



HAL
open science

Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance

Jean Bouchon

► **To cite this version:**

Jean Bouchon. Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance. *Revue forestière française*, 1995, 67 (S), pp.23-34. 10.4267/2042/26715 . hal-03444419

HAL Id: hal-03444419

<https://hal.science/hal-03444419v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONCEPTS ET CARACTÉRISTIQUES DES DIVERS MODÈLES DE CROISSANCE

J. BOUCHON

PRÉSENTATION

Quels que soient les objectifs visés — production ligneuse, fonctions de protection, fonctions sociales — gérer une forêt consiste à opérer périodiquement des choix. Pour cela le forestier dispose d'outils de gestion comme les méthodes d'aménagement, les techniques d'inventaire et de description des parcelles, les tarifs de cubage, etc. C'est dans cette perspective de mise au point d'outils d'aide à la décision que se sont développés les modèles de croissance et de production.

On présente ici les divers principes, concepts et définitions retenus en matière de modélisation de la croissance et de la production. Ces termes sont classés en fonction de plusieurs critères : le niveau modélisé, les usages des modèles, les types de modèle, les phases de construction du modèle, etc.

On présente ensuite, à titre d'exemple, un modèle de prévision de ressources régionales, dans le but d'illustrer les divers termes présentés.

DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

La complexité des problèmes qui se posent lorsqu'on souhaite analyser et simuler la réponse des peuplements soumis à des traitements différents, d'origine génétique diverse et dans des milieux variés, nécessite l'emploi de méthodes qu'on regroupe sous le terme générique de **modélisation**.

Cet article reprend en grande partie la typologie des modèles présentée dans Houllier, Bouchon et Birot (1991) ; il vise d'une part à préciser la signification du terme "modélisation", et d'autre part à illustrer la diversité des approches utilisées. L'accent y est clairement mis sur la **production ligneuse** ; cela n'implique en aucun cas que les objectifs de production doivent systématiquement être privilégiés, et cela n'exclut nullement que la modélisation ne puisse aussi être appliquée pour analyser d'autres aspects du fonctionnement et de la gestion des peuplements forestiers.

Comme toute discipline naissante, la modélisation a vu se développer un vocabulaire spécifique portant sur des notions nouvelles : s'il faut reconnaître cette nouveauté, il faut bien admettre aussi que ces notions ne présentent, souvent, guère plus d'intérêt que celui d'avoir été définies. On se gardera donc de sacraliser les définitions qui vont suivre.

Dans une large mesure, l'imprécision et l'ambiguïté du terme "modélisation" tiennent au succès même de la "**méthode des modèles**" que Legay (1973) a assimilé, d'une manière alors prémonitoire, à "l'état actuel de la méthode expérimentale". Sans entrer dans le détail des diverses acceptions du terme de modèle, il a paru utile de préciser la nôtre, dans le contexte de l'étude de la croissance des peuplements.

La **modélisation** consiste à réduire une réalité complexe à un système structuré d'éléments et de relations, en vue d'un objectif à atteindre ; le **modèle**, résultat de la modélisation, est plus simple et plus maniable que la réalité ; de plus, si on accepte ce principe de parcimonie, le meilleur modèle sera le système le plus simple permettant d'atteindre l'objectif fixé (et non pas le plus proche de la réalité). Avec cette définition, le mot modèle a la même signification que dans l'expression "modèle réduit" par exemple ; mais il n'a pas de connotation normative comme dans "modèle à suivre" ou "top model".

La **croissance** est l'ensemble des phénomènes biologiques qui président au développement des organismes vivants. L'**accroissement** est ce qui en résulte, ce que l'on peut observer ou mesurer. Dans la pratique les deux termes sont souvent confondus. On parlera par exemple de modèles de croissance, comme si les modèles obtenus pouvaient rendre compte des mécanismes de croissance alors qu'ils ne sont en général qu'une représentation simplifiée des accroissements observés. On aura ainsi des modèles de croissance en hauteur ou en surface terrière. Mais on emploiera l'expression modèle de **production** pour les modèles de croissance en volume.

La notion de modèle est, dans l'absolu, suffisamment générale pour qu'on puisse qualifier de modèle une simple relation d'allométrie comme un tarif de cubage. Les tarifs constituent en fait des modèles structurels qui résument la relation entre la hauteur et le diamètre d'une part et le volume d'autre part : on dit qu'on a affaire à des **modèles statiques** dans la mesure où ces relations ne rendent pas compte de la croissance des arbres.

Dans la suite, nous ne considérerons que des **modèles dynamiques** qu'on peut définir comme des systèmes structurés de relations mathématiques, statistiques ou logiques qui représentent l'évolution dans le temps d'un ensemble de variables descriptives.

Les notions de modèles quantitatifs et de modèles qualitatifs

L'acception courante du terme de modèle sous-entend généralement une approche quantitative, purement numérique, et la plupart des modèles qui existent aujourd'hui sont de ce type. Toutefois, cela ne devrait pas forcément être le cas et on peut envisager la prise en compte de certaines relations qualitatives ; par exemple, par des représentations logiques du type "si... alors". On aboutit à de telles relations lorsqu'on s'intéresse à la stabilité des peuplements (Becquey et Riou-Nivert, 1987). On débouche alors naturellement sur des modèles plus proches des **systèmes à base de connaissances** ou des **systèmes-experts** dont le développement reste embryonnaire dans le domaine forestier (Bachacou et Dupouey, 1988). Il s'agit de systèmes informatiques qui permettent de simuler le comportement d'un "expert" pour une certaine gamme de situations et qui contiennent, en général, une base de faits (ceux qui relèvent de la situation particulière étudiée), une base de connaissances quantitatives et/ou qualitatives, numériques et/ou logiques (celles qui s'appliquent à la gamme de situations envisagées) et un moteur d'inférence qui permet de déduire des faits nouveaux ou d'infirmer des faits supposés à partir des faits existants et des connaissances disponibles.

Il ne faut pas non plus négliger le fait que certaines questions sur la croissance peuvent recevoir des réponses qui ne font pas l'objet d'un modèle dynamique. Par exemple, si on étudie la capacité des arbres à réagir à l'éclaircie, il peut suffire d'organiser une expérience destinée à mettre en évidence cette réaction sans avoir immédiatement à construire de modèle (Bouchon, Dhôte et Lanier, 1989) ; la connaissance ainsi obtenue peut d'ailleurs être ultérieurement incluse dans un modèle, à condition qu'on puisse la généraliser hors du contexte expérimental et local où elle a été acquise.

NIVEAU MODÉLISÉ

La modélisation peut s'appliquer à divers niveaux de croissance. Il est bien clair qu'on peut décrire la croissance d'une branche, d'un rameau, d'une feuille, d'une cellule ou d'éléments encore plus petits. En matière de gestion forestière, on ne descend pas à des niveaux si fins. Les trois principaux niveaux auxquels travaillent les chercheurs sont les suivants :

Les **modèles de ressources régionales** : les grandeurs dont on cherche à rendre compte sont des moyennes ou des caractéristiques globales ; le but est d'avoir des informations sur des superficies étendues, le plus souvent en liaisons avec des objectifs d'aménagement du territoire (ressources disponibles, implantations industrielles, etc.). L'Inventaire forestier national travaille à cette échelle, et l'une de ses équipes a pour mission de bâtir de tels modèles.

Les **modèles de peuplement** : ces modèles rendent compte des paramètres observés au niveau des peuplements forestiers, c'est-à-dire sur des superficies de l'ordre d'un hectare. Les tables de production sont les ancêtres des modèles de croissance de peuplement. Les grandeurs modélisées sont la hauteur dominante, la hauteur moyenne, la surface terrière, le nombre de tiges, le volume et les accroissements correspondants. On peut modéliser de très nombreux facteurs à ce niveau : par exemple, la dynamique de la végétation, la distribution spatio-temporelle des caractéristiques génétiques, les sols, etc. Ces modèles peuvent déboucher sur des représentations cartographiques utiles au gestionnaire. Cependant le plus souvent ce sont aux modèles de production et de croissance de peuplement qu'on réserve le nom d'outil d'aide à la gestion ; on les regroupe parfois sous le nom de **modèles de gestion**, bien que ce terme puisse aussi s'appliquer aux modèles régionaux.

Les **modèles d'arbre** visent à rendre compte de la croissance et du développement individuel des arbres. Leur élaboration a été rendue nécessaire par le fait que le niveau de l'arbre est plus pertinent à considérer lorsque l'on veut connaître les effets d'un type de traitement sans l'avoir pratiqué ; il faut alors pouvoir s'appuyer sur les phénomènes qui conditionnent ces effets à un niveau plus bas que celui des caractéristiques de peuplement. La construction des modèles d'arbre se révèle alors nécessaire pour atteindre une précision impossible à obtenir par les modèles de peuplement. On construit parfois des modèles se situant à un niveau intermédiaire entre les arbres et le peuplement : il s'agit de modèles rendant compte des distributions par catégories de grosseurs ou de qualité de produits.

On emploie parfois abusivement les expressions "modèle d'arbre" pour "modèle de croissance d'arbre" et "modèle de peuplement" pour "modèle de croissance de peuplement".

USAGES DES MODÈLES

Les modèles visent en général à rendre compte de l'influence sur la croissance d'un certain nombre de facteurs comme le milieu, le matériel végétal utilisé ou la sylviculture appliquée.

En la matière, les gestionnaires se posent habituellement deux types de questions complémentaires :

— Des questions du type "**que se passera-t-il si... ?**" : elles apparaissent, par exemple, lorsqu'on cherche quelle va être la croissance d'un arbre après l'exploitation de ses voisins immédiats ou qu'on souhaite évaluer la perte de production globale liée à une faible densité de plantation.

— Des questions du type "**comment faire pour... ?**" : elles se posent, par exemple, lorsqu'on cherche la norme de sylviculture à appliquer pour obtenir des accroissements radiaux annuels de 2 mm pour le Chêne sur telle station de la forêt de Blois ou qu'on essaie de définir une séquence d'éclaircies qui maximise la production en volume ou en valeur de plantations à croissance rapide.

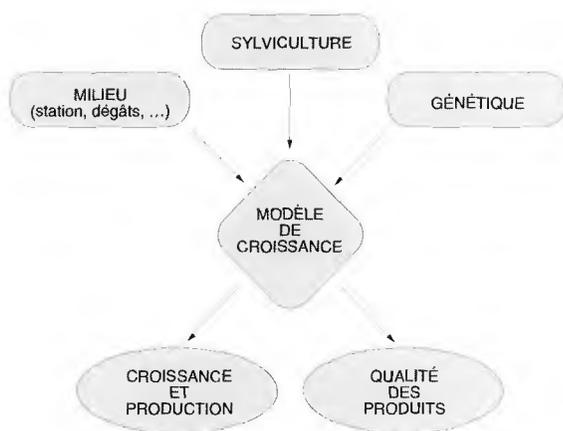
Les réponses attendues portent sur la croissance et sur la qualité des bois ; elles concernent non seulement les peuplements mais aussi les arbres. Il est ainsi clair que la sylviculture d'arbres de

place et, d'une manière plus générale, l'intensification des traitements pour certains types de peuplement posent des problèmes nouveaux qui requièrent des connaissances nouvelles, notamment sur les réactions individuelles des arbres aux traitements.

La figure 1 (ci-dessous) symbolise l'effort **d'intégration et de synthèse des connaissances** acquises par la recherche.

Figure 1

**INTÉGRATION ET SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES
SUR LA PRODUCTION DES PEUPELEMENTS AU TRAVERS DE LA MODÉLISATION :
REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE**



Au plan des "entrées": le milieu est par exemple traduit par un indice de fertilité (liaisons station-production), la génétique par un indice de vigueur et la réaction aux traitements représente le cœur du modèle.

Au plan des "sorties": la production totale des peuplements, la croissance individuelle des arbres et la qualité des produits constituent les principaux résultats auxquels s'ajoutent des informations qui permettent d'appréhender certains aspects qualitatifs (largeur de cerne, branchaison, nodosité, flexuosité,...).

Application des modèles à la gestion ou à la recherche ?

Le vocabulaire couramment usité n'est pas très précis et tend à accroître les risques de confusion. La notion de **modèles de gestion** n'a en fait pas grand sens. Il s'agit plutôt, en l'occurrence, de modèle (au sens que nous avons retenu) appliqué à la gestion, notamment par le biais de logiciels qui incluent des modules de calcul économique. On utilise parfois les expressions **modèles stratégiques** et **modèles tactiques**; là aussi, il vaudrait mieux dire que c'est l'utilisation envisagée du modèle qui est stratégique ou tactique et non le modèle lui-même. L'utilisation stratégique relèverait, par exemple, de grandes directives régionales ou nationales et sur le long terme, alors que l'utilisation tactique viserait plutôt à répondre à des questions concrètes se posant localement. Cependant, la question de l'horizon de prévision, sous-jacente à ces utilisations, n'est pas purement rhétorique; on pourrait penser que, pour faire de la stratégie, une grande précision n'est pas indispensable; il faut penser alors aux risques de dérives à long terme liés à l'utilisation successive et répétée de modèles de prédiction même simplement légèrement biaisés; l'exemple de la sous-estimation des possibilités est bien connu des aménagistes avec les conséquences que l'on sait sur le vieillissement des peuplements.

On tend souvent à confondre les deux notions de modèle dynamique et de **normes de sylviculture**. Si, au sens large, un modèle peut effectivement être utilisé comme une norme, un exemple à imiter, une limite vers laquelle tendre, si on suit la manière dont le mot modèle a été défini, et comme nous l'avons signalé plus haut, les modèles n'ont, en principe, pas de caractère normatif. Les **normes de sylviculture** relèvent aussi de la modélisation; mais les normes, au contraire des modèles, sont dominées par une référence à un objectif à atteindre; elles proposent au gestionnaire un choix de sylvicultures définies, le plus souvent, par les relations entre la hauteur ou l'âge du peuplement et le

Concepts

nombre de tiges par hectare. Elles s'assimilent à des règles à appliquer et permettent de répondre à des questions du type "comment faire pour... ?". Elles caractérisent donc des stratégies de sylvicultures, c'est-à-dire des successions cohérentes d'interventions aboutissant au résultat visé (exemple : pour produire des chênes de qualité ayant des accroissements fins et réguliers, on s'efforce, par des éclaircies successives, de maintenir le nombre de tiges par hectare au voisinage de la norme).

Les deux notions se rejoignent cependant dans la mesure où l'élaboration de normes de sylviculture peut s'appuyer sur des modèles dynamiques. Il est ainsi possible d'utiliser un modèle pour essayer de déterminer, sous certaines contraintes, un scénario sylvicole optimal au plan de la production totale. Le modèle est alors utilisé comme un **simulateur de croissance** qui permet, par exemple, d'analyser la réaction du peuplement à des éclaircies plus ou moins fortes et, ainsi, de répondre aux questions du type "que se passera-t-il si... ?". Si la modélisation a un aspect conceptuel, la **simulation de la croissance** se réfère à un usage des modèles : c'est le recours à un système, parfois physique, qui permet d'exploiter le modèle (Ottorini, 1991) ; les "modèles réduits" et la technique du "bac à sable" dans les procédures décisionnelles sont de bons exemples de systèmes de simulation. On peut illustrer cette différence sur le cas des études de résistance au vent des peuplements forestiers ; des théoriciens peuvent **modéliser** la circulation de l'air en se basant sur les lois de la dynamique des fluides (phase de conceptualisation) ; mais on peut **simuler** les effets du vent sur modèle réduit en soufflerie (recours à un système de simulation).

L'autre usage principal des modèles est la **prédiction de la croissance** en fonction du milieu, du potentiel de la station et du potentiel génétique. Parmi les moyens classiques de prédiction de la potentialité de la station, il faut citer l'**indice stationnel** (en anglais **site index**) ; c'est, le plus souvent, la première étape de construction des modèles de croissance ; le principe repose sur le fait que la potentialité des stations forestières est bien reliée à la hauteur dominante observée à un âge donné ; les courbes donnant la hauteur dominante en fonction de l'âge permettent d'estimer l'indice stationnel ; c'est, en général, la hauteur dominante atteinte à un âge proche de la moitié de la rotation (50 ans pour les résineux par exemple).

Il convient d'observer que l'application des modèles, leur utilisation, ne concernent pas que les aménagistes ou les industriels.

Bailly (1986) en donne un bon exemple quand il utilise des modèles de croissance en circonférence pour comparer la productivité de différents clones de peupliers soumis à divers traitements du sol. Becker (1989) est dans une situation analogue quand il construit un modèle dendroclimatique pour analyser la croissance radiale du Sapin dans les Vosges et mettre en évidence l'influence de certains paramètres climatiques. Dans ces deux cas, les modèles de croissance apparaissent comme des étapes, internes et intermédiaires, au sein d'un processus de recherche et l'on peut parler de **modèles de recherche**. Enfin, on peut ajouter que la grande valeur démonstrative des modèles fait qu'ils sont de plus en plus utilisés dans l'enseignement. On peut parler alors de **modèles didactiques**.

TYPES DE MODÈLES

Les types de modèles font référence à la manière dont sont intégrées dans les modèles les connaissances scientifiques acquises par ailleurs.

Les notions de modèles fonctionnels et de modèles empiriques

Une des caractéristiques essentielles de la biologie est de s'adresser à des objets complexes, des systèmes, qu'il est possible d'appréhender simultanément à plusieurs échelles (Di Castri et Hadley,

1988). Les systèmes forestiers fournissent un exemple éminent de cette situation et l'on peut aisément multiplier les niveaux qui mènent de la molécule (par exemple de CO₂) aux massifs forestiers régionaux en passant par la cellule, l'organe, l'arbre et le peuplement. En matière d'étude de la dynamique des peuplements forestiers, ce sont les niveaux d'organisation de l'arbre et du peuplement qui sont évidemment privilégiés.

Dans ces conditions, la distinction entre modèles fonctionnels et modèles empiriques ne peut guère être que relative à l'objectif visé, à la situation analysée, à l'échelle pour laquelle on veut des résultats. On peut ainsi essayer de préciser les définitions :

— À une échelle donnée, un **modèle fonctionnel** est un modèle qui incorpore des connaissances biologiques qui ressortent généralement de niveaux de description plus fins. **En ce sens** les modèles d'arbre sont des modèles fonctionnels lorsqu'on les utilise pour simuler l'évolution d'un peuplement. Cependant l'expression "modèle fonctionnel" est réservée habituellement aux modèles à base écophysiological, c'est-à-dire aux modèles de croissance intégrant des connaissances sur le fonctionnement et la physiologie des arbres.

— À cette même échelle, on parlera de **modèles empiriques** (ou de **modèles dendrométriques**) quand il s'agira de rendre compte des phénomènes observés à partir d'expérimentations, de placettes permanentes ou de données d'inventaire, sans essayer d'intégrer explicitement des connaissances sur les mécanismes et les processus élémentaires de croissance qui génèrent ces phénomènes.

Les tables de production apparaissent ainsi comme empiriques dans le contexte de l'aide à la gestion d'une parcelle. Elles sont presque fonctionnelles dans celui de l'évaluation de la ressource et de la disponibilité en bois à l'échelle d'une région.

L'une des raisons des succès actuels de la méthode des modèles tient au fait que les scientifiques ne cherchent plus systématiquement à établir des "lois" universelles et éternelles mais qu'ils s'efforcent de rendre compte de la réalité au travers de modèles. Ceux-ci sont alors considérés comme des instruments d'investigation ou de représentation de la réalité et sont, par essence, temporaires et contingents aux objectifs des recherches en cours : bien que certains phénomènes sous-jacents soient communs, on n'utilise pas nécessairement les mêmes modèles pour analyser ou simuler la réaction à l'éclaircie d'un peuplement donné ou pour prédire l'évolution de la ressource à l'échelle d'une région !

S'il nous semble donc qu'il faut clairement distinguer les notions de modèle fonctionnel et de modèle empirique, il ne faut pas non plus croire que les modèles sont totalement indépendants des connaissances sur le fonctionnement biologique des peuplements. Au contraire, puisqu'ils sont, selon la situation, soit des outils pour acquérir ou tester de nouvelles connaissances, soit des moyens d'intégrer des connaissances éparses afin d'apprécier leur cohérence ou de les utiliser dans un contexte finalisé : aide à la gestion, évaluation de la disponibilité, prédiction de la croissance, etc. (Dhôte, 1990 ; Houllier, 1990).

On n'entrera pas ici dans les divers types de modèles mis en œuvre au niveau des peuplements. On ne reprendra que la distinction classique entre **modèles d'arbre dépendants des distances** et **modèles d'arbre indépendants des distances**.

Pour pallier les insuffisances des modèles de peuplement (peu de connaissances biologiques, description globale des produits, difficulté à définir la notion de densité), les chercheurs ont changé d'échelle et se sont intéressés à l'étude de la croissance des arbres en fonction de leur environnement. Trois pistes ont été explorées :

— L'étude des arbres en situations extrêmes de densité (tout particulièrement hors concurrence) et, notamment, l'analyse des relations d'allométrie tige-houppier ont conduit à introduire la notion d'**espace vital** (Ottorini, 1978), c'est-à-dire de zone à l'intérieur de laquelle un arbre interagit avec

ses voisins. Au bout du compte, cette première approche a surtout permis de définir des **indices de densité** des peuplements, indices mesurant la pression de concurrence qui s'exerce dans le peuplement.

— À partir de la notion d'espace vital, de nombreux chercheurs ont proposé des **indices de compétition** empiriques tenant compte des dimensions relatives des arbres voisins, de leur distance et de leur orientation (effet de lisière, par exemple) et rendant compte de la concurrence locale au voisinage immédiat de l'arbre. Cette seconde piste n'a pas réellement débouché, ni sur des applications opérationnelles, ni sur des connaissances majeures car aucun de ces indices empiriques ne s'est clairement imposé (Dreyfus, 1988).

— Une approche plus fonctionnelle (au sens précité) a consisté à étudier l'évolution globale des houppiers hors concurrence, à analyser leurs interactions et leur développement dans les peuplements fermés puis à relier leurs dimensions à la croissance des tiges (Mitchell, Oswald et Ottorini, 1983).

Dans les modèles d'arbre dépendants des distances, la répartition spatiale des arbres est explicitement prise en compte au voisinage de chaque arbre, qui est connu et repéré par ses coordonnées le plus souvent ; au contraire des modèles indépendants des distances qui ne font appel qu'à des indices de densité globale et pour lesquels on ne connaît que la liste des arbres mais sans référence à leur localisation spatiale.

Même si les modèles d'arbre dépendants des distances ne débouchent pas sur des outils d'aide à la gestion d'utilisation courante, leur capacité de simulation offre de nombreux avantages : elle permet d'analyser l'influence de traitements alternatifs où la répartition spatiale des arbres est plus ou moins régulière ; ces modèles constituent une ébauche du fonctionnement de la croissance des arbres utile pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes.

Par leur simplicité, leur large spectre d'application, leur relative robustesse et leur efficacité, les modèles d'arbre indépendants des distances ont actuellement les "faveurs" des chercheurs et, surtout, des utilisateurs professionnels.

Les modèles architecturaux

Il s'agit de modèles plus détaillés, plus fins, développés autour de l'approche architecturale qui s'appuie sur une analyse approfondie des *principaux modes de croissance et de ramification* des végétaux et sur l'identification d'une vingtaine de patrons ou types architecturaux élémentaires (Hallé, Oldeman et Tomlinson, 1978). À l'aval de cette approche plutôt qualitative, des travaux assez récents ont permis d'aboutir à une quantification probabiliste des processus de ramification (exemple : probabilité de mort ou d'élongation d'un méristème) et de simuler et de représenter informatiquement le développement architectural de l'arbre (De Reffye, Édelin et Jaeger, 1989).

Si ces modèles ont jusqu'ici été peu appliqués dans un contexte forestier classique (Bouchon, 1995), force est de constater qu'ils sont utilisés dans des domaines connexes (paysagisme, par exemple) et qu'ils fournissent des outils pour aborder des questions touchant à la variation de l'éclairement au sein d'un peuplement ou à la forme des tiges, notamment au déterminisme de la fourchaison, à l'élagage et aux tailles de formation.

MODÉLISATION ET MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

Il est clair que la plupart des méthodes et techniques qui participent de la modélisation relèvent des mathématiques appliquées. La statistique, notamment les techniques de régression, y joue évidemment un rôle essentiel : analyse (préliminaire) des données, estimation des paramètres des modèles (ajustement), évaluation de leur précision et test d'hypothèses.

Dans cet arsenal, il semble nécessaire de citer la **validation du modèle** comme une phase importante de sa construction. La validation consiste à confronter le modèle, ses résultats, ses prédictions, les simulations qu'il permet avec des données réelles, en principe indépendantes de celles qui ont servi lors de la phase de construction. C'est cette opération qui permet de tester la qualité du modèle, son éventuelle possibilité d'être utilisé en dehors de la zone de validité des données utilisées au départ, etc.

Enfin, et au risque de se répéter, il n'est certainement pas possible de réduire la modélisation à la mise en œuvre d'une collection de méthodes plus ou moins sophistiquées relevant des mathématiques appliquées. Pour être efficace, pour être pertinente, c'est-à-dire pour répondre aux besoins des chercheurs comme à ceux des gestionnaires ou des décideurs, pour générer de nouvelles connaissances, la modélisation doit, elle-même, s'appuyer sur des connaissances.

La modélisation apparaît donc au bout du compte comme un processus, souvent itératif, où interagissent des **connaissances** relevant des sciences forestières ou, plus généralement, de la biologie, des **techniques** et des **méthodes** issues des mathématiques appliquées et les **objectifs** des utilisateurs.

PERSPECTIVES

Grâce à leurs capacités de synthèse des connaissances et aux possibilités de simulation qu'ils offrent, les modèles constituent des outils d'aide à la gestion et des instruments de recherche privilégiés. Il est raisonnable de penser que leur développement va se poursuivre en France, et que les principaux axes de ce développement vont porter :

- sur l'intégration de connaissances nouvelles avec la conception de modèles qui décriront plus finement les mécanismes écophysiologiques de la croissance (principalement dans la perspective de l'étude du fonctionnement des écosystèmes forestiers) ;
- sur la production d'informations concernant non plus seulement la croissance mais aussi la qualité des produits ;
- et sur la mise au point et la diffusion de logiciels facilement utilisables et qui intégreront des éléments de calcul économique.

Même si certaines méthodes, déjà évoquées, permettent de faire appel à des approches expérimentales plus légères, plus orientées sur l'arbre que sur le peuplement, la construction de modèles nécessite, et nécessitera :

- le recueil d'un volume important de données scientifiques et techniques de qualité dans des dispositifs expérimentaux ou des placettes semi-permanentes d'observation recouvrant des situations très variées, en termes de stations comme de traitements ;
- et l'adjonction de mesures nouvelles visant à compléter les données traditionnelles (âge, diamètre, hauteur) : citons, par exemple, les mesures du houppier (diamètre et longueur) qui restent encore trop rares.

Le coût du recueil de l'information en forêt est tel que la coopération entre les divers partenaires du secteur forêt-bois est nécessaire. C'est ainsi qu'un projet de **coopérative de données** a été lancé en France. Il n'est pas isolé et trouve des échos à l'étranger avec des projets similaires aussi bien dans l'Union européenne que dans l'ensemble de l'Europe ou dans le cadre de l'Union internationale des Instituts de Recherches forestières (IUFRO).

Enfin, à plus long terme, les connaissances actuellement dispersées dans le monde professionnel ainsi que la compétence acquise lors de la réalisation de tel ou tel modèle pourraient être rassemblées dans des **systèmes à base de connaissances** faisant appel aux méthodes de l'intelligence artificielle. C'est, au moins en partie, de cette manière qu'on peut raisonnablement espérer pouvoir faire face aux nouveaux problèmes qui vont se poser en matière d'aménagement forestier.

APPLICATION AU MODÈLE DE PRÉDICTION DES SUPERFICIES PLANTÉES EN DOUGLAS EN FRANCE

L'exemple de l'estimation de la superficie du massif français de Douglas est présenté ici dans le but d'illustrer les divers termes présentés ci-avant.

Rappel du modèle prévisionnel construit en 1981-1983

L'objectif était, à partir des informations du Fonds forestier national et des résultats de l'Inventaire forestier national, de bâtir un modèle prévisionnel des ressources françaises en Douglas. Un premier travail (Bouchon, 1979) avait montré, à partir des couples hauteur/âge observés, que, dans la plupart des départements français, l'accroissement moyen maximum pour cette espèce était voisin de 17 m³/ha/an. Le problème revenait donc à l'estimation des superficies boisées en Douglas. La difficulté principale vient du fait que, cette espèce étant en forte expansion, il n'est pas possible d'avoir une estimation correcte si on se contente d'additionner les derniers résultats de l'Inventaire forestier national (IFN) dans chaque département. L'IFN a, en effet, une périodicité de passage de 10 ans environ qui nécessite une mise à jour des inventaires réalisés en début de période lorsqu'on fait une estimation à une date donnée.

Le premier cycle de l'IFN s'est terminé en 1980 par les départements du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine. Le deuxième cycle a couru de 1976 (Puy-de-Dôme) à 1993 (Seine-et-Marne). Le troisième cycle est en cours et a commencé en 1987 (Allier). On voit que, si on voulait une estimation en 1980 par exemple, il fallait additionner aux inventaires réalisés en 1980, ceux réalisés les années précédentes mais affectés, pour chaque département, d'un facteur de correction tenant compte de l'expansion du Douglas entre l'année de l'inventaire du département et 1980.

Pour faire cette correction, nous disposons, en 1980 :

- des résultats publiés de l'IFN,
- des résultats de l'enquête sur l'utilisation du territoire (TERUTI, 1976),
- de l'annuaire des statistiques agricoles de la France (1978),
- des superficies plantées chaque année en Douglas et subventionnées par le Fonds forestier national (FFN).

À partir de ces données, on a bâti un modèle de prévision des superficies en Douglas (voir Bouchon, 1984).

On a trouvé le modèle suivant : $s(q) = \frac{q - 1959}{p - 1959} * s(p)$

qui fournit une estimation de la superficie $s(q)$ d'un département quelconque à l'année q en fonction de la superficie $s(p)$ observée l'année p (avec p et q supérieurs à 1962).

Avec les définitions retenues ci-dessus, c'est un modèle de prévision régionale :

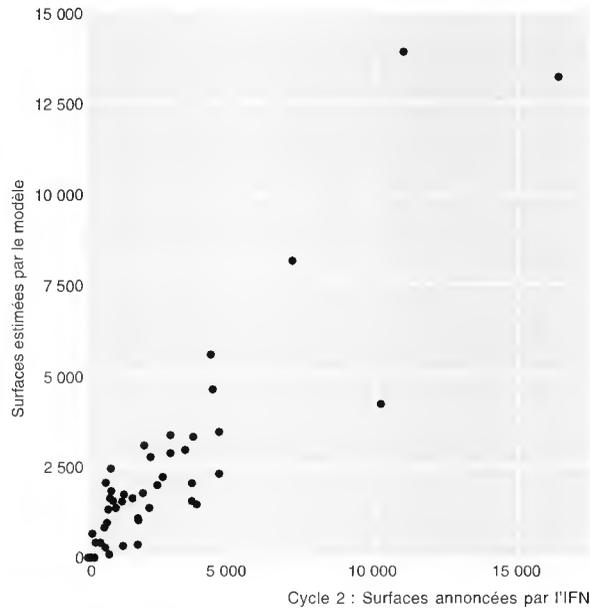
- il s'agit d'un modèle dynamique,
- son usage est la prédiction,
- la grandeur modélisée est la superficie boisée,
- le niveau de modélisation choisi est la région,
- c'est un modèle empirique.

Validation du modèle

On peut, douze ans après la publication de ce modèle, étudier, *a posteriori*, sa qualité prédictive. C'est ce qu'on appelle la phase de validation. Il suffit pour cela de porter sur un graphique les résultats effectivement fournis par l'IFN lors du deuxième passage et les prévisions obtenues en appliquant le modèle au premier passage de l'IFN dans chaque département.

On dispose de 49 départements permettant de valider le modèle : il s'agit des départements pour lesquels on a eu des mesures des superficies du Douglas lors des deux premiers cycles. Sur ces 49 départements, la somme des valeurs fournies par l'IFN était de 110 293 ha. La somme des estimations obtenues par le modèle était de 119 614 ha. La figure 2 (ci-dessous) montre la relation. Si le modèle était parfait, tous les points devraient être sur la première bissectrice.

Figure 2 **SURFACES PRÉDITES PAR LE MODÈLE EN FONCTION DES SURFACES TROUVÉES LORS DU DEUXIÈME PASSAGE DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN)**



On voit que le modèle sous-estime les résultats de l'IFN. Compte tenu des écarts observés, on propose le modèle recalibré suivant :

$$s(q) = \frac{q - 1959}{p - 1959} * s(p) * \frac{119\ 614}{110\ 293}$$

En appliquant ce modèle aux départements où l'IFN avait réalisé un premier passage mais pas de deuxième passage, et en se basant sur les mesures de l'IFN pour les départements où il y a eu un deuxième passage, on trouve, qu'en 1983, il devait y avoir environ 253 000 ha de Douglas en France.

Deuxième validation du modèle

On peut recommencer la validation du modèle précédent en comparant les estimations qu'il donne aux résultats fournis par l'IFN lors du troisième passage. Pour le troisième cycle, on dispose de 25 départements permettant de valider le modèle corrigé : il s'agit des départements pour lesquels on a eu des mesures des superficies du Douglas lors des deuxième et troisième cycles. Sur ces 25 départements, la somme des valeurs fournies par l'IFN était de 188 768 ha. La somme des estimations obtenues par le modèle était de 195 985 ha. La figure 3 (p. 33) montre la relation.

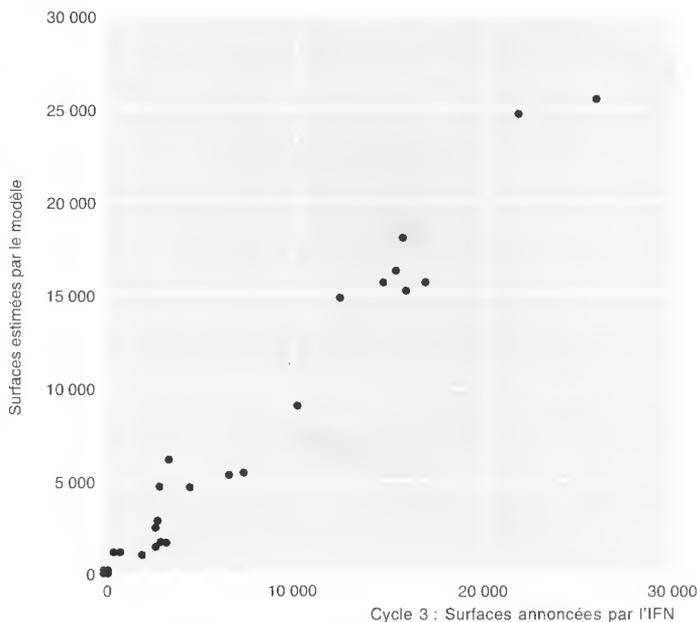
On voit que le modèle surestime les résultats de l'IFN. Compte tenu des écarts observés, on propose ce dernier modèle :

$$s(q) = \frac{q - 1959}{p - 1959} * s(p) * \frac{119\ 614}{110\ 293} * \frac{188\ 768}{195\ 985}$$

Concepts

En appliquant ce modèle aux estimations de 1983 lorsqu'il n'y a pas eu de troisième passage, et en se basant sur les mesures de l'IFN pour les départements où il y a eu un troisième passage, on trouve, qu'en 1993, il devait y avoir environ 375 000 ha de Douglas en France. Ces résultats peuvent être comparés aux estimations de l'IFN, environ 310 000 ha : cette valeur correspond à la somme des superficies enregistrées mais sans mises à jour.

Figure 3 **SURFACES PRÉDITES PAR LE MODÈLE EN FONCTION DES SURFACES TROUVÉES LORS DU TROISIÈME PASSAGE DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN)**



En résumé

Construire un modèle de croissance ou de production, c'est :

- se fixer un objectif à atteindre (potentialité du Douglas, modèle prévisionnel),
- choisir un niveau de représentation (ressources régionales),
- choisir un type de modèle (modèle statistique),
- valider le modèle et le corriger.

J. BOUCHON

Unité de Recherches sur la Croissance,
la Production et la Qualité des Bois

INRA

F-54280 CHAMPENOUX

BIBLIOGRAPHIE

- BACHACOU (J.), DUPOUEY (J.-L.). — Les Systèmes-experts, une aide au diagnostic en forêt ? — *Revue forestière française*, vol. XL, n° spécial "Diagnostics en forêt", 1988, pp. 149-155.
- BAILLY (A.). — Modélisation de la croissance en circonférence du peuplier : premiers résultats. — *Annales de Recherches sylvicoles, AFOCEL*, 1986, pp. 359-397.
- BECKER (M.). — The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of north-eastern France. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, 1989, pp. 1110-1117.
- BECQUEY (J.), RIOU-NIVERT (Ph.). — L'Existence de zones de stabilité des peuplements, conséquences sur la gestion. — *Revue forestière française*, vol. XXXIX, n° 4, spécial "Les chablis", 1987, pp. 323-334.
- BOUCHON (J.) Éd. — Architecture des arbres fruitiers et forestiers. Actes du Colloque de Montpellier, 23-25 novembre 1993. — Versailles : INRA, 1995. — 360 p. (Les Colloques INRA ; n° 74).
- BOUCHON (J.). — Importance des plantations de Douglas et Épicéa en France. — *Revue forestière française*, vol. XXXVI, n° 4, 1984, pp. 254-257.
- BOUCHON (J.). — Potentialités forestières en France : le cas du Douglas. — *Compte rendu de fin d'étude DGRST*, n° 78-7-2 540, décembre 1979. — 22 p.
- BOUCHON (J.). — Potentialité du Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en France. — Procès-verbal de la Séance du 3 mars 1982 de l'Académie d'Agriculture de France, 1982, pp. 441-449.
- BOUCHON (J.), DHÔTE (J.-F.), LANIER (L.). — Réaction individuelle de hêtres (*Fagus sylvatica* L.) d'âges divers à diverses intensités d'éclaircie. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 46, n° 3, 1989, pp. 251-260.
- DHÔTE (J.-F.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers, articulation entre les niveaux de l'arbre et du peuplement : applications à la sylviculture des hêtraies. — Lyon : Université Claude-Bernard (Lyon I), 1990. — 255 p. (Thèse de Doctorat).
- DI CASTRI (F.), HADLEY (M.). — Enhancing the credibility of ecology : interacting along and across hierarchical scales. — *GeoJournal*, vol. 17, n° 1, 1988, pp. 5-35.
- DREYFUS (Ph.). — Compétition et croissance de jeunes peuplements résineux ; aspects biologiques, écologiques et sylvicoles. — Université Aix-Marseille III, 1988. — 293 p. (Thèse de Doctorat).
- HALLÉ (F.), OLDEMAN (R.A.A.), TOMLINSON (P.B.). — Tropical trees and forest : an architectural analysis. — Heidelberg : Springer Verlag, 1978. — 441 p.
- HOULLIER (F.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : relations entre différents types de modèles. In : De la forêt cultivée à l'industrie de demain. 3^e Colloque "Sciences et Industries du Bois" (Bordeaux, avril 1990). — ARBORA, 1990. — pp. 471-481.
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspective. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- LEGAY (J.-M.). — La Méthode des modèles : état actuel de la méthode expérimentale. — *Informatique et biosphère*, 1973, pp. 1-73.
- MITCHELL (K.J.), OSWALD (H.), OTTORINI (J.-M.). — Modelling the growth of Douglas fir in France. — *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien*, 147, 1983, pp. 25-39 (Réunion IUFRO, Vienne, 1982).
- OTTORINI (J.-M.). — Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, n° 4, 1978, pp. 299-320.
- OTTORINI (J.-M.). — Growth and development of individual Douglas-fir in stands for applications to simulation in silviculture. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991, pp. 651-666.
- REFFYE (Ph. de), ÉDELIN (Cl.), JAEGER (M.). — La Modélisation de la croissance des plantes. — *La Recherche*, n° 207, 1989, pp. 158-169.