résulter...

— **Étape 3** : simulation de l'effet de l'application des scénarios sylvicoles envisagés sur la distribution, dans la grume de bois d'œuvre, des propriétés de base du bois. Pour ce faire, il faut naturellement que les modélisateurs de la croissance aient délivré les empilements de cerne liés aux scénarios sylvicoles dont on souhaite simuler les effets. Cette délivrance est en effet indispensable pour "faire tourner" les ajustements établis à l'étape 1.

Ces simulations peuvent se faire en appliquant les ajustements de l'étape 1 établis au niveau "population d'arbres" ou au niveau "arbre". Une fois établie la cartographie des propriétés de base du bois "moyenne" ou "particulière" dans une grume de bois d'œuvre issue d'un scénario sylvicole donné, on est en mesure de décrire la carte des propriétés de base du bois dans les pièces débitées. On peut alors passer à la quatrième et dernière étape.

— **Étape 4** : calcul par la méthode aux éléments finis (MEF) des déformations au séchage des pièces décrites de manière détaillée à l'étape 3.

Dans cette étape 4, il est prévu de procéder à des validations expérimentales sur des planches bien typées (par exemple des planches qui, de par leur position et leur arbre d'origine, "répondent" bien aux calculs par MEF) afin de s'assurer que les déformations calculées des planches sont proches des déformations mesurées.

À titre d'illustration de l'application de cette démarche et des résultats déjà obtenus sur ces étapes 1, 2, 3 et 4 de la Convention ONF-INRA "Sylviculture et Qualité du bois de Chêne (Chêne rouvre)", nous renvoyons le lecteur à l'article de Nepveu proposé pour publication dans le *Bulletin technique de l'Office national des Forêts*. Basé sur l'établissement d'ajustements intraarbres de la densité, des retraits et de l'angle du fil du bois, cet article présente des résultats de simulation des effets de deux sylvicultures (une sylviculture dite dynamique et une sylviculture dite classique) sur les profils de ces propriétés de base du bois de la moelle à l'écorce ainsi que sur les déformations au séchage de planches de dimensions commerciales. Ces modèles et ces simulations ont été établis au niveau "population d'arbres" et au niveau "arbre".

LES GRANDES ÉTAPES DE LA MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE

Nous avons vu ci-dessus les quatre étapes de la démarche "modélisatrice" que nous mettons en œuvre dans le cadre d'une étude particulière. En fait, ces quatre étapes sont applicables de manière générale pour toute étude de modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance. Rappelons les traits généraux des quatre étapes dont nous avons vu plus haut une application à un cas particulier :

● **L'étape 1** consiste à modéliser la variabilité intraindividuelle des propriétés de base du bois **supposées importantes** pour la qualité des produits finis considérés. Le choix des propriétés de base à modéliser mérite une réflexion approfondie afin de ne retenir que celles que l'on sait peser sur la qualité du bois des produits finis à considérer ; à ce stade donc, une connexion étroite avec les acteurs de l'étape 4 est primordiale.

Cette étape 1 doit se traduire par la délivrance d'ajustements généraux (par exemple établis au niveau d'une population d'arbres) ou d'ajustements établis arbre par arbre de la forme :

propriété de base du bois = f (largeur de cerne, âge depuis la moelle et, si nécessaire, hauteur dans l'arbre).

Pour certaines propriétés de base du bois, il peut être nécessaire d'ajouter à ces ajustements une variable explicative "âge depuis l'écorce" ou "âge depuis la limite duramen-aubier", par exemple si l'on s'intéresse à la modélisation de la couleur du bois, du taux d'extractibles, de l'humidité dans l'arbre sur pied,...

L'intérêt de tels ajustements est qu'ils se présentent sous une forme directement connectable avec des "sorties" de modèles de croissance en hauteur et en grosseur. On notera au passage que, du fait du poids souvent important des paramètres "âge depuis la moelle" et "largeur de cerne" sur les propriétés de base du bois, il est tout à fait capital que ces modèles de croissance soient des "modèles d'arbre" et non pas simplement des modèles de peuplement. En effet, un modèle de croissance "peuplement" ne peut conduire qu'à la délivrance de la qualité du bois des pièces tirées de l'arbre moyen, ce qui est une information très insuffisante pour l'industriel qui est aussi — pour ne pas dire (écrire) surtout — intéressé par la distribution de la qualité du bois des pièces qu'il peut espérer tirer du peuplement qu'il est susceptible d'acheter.

Nous soulignerons que la partie expérimentale de cette étape 1 peut représenter un travail technique considérable afin d'établir des ajustements "propres" statistiquement : il faut en effet échantillonner souvent lourdement à l'intérieur d'un nombre assez élevé d'arbres.

Si l'on reprend l'exemple de la Convention ONF-INRA précitée, il sera par exemple nécessaire de fendre entre 45 000 et 50 000 éprouvettes et d'en mesurer l'angle du fil afin de délivrer des modèles solides de variation de cette importante propriété de base et d'en évaluer la variabilité en fonction des arbres et des sites (cf. étape 2).

Cette étape 1 est à raisonner très soigneusement en terme d'échantillonnage puisque c'est le corpus de données et, partant, d'ajustements, qui va en être issu qui va servir à "faire tourner" les simulations ultérieures ; ainsi, par exemple, si l'on souhaite par la suite évaluer l'effet de scénarios sylvicoles hyperdynamiques sur la qualité du bois, il aura fallu prendre le soin, pour cette étape 1, d'inclure dans l'échantillonnage des arbres présentant des accroissements très soutenus.

● **L'étape 2** va consister à évaluer et à étudier le déterminisme de la variabilité des **paramètres** délivrés par l'étape 1 : effet "arbre", effet "génotype", effet "sylviculture", effet "milieu" et... effets de leurs interactions. En d'autres termes, elle va consister à évaluer tous ces effets "à croissance bloquée".

À réaliser en général sur l'échantillonnage rassemblé pour mettre en œuvre l'étape 1, cette étape 2 n'est pas sans soulever des problèmes d'ordre statistique encore mal maîtrisés (analyse de la variabilité de **paramètres** et non de données de base,...).

Cette étape 2 est très importante car elle va délivrer des informations très riches et qui peuvent permettre, en fonction des résultats des analyses réalisées, d'envisager des économies radicales pour des études ou évaluations ultérieures de la qualité des bois.

Ainsi par exemple, l'identification de la variabilité "arbre" des paramètres des ajustements de l'étape 1 ouvre-t-elle la perspective de simuler la distribution de la qualité du bois d'une population d'arbres dont on connaîtrait les caractéristiques de croissance.

Si l'on revient quelques instants à titre d'exemple sur la Convention "Sylviculture et Qualité du bois de Chêne" évoquée précédemment, l'absence d'effet "site" sur l'ajustement donnant l'angle du fil du bois dans l'arbre en fonction de l'âge depuis la moelle nous autorise-t-elle à appliquer partout — au niveau "population d'arbres" — ledit ajustement. Cet ajustement a certes coûté cher à établir (26 sites, 2 arbres par site, plus de 29 000 données de base) mais il est établi une bonne fois pour toutes et il pourra resservir !

Ainsi par exemple, l'absence d'effet "site" et d'effet "sylviculture" sur l'ajustement donnant la densité du bois de l'Épicéa commun en fonction de la largeur de cerne et de l'âge depuis la moelle (Mazet *et al.*, 1990) autorise-t-elle à utiliser cet ajustement — établi sur un nombre assez élevé mais raisonnable d'arbres et d'échantillons — dans une très large zone géographique, et ce quelle que soit la sylviculture appliquée.

● **L'étape 3** a en quelque sorte pour objet de réaliser des "images informatiques" décrivant l'intérieur de la ou des grumes considérées (cartographie des propriétés de base) et des produits débités pouvant en résulter par sciage, déroulage ou tranchage. Ceci, à partir des ajustements établis antérieurement et de leur injection dans les empilements de cerne des grumes délivrés par les modèles de croissance. Les fichiers correspondant à ces "images" vont servir à classer les billons ou les pièces de bois en fonction des règles existantes ou à venir basées sur un certain nombre d'attributs (cf. introduction, pp. 35-36).

Si l'on souhaite dépasser le simple classement des billons et des pièces en fonction des règles existantes pour aller jusqu'à l'évaluation des propriétés technologiques des pièces, les fichiers descriptifs de ces pièces vont être utilisés par l'étape 4.

L'importance du travail à réaliser pour cette étape 3, que l'on aurait grand tort d'assimiler uniquement à de l'informatique "vulgaire", ne doit pas être sous-estimée. Il n'est qu'à mesurer la tâche à accomplir pour créer une image artificielle d'un placage de Chêne — évaluable par le consommateur — à partir de la cartographie tridimensionnelle de la structure anatomique et de la couleur dans la grume de départ.

Par ailleurs, nombre de problèmes d'ordre statistique demeurent encore à régler avant d'être capable de simuler, pour une sylviculture appliquée à une population d'arbres, la distribution (multivariée) des propriétés du lot de planches en résultant par sciage. Nous pensons en particulier au problème des relations pouvant exister entre les différentes propriétés de base nécessaires à la description de l'intérieur de la grume (par exemple, la relation existant à l'intérieur d'un verticille entre le diamètre et l'angle des branches ou la relation entre retrait tangentiel et retrait radial du bois). En dépit des progrès accomplis au cours de la dernière période, il n'existe pas encore à notre connaissance de logiciels de simulation de qualité des débits qui soient capables de tenir compte de ces interrelations entre propriétés.

● **L'étape 4** est la dernière étape de la modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance. Elle doit être mise en œuvre si l'on souhaite estimer (il s'agit là encore de modélisation) la ou les propriétés technologiques de la pièce ou du lot de pièces décrite (s) en terme de distribution de ses propriétés de base au cours des deux ou trois premières étapes de la modélisation : il peut s'agir d'une ou de plusieurs propriétés mécaniques d'une poutre, de ses déformations au séchage, du temps mis pour la sécher,... On peut aussi penser à des propriétés de produits mettant en jeu une forte interaction avec les processus de mise en œuvre tels des placages déroulés ou tranchés.

En général, cette modélisation se réalise grâce à une technique appelée "méthode aux éléments finis" qui recourt largement à la mécanique, au calcul numérique et peut aussi engager d'autres disciplines telle la physique (par exemple la physique des transferts de chaleur et de masse pour la modélisation du séchage).

À l'instar des étapes précédentes, cette étape 4 doit être soumise au "juge de paix" de la validation qui consistera ici à comparer les propriétés technologiques des pièces calculées à celles des pièces réelles.

Il vaut d'être noté qu'au cours de cette étape 4, on pourra envisager de modéliser le comportement technologique des pièces en fonction d'une description plus ou moins fine de leur structure : cette

Concepts

description peut aller de la répartition des propriétés physiques du bois, appréciées à l'échelle du groupe de cernes voire de la pièce entière (exemple : la densité moyenne de la pièce), à une description de l'anatomie du bois au niveau intracerne.

Remarquons enfin que, si cette étape 4 est présentée ici en bout de chaîne, elle peut aussi être envisagée en préliminaire à toute opération de modélisation de la qualité du bois afin de tester la sensibilité du comportement technologique des pièces aux variations possibles (en général connues en terme d'écart-type au travers de la bibliographie) de telle ou telle propriété de base. Si par exemple on constate, en faisant "tourner" la méthode aux éléments finis, que, dans sa plage de variation naturelle, le retrait longitudinal n'est que d'un poids très faible par rapport aux autres propriétés de base du bois sur les déformations de la pièce au séchage, on hésitera à engager des dépenses pharaoniques en mettant en œuvre pour ce caractère les étapes 1 et 2 préalablement décrites de la modélisation.

LES AVANTAGES ET LES LIMITES DE LA MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE PAR RAPPORT AUX MÉTHODES CLASSIQUES D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ

L'utilisation d'une "démarche modélisatrice" pour prévoir la qualité du bois en fonction du scénario sylvicole (entendu dans son acception la plus large) en est encore assez largement à ses balbutiements. Bien peu d'études complètes peuvent être citées en exemple car il y manque très souvent des ingrédients, au premier rang desquels il faut citer des validations convaincantes. Cette démarche est en outre souvent mal comprise pour ne pas écrire qu'elle est considérée avec une certaine suspicion.

Nombre de chercheurs qui s'intéressent au contrôle de la qualité du bois "par les moyens naturels" mettent encore en œuvre une méthode classique dont on peut décrire les étapes de la façon suivante :

- 1 - Installation de dispositifs dans lesquels on fait varier les facteurs à tester (sylviculture, milieu, génotype) ;
- 2 - Attendre que cela pousse ;
- 3 - Débiter les arbres quand ils ont atteint des dimensions correspondant à l'utilisation industrielle visée pour les produits ;
- 4 - Comparer la qualité du bois (par exemple le classement ou les propriétés technologiques) des produits issus des groupes d'arbres à comparer.

Les **avantages** de cette démarche classique par rapport à la modélisation sont nombreux : maîtrise parfaite des sources de variation, validations inutiles, pas de problèmes avec les statistiques, mesure directe des propriétés technologiques des produits donc inutilité de s'investir dans des techniques de modélisation assez lourdes à maîtriser et à mettre en œuvre telle la méthode aux éléments finis.

Cette démarche classique **n'est toutefois pas sans inconvénients** si nous la comparons à une approche modélisatrice : elle est d'abord coûteuse en temps (il faut attendre que les dispositifs poussent) et en échantillonnage. Elle peut d'ailleurs se traduire par des problèmes assez insurmontables si les arbres provenant des traitements sylvicoles comparés présentent des dimensions tellement différentes qu'il est possible, à un instant donné, de tirer des pièces industrielles de ceux qui ont crû rapidement alors que cela est impossible pour d'autres. De plus, la démarche classique s'oppose largement à toute généralisation des résultats : si l'on change de dispositif, de source de variation envisagée, il faudra tout recommencer. Enfin, de par son caractère très technique, elle est beaucoup moins excitante et procure moins de satisfaction (quand les validations marchent !) sur le plan intellectuel.

LES DEUX GRANDS TYPES D'OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE. LES SORTIES POSSIBLES

Deux grands types d'objectifs sont poursuivis par l'approche modélisatrice de la qualité du bois : des objectifs que l'on peut qualifier de "statiques" et des objectifs "dynamiques".

- Des objectifs statiques : il s'agit de répondre à des questions du genre de celle-ci :

« Je dispose d'une description "dendrométrique" instantanée de la ressource en place (hauteur totale, diamètre à 1,30 m et âge des arbres), quid de la qualité des produits que je puis en tirer ? ». Ceci s'entendant naturellement en interaction avec les procédés de transformation et de mise en œuvre.

Un exemple d'application est donné par l'évaluation de la qualité du bois des pièces tirées d'un massif, d'un peuplement à partir des données sommaires du type de celles collectées et délivrées par l'Inventaire forestier national.

Dans ce cas, on ne dispose pas d'informations sur l'origine génétique des arbres, ni sur leur passé sylvicole.

- Des objectifs dynamiques : il s'agit cette fois de répondre à la question suivante :

« J'ai le choix entre plusieurs génotypes, plusieurs sites d'installation de mon peuplement, plusieurs sylvicultures. Quelle qualité de produits puis-je en espérer quand je déciderai d'exploiter ? ».

Entre ces deux types d'objectifs bien tranchés, on peut imaginer des **objectifs mixtes** dont le propos peut être, à titre d'exemple, ainsi résumé :

« Je dispose d'une description dendrométrique sommaire de la ressource en place (cf. objectifs statiques), quelle sylviculture lui appliquer afin d'en tirer dans 20 ans des produits de telle ou telle qualité ? ».

Il est inutile de préciser que l'on est encore loin de répondre de manière satisfaisante à une telle question.

Pour plus de détails sur les objectifs, les sorties et la mise en œuvre de la modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance, on se reportera à l'article de Houllier *et al.* (1995) qui présente l'acquis déjà important disponible en France sur l'Épicéa commun grâce à une coopération très intense entre les Programmes "Croissance" et "Qualité des Bois" du Département des Recherches forestières de l'INRA.

LES (NOMBREUSES) DIFFICULTÉS RESTANT ENCORE À SURMONTER EN MATIÈRE DE MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DU BOIS EN FONCTION DES CONDITIONS DE CROISSANCE

Si nous sommes convaincu de l'intérêt de la démarche "modélisatrice" de prévision de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance, nous ne mésestimons pas que la voie à suivre est semée d'embûches nombreuses.

La première d'entre elles regroupe les problèmes statistiques liés principalement à la modélisation intra- et interarbre des propriétés de base du bois (étapes 1 et 2 citées plus haut), c'est-à-dire, pour résumer, les problèmes rencontrés pour alimenter, gérer et "faire parler" de manière optimale les énormes bases de données qui se mettent en place. Sans prétendre à l'exhaustivité, citons l'identification "économique" des paramètres des modèles, l'enchaînement des erreurs et les corrélations entre les modèles relatifs aux différentes propriétés de base du bois considérées, l'estimation à grande échelle réaliste des paramètres des modèles intraarbres donnant l'anatomie du bois.

Concepts

Le second groupe de difficultés à surmonter concerne l'écriture de logiciels conviviaux permettant de décrire l'intérieur des grumes et les pièces résultant de leur débit (moyenne et distribution multivariée de leurs propriétés) à partir d'entrées décrivant le scénario sylvicole appliqué (étape 3). Le retard pris actuellement dans cette étape nous semble être un obstacle majeur à la valorisation des modèles de croissance et de qualité des bois mis à jour par les chercheurs en direction des décideurs forestiers et des industriels utilisateurs de la ressource.

Le troisième groupe de difficultés est relatif au manque actuel de modèles de croissance et de branchaison indispensables pour "faire tourner" les modèles de qualité du bois. Ceci, pour plusieurs essences importantes. Sans même évoquer ici les cas de la forêt mélangée, de l'agroforesterie et de la forêt paysanne, ceci concerne déjà le cas de peuplements "classiques" monospécifiques et (à peu près) équiennes. Répétons que les modèles de qualité du bois ne peuvent être mis en œuvre sans modèle de croissance donnant les emplacements de cerne dans **tous** les arbres du peuplement considéré (modèles de croissance "arbre").

CONCLUSIONS

Aujourd'hui, nous considérons que des résultats déjà significatifs ont été obtenus en matière de modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance. Ces résultats ont finalement été acquis à partir d'une démarche qui repose pour beaucoup sur les statistiques. Il nous apparaît qu'en continuant d'appliquer une telle démarche, beaucoup peut encore être obtenu.

Notre interrogation pour l'avenir concerne l'intérêt d'injecter des "entrées physiologiques" (au sens large) pour améliorer la qualité des modèles (de croissance et de la qualité du bois) déjà disponibles.

La taille de nos équipes et les perspectives assez sombres du futur proche en la matière nous font encore hésiter à nous engager dans cette voie dont la fécondité ne nous semble pas, dans ces circonstances, assurée.

G. NEPVEU

Équipe de Recherches sur la Qualité des Bois

INRA

F-54280 CHAMPENOUX

BIBLIOGRAPHIE

- CINOTTI (B.). — La Gélivure des Chênes : front de gel source de contraintes internes, incidence des propriétés anatomiques et mécano-physiques. — Nancy : INPL ; Champenoux : Station de Recherches sur la Qualité des Bois, Centre INRA de Nancy, novembre 1989. — 160 p. (Thèse de Docteur en Sciences du Bois).
- COLIN (F.). — Modélisation de la branchaison de l'Épicéa commun en vue de prédire la qualité de la ressource. — Nancy : ENGREF ; Champenoux : Station de Recherches sur la Qualité des Bois, Centre INRA de Nancy, 15 mai 1992. — 270 p. (Thèse de Docteur en Sciences forestières).

G. NEPVEU

- FOURCAUD (T.). — Analyse du comportement mécanique d'une plante en croissance par la méthode des éléments finis. — Université de Bordeaux, 1995. — 148 p. (Thèse de Docteur en Mathématiques appliquées).
- FOURNIER (M.). — Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. — Nancy : INPL, 1989. — 257 p. (Thèse de Docteur en Sciences du Bois).
- HOULLIER (F.), LEBAN (J.-M.), COLIN (F.). — Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. — *Forest Ecology and Management*, 74, 1995, pp. 91-102.
- MAZET (J.-F.), NEPVEU (G.), VELLING (P.), DERET-VARCIN (E.). — Étude des effets de quelques paramètres sylvicoles et environnementaux sur la densité du bois de l'Épicéa commun, du Sapin pectiné et du Pin sylvestre dans le Nord-Est de la France. In : Actes du 3^e Colloque "Sciences et Industries du Bois", ARBORA, 14-15 mai 1990. — Tome II, pp. 537-546.
- NEPVEU (G.). — Convention ONF-INRA 1992-1996 "Sylviculture et Qualité du bois de Chêne (Chêne rouvre)". Le point sur les travaux en cours liés à la qualité interne du bois. — Proposé pour publication dans le *Bulletin technique de l'ONF*.
- PERRÉ (P.). — Analyse d'images et modélisation mathématique : deux outils pour comprendre et mieux utiliser le matériau bois. — *Revue forestière française*, numéro spécial "Informatique et Foresterie", 1993, pp. 166-178.
- PERRÉ (P.). — Transferts couplés en milieux poreux non saturés. Possibilités et limitations de la formulation macroscopique. — Nancy : INPL, 1992. — 223 p. (Mémoire de soutenance d'Habilitation à diriger des Recherches).
- POLGE (H.). — Aptitudes technologiques des bois à croissance rapide. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 23, 1992, pp. 89-99.