

# LA MODELISATION : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt.

F. Goreaud<sup>1</sup>, F. de Coligny<sup>2</sup>, B. Courbaud<sup>3</sup>, JF. Dhôte<sup>4</sup>, Ph. Dreyfus<sup>5</sup>, T. Pérot<sup>6</sup>,

<sup>1</sup> Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Complexes, Cemagref, 24 avenue des Landais - BP 50085, 63172 Aubière Cedex 1, France. [francois.goreaud@cemagref.fr](mailto:francois.goreaud@cemagref.fr), <sup>2</sup> INRA - AMAP, TA40/PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier Cedex 5, France. [coligny@cirad.fr](mailto:coligny@cirad.fr), <sup>3</sup> Ecosystèmes et Paysages de Montagne, Cemagref, 2 rue de la Papeterie - BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France. [benoit.courbaud@cemagref.fr](mailto:benoit.courbaud@cemagref.fr), <sup>4</sup> Laboratoire d'étude des Ressources Forêt-Bois (LRFoB), UMR INRA-ENGREF 1092, Centre de Recherches INRA, 54280 Champenoux, France. [dhote@nancy-engref.inra.fr](mailto:dhote@nancy-engref.inra.fr), <sup>5</sup> Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes (UR 629), INRA, 20 avenue Vivaldi, 84000 Avignon, France. [dreyfus@avignon.inra.fr](mailto:dreyfus@avignon.inra.fr), <sup>6</sup> Unité de Recherche Ecosystèmes Forestiers, Cemagref, Domaine des Barres, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France. [thomas.perot@cemagref.fr](mailto:thomas.perot@cemagref.fr)

**Résumé :** Pour prédire l'évolution des peuplements forestiers, et ainsi faciliter l'aménagement, les chercheurs ont mis au point différents types de modèles de dynamique forestière.

Dans cet article, nous illustrons l'intérêt de ces modèles comme outils pour la gestion. Nous présentons 3 applications : (i) dans un peuplement régulier de chênes, l'utilisation d'un modèle pour prendre en compte l'effet d'un changement de productivité sur la croissance ; (ii) dans un peuplement mélangé irrégulier épicéas - sapins, la comparaison par simulation d'un scénario sylvicole classique et d'un scénario d'éclaircies par trouées ; (iii) à l'échelle d'un massif forestier, la modélisation de l'évolution de la composition de peuplements mélangés. Nous discutons ensuite des limites des modèles ainsi que des perspectives de recherche.

**Mots Clef :** modèle, forêt, croissance, changement climatique, peuplement mélangé, peuplement irrégulier, régénération, sylviculture, aménagement forestier.

**Abstract :** In order to predict the evolution of forest stands, and thus to facilitate forest management, researchers have developed different types of models of stand dynamics.

In this paper, we illustrate the interest of such models as management tools. We consider three applications : (i) in a pure, even-aged oak stand, the use of a model in order to take into account the effect of productivity changes on growth ; (ii) in mixed, uneven-aged stands of spruce and fir, the comparison through simulation of a classical thinning to a thinning with openings ; (iii) in large-scale areas, the modelling of the dynamics of species composition of mixed stands. We finally discuss the limitations of models and future perspectives for research in this field.

**Keywords :** model, forest, growth, climate change, mixed stand, irregular stand, regeneration, silviculture, forest management.

## Introduction

Les forêts, qui recouvrent 29.6 % des terres émergées<sup>1</sup>, sont des écosystèmes complexes. Elles abritent de nombreuses espèces animales et végétales en interaction, et participent ainsi à maintenir une grande biodiversité. Elles jouent également un rôle important dans les grands cycles biogéochimiques, notamment au niveau du climat.

Dans de nombreux pays, la forêt est gérée : des forestiers planifient et organisent différentes actions sylvicoles (plantations de jeunes arbres, semis, coupes d'éclaircie pour favoriser la croissance des plus beaux arbres, récolte du bois produit, coupes et travaux facilitant la régénération naturelle), afin que la forêt réponde au mieux aux différents objectifs fixés en terme de production, de conservation, de protection et de loisir. Selon les

pays, cette gestion peut s'exprimer sous différentes formes et à différentes échelles (RFF, 1999).

En France, la gestion des forêts domaniales et de la majorité des forêts communales repose sur un document d'aménagement, qui, partant d'une analyse du milieu naturel et des besoins socio-économiques, propose une planification sur 15 à 20 années des actions de gestion sylvicole à entreprendre pour mener les peuplements vers un objectif précis en terme de production de bois, conservation de la diversité, et accueil du public. Cette planification nécessite de décrire l'état, à un instant donné, des différents peuplements d'un massif forestier, mais aussi de pouvoir prédire comment ces différents peuplements vont évoluer dans les 20 années à venir, en fonction des scénarios sylvicoles qui seront appliqués (Dubourdieu, 1997).

Les chercheurs s'intéressent depuis longtemps à la prédiction de l'évolution des peuplements forestiers, et s'attachent à mettre au

<sup>1</sup> Soit 3,9 milliards d'ha, source FAO [www.fao.org](http://www.fao.org).

point des outils pour aider les gestionnaires dans l'aménagement et la gestion des forêts (Pardé & Bouchon, 1988).

Les premiers de ces outils sont les tables de production. En France, la plupart ont été construites entre les années 1960 et 1980 pour une grande variété d'essences en restant dans le cadre de peuplements réguliers monospécifiques (ENGREF *et al.*, 1984). Elles se présentent sous la forme de tableaux de chiffres qui permettent de prédire l'évolution dans le temps d'un peuplement régulier, en fonction de la fertilité du lieu pour la sylviculture moyenne appliquée ou pour certains scénarios sylvicoles classiques. Ces tables de production sont en fait le résultat d'observations à long terme de l'évolution de peuplements de référence. Ces premiers outils présentent deux principaux inconvénients (Houllier *et al.*, 1991) : ils ne rendent compte que de l'évolution moyenne des peuplements, et, en général, ils ne permettent pas de simuler différents types de sylviculture ou de nouveaux scénarios.

Pour pouvoir prendre en compte la grande diversité des peuplements et des scénarios sylvicoles, les chercheurs ont construit d'autres outils à la fois plus souples et plus complexes : les modèles de croissance<sup>2</sup>. Les modélisateurs forestiers ont développé un grand nombre de modèles, statiques ou dynamiques, pour comprendre et prédire l'évolution des arbres et des peuplements. En ce qui concerne la prédiction de la croissance des arbres, par exemple, on peut distinguer, selon le niveau de détail souhaité, des modèles à l'échelle du peuplement, qui considèrent des variables moyennes du peuplement (comme la densité ou le diamètre moyen) ; des modèles de distribution, qui considèrent l'évolution du nombre d'arbres dans différentes classes de diamètre ; et des modèles à l'échelle de l'arbre, qui simulent l'évolution de chaque arbre individuellement, ou au moins pour certains arbres-types représentatifs d'une cohorte d'arbres ayant les mêmes caractéristiques (Houllier *et al.*, 1991). Bon nombre de ces modèles intègrent également la mortalité occasionnée par la concurrence entre arbres. D'autres types de modèles concernent divers éléments complémentaires : la régénération, la branchaison, ou l'élaboration de la qualité du bois. Ainsi, pour simuler l'évolution d'un peuplement forestier il est souvent nécessaire de faire intervenir toute une chaîne de modèles (Leban, 1995; Meredieu *et al.*, 2001a et 2001b).

La plupart de ces modèles sont trop complexes pour être utilisés directement dans des études analytiques, et doivent être implémentés dans un programme informatique pour être utilisés dans le cadre de simulations. On parle alors de simulateurs de dynamique forestière. Pour construire de tels simulateurs,

<sup>2</sup> Le terme "modèle" peut prendre de nombreuses significations d'une discipline à l'autre (Pavé, 1994). Dans cet article, nous considérerons qu'il s'agit d'un ensemble d'équations mathématiques permettant de décrire et de simuler des relations entre les variables d'un peuplement forestier, et tout particulièrement de prédire leur évolution au cours du temps.

plusieurs approches sont possibles avec des avantages et des inconvénients propres à chaque solution. La première idée est de construire un logiciel spécifique pour chaque modèle. Le résultat est alors parfaitement adapté à chaque cas d'étude mais ces programmes sont difficilement réutilisables d'un modèle à l'autre. La multiplicité des simulateurs ainsi construits ne facilite pas la diffusion et l'utilisation de ces modèles (Perot & Ginisty, 2004). Une seconde approche est d'établir un modèle de dynamique générique, adapté à différentes espèces ou situations forestières en modifiant ses jeux de paramètres, et implémenté dans un simulateur réutilisable (Pretzsch *et al.*, 2002). Le principal inconvénient de cette démarche est la limitation à un modèle : individualisé ou non, spatialement explicite ou pas, prenant en compte certains types de compétition et pas d'autres et avec des possibilités d'évolution faibles dans ces domaines. Une troisième possibilité est l'utilisation de la modélisation descriptive (Muetzelfeldt & Massheder, 2003) qui constitue une approche générale applicable à tous les domaines d'études, forestier ou non. Ces outils permettent d'aborder des problèmes très différents dans toutes les disciplines mais leurs interfaces utilisateurs présentent généralement des limitations en terme de construction d'outils performants pour un domaine donné.

En France, les modélisateurs forestiers ont mis en commun leurs idées et ressources depuis 1994 pour construire un outil à la fois générique et étroitement dédié au domaine de la simulation de la dynamique forestière. La plate-forme Capsis (Dreyfus & Bonnet, 1996; de Coligny *et al.*, 2004) reprend les avantages des logiciels génériques en proposant de capitaliser et partager les développements passés pour les nouveaux projets (architecture ouverte, interface graphique conviviale partagée, extensions nombreuses pour simuler des interventions, représenter des données calculées, effectuer des exportations et connexions avec d'autres simulateurs...), tout en proposant préférentiellement des outils applicables au domaine forestier : éclaircies multicritères, suivi de variables dendrométriques, etc. Le logiciel organisé autour d'un noyau stable enrichi de bibliothèques applicatives construites au gré des nouveaux projets (structures spatiales, biomécanique, économie, génétique...) permet l'intégration de modèles aux structures différentes, aux pas de temps personnalisables, avec une grande liberté laissée à chaque modélisateur. De nouveaux composants peuvent être écrits à tout moment par les modélisateurs qui travaillent ensemble en co-développement sur le même outil.

Avec de telles plate-formes, on peut envisager une plus grande diffusion de ces modèles vers le gestionnaire, pour les aider dans les différentes étapes de l'aménagement et de la gestion forestière.

Dans cet article, nous souhaitons présenter quelques cas typiques d'utilisation de modèles à différentes étapes de l'aménagement ou de la gestion : (i) la prédiction de la croissance en hauteur dominante dans un peuplement régulier; (ii) la comparaison de plusieurs scénarios sylvicoles en peuplement mélangé irrégulier;

(iii) l'étude de l'évolution de la composition de peuplements mélangés à l'échelle d'un massif. Nous évoquerons ensuite les limites de l'approche de modélisation ainsi que les perspectives de recherche.

### **Prédiction de la production dans un peuplement régulier.**

Les peuplements réguliers sont des peuplements forestiers composés d'arbres d'une même espèce et de même âge. Ils peuvent être issus de plantation ou de régénération naturelle menée sur l'ensemble d'une parcelle, et constituent la méthode sylvicole de référence pour les essences sociales en plaine (Jarret, 2004). La gestion des peuplements réguliers consiste généralement en une succession de coupes d'éclaircies qui diminuent progressivement le nombre d'arbres du peuplement pour donner plus d'espace aux arbres de meilleure qualité, qui seront récoltés en fin de révolution. Plus les coupes sont fortes, plus rapide est la croissance en diamètre – la croissance en hauteur étant, quant à elle, très peu affectée par les éclaircies. L'intensité des éclaircies détermine ainsi l'âge d'exploitabilité, c'est-à-dire l'âge auquel les arbres atteindront le diamètre fixé comme objectif pour l'aménagement de la forêt (par exemple 60 cm). La fertilité de la station (climat local, topographie, profondeur et richesse minérale du sol) joue elle aussi un rôle important, aussi bien pour l'âge d'exploitabilité que pour la production en volume.

Pour planifier les régimes de coupe et estimer l'âge d'exploitabilité et la production, les forestiers peuvent utiliser des modèles de croissance. En France, ces modèles sont construits à partir de la théorie dendrométrique de la production des peuplements réguliers (Houllier, 1991), reposant sur deux propriétés d'invariance fondamentales. La première, appelée loi de Eichhorn, exprime le fait que croissance en hauteur et production en volume des peuplements hyperdenses sont liées par une équation unique, quelle que soit la fertilité de la station. La seconde exprime la quasi-insensibilité de la croissance en hauteur vis-à-vis de la compétition (Lanner, 1985). Dès lors, les différences de productivité entre stations, liées au climat ou au sol, peuvent être estimées grâce à des variations analogues de la croissance en hauteur, résumées dans le concept d'indice de fertilité (Franc & Houllier, 1989).

Ce raisonnement s'est appliqué sans trop de difficultés, tant qu'on a pu supposer que le milieu était stable. Or nous savons aujourd'hui que plusieurs facteurs environnementaux importants évoluent, même sans intervention des forestiers : augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, réchauffement du climat, modifications de la nutrition minérale due à la pollution azotée. Ces changements globaux ont des conséquences mesurables pour les forêts : en Europe tempérée, la majorité des forêts ont connu au cours des 100 dernières années de fortes accélérations de croissance (Spiecker *et al.*, 1996). Des travaux récents montrent ainsi que la productivité des hêtraies du Nord-Est de la France s'est accélérée de 50% depuis 1900, l'essentiel de

cette transition s'étant déroulé entre 1950 et 1980 (Bontemps *et al.*, 2005). Divers éléments suggèrent que les dépôts azotés, liés au développement industriel et agricole, auraient joué un rôle majeur dans ce phénomène.

Même pour des écosystèmes aussi simples que les peuplements réguliers, les relations entre forêt et environnement sont de mieux en mieux perçues dans toute leur complexité : (i) les changements globaux stimulent la productivité, à travers une double fertilisation par le carbone et l'azote ; (ii) le faible stock d'éléments minéraux du sol (phosphore, calcium, potassium...) utilisé par les forêts n'est pas stimulé dans les mêmes proportions, tandis que l'exploitation forestière conduit à exporter une partie de ces minéraux en dehors de l'écosystème ; (iii) les scénarios de changement climatique prévoient une accentuation des sécheresses estivales, dans de nombreuses régions. La combinaison de ces tendances fait craindre l'apparition de carences nutritives chroniques, conduisant à des épisodes de dépérissements sévères déclenchés par la sécheresse (Dupouey *et al.*, 2005). On estime que les changements globaux, associés aux perturbations du fonctionnement des écosystèmes qu'ils entraînent, provoqueront des modifications de l'équilibre entre les différentes espèces, un décalage dans l'espace de leurs niches écologiques et finalement des modifications de leurs aires de répartition (Badeau, *in* Loustau, 2004).

Dans ces conditions, l'utilisation de modèles pour l'aide à la gestion forestière devient incontournable. Aujourd'hui, très peu de modèles sont à la fois suffisamment complexes pour prendre en compte l'impact des changements environnementaux, et suffisamment robustes pour fournir des prédictions fiables sur le comportement à long terme des forêts. Construire de tels modèles constitue un enjeu très fort pour éclairer les décisions des forestiers, sur lequel de nombreuses équipes de recherche se mobilisent de par le monde.

Dans cet article, nous illustrons simplement, à titre d'exemple, comment on peut estimer l'impact à moyen terme des changements globaux sur l'âge d'exploitabilité des hêtraies du Nord-Est de la France. Nous reprenons pour cela des résultats détaillés dans (Bontemps *et al.*, 2005).

Pour simuler l'évolution des peuplements réguliers de hêtre, nous avons utilisé le modèle de croissance *Fagacées* (Dhôte, 1995). Dans ce modèle, l'ensemble de la dynamique du peuplement est guidé par la courbe de croissance en hauteur dominante. Celle-ci possède une forme générale, caractéristique de l'espèce et de la grande région biogéographique considérée, et un niveau particulier au peuplement, l'indice de fertilité. Dans *Fagacées*, l'accroissement en hauteur détermine un niveau potentiel de production en surface terrière<sup>3</sup>, qui correspond à la situation des

<sup>3</sup> La surface terrière d'un arbre est la mesure de la surface de la section de son tronc à 1m30. A l'échelle d'un peuplement, on utilise la surface terrière totale, somme des surfaces terrières de

peuplements hyperdenses. Pour un peuplement quelconque, la production en surface terrière réelle résulte à la fois de ce potentiel et d'une courbe de réponse densité-production : les peuplements excessivement clairs ont une production globale inférieure au potentiel, cette production sature très vite dès que le peuplement a une densité supérieure à 40% du stock maximal. Ensuite, la production du peuplement est désagrégée, sous forme de croissance individuelle en diamètre, entre les arbres constitutifs.

Récemment, une modification importante a été apportée à ce schéma. L'architecture d'ensemble du modèle a été conservée, mais on a substitué à l'équation de croissance en hauteur précédente une formule plus complexe, dans laquelle l'accroissement dépend de trois facteurs : (i) la hauteur atteinte, avec une culmination précoce (point d'inflexion) puis un ralentissement continu de la vitesse au fur et à mesure que le peuplement grandit ; (ii) l'indice de fertilité de la station, qui rend compte de l'ensemble des facteurs permanents de la productivité (climat moyen, topographie, texture du sol, etc...) ; (iii) une courbe de dérive de productivité, indexée par la date, et qui rend compte de l'ensemble des facteurs environnementaux qui ont évolué au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette courbe de dérive possède par construction une valeur 1 en 1900, nous lui avons donné par commodité une forme parabolique, et sa valeur en 2000 est voisine de 1,5. Cela signifie que le niveau de croissance en hauteur est aujourd'hui 50% plus fort qu'en 1900, toutes choses égales par ailleurs. Cette courbe a été calibrée grâce à une étude rétrospective de la croissance en hauteur des hêtraies du Nord-Est (Bontemps et al., 2005). Bien entendu, la forme de la courbe et son niveau valent seulement pour l'essence et la région considérées. Du fait de la construction du modèle, le changement à long-terme ainsi introduit pour la hauteur dominante se diffuse à l'ensemble des dimensions de chaque arbre, notamment son diamètre et son volume.

La courbe de dérive de croissance avec la date possède un déterminisme qui reste encore mal connu dans ses détails. Pour la prolonger vers l'avenir, on devra mieux comprendre quels rôles jouent en particulier le climat, les dépôts atmosphériques azotés, la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>... Provisoirement, nous avons donc supposé que la croissance en hauteur se maintiendrait à son niveau actuel au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Moyennant ces hypothèses, on peut donc à la fois rendre compte de ce qui s'est passé depuis 150 ans et fournir de premières prévisions sur la croissance à attendre au cours des 100 prochaines années.

Avec ce modèle, nous avons simulé la croissance de jeunes peuplements pendant 150 ans, en comparant un peuplement né en 1850, et un peuplement né en 1950. Pour ce dernier, nous avons considéré un scénario raisonnable de changement de productivité

tous les arbres, comme un indicateur de la biomasse du peuplement.

correspondant aux changements déjà observés et à la tendance attendue pour les 50 prochaines années.

La figure 1 montre que les jeunes peuplements actuels ont une croissance plus rapide. Ils devraient atteindre une hauteur dominante de 41m, et pourraient donc être récoltés, 30 ans plus tôt que leurs devanciers installés au 19<sup>ème</sup> siècle. Si en outre on considère que les éclaircies en hêtraie sont actuellement plus fortes que durant la période 1850-1950, le raccourcissement des révolutions atteindra vraisemblablement 40% (90 ans contre 150 ans). La transition des vieux peuplements à croissance lente vers les jeunes à croissance rapide s'étalera sur les 50 prochaines années. Elle nécessitera une adaptation des aménagements forestiers, en particulier par une forte augmentation des surfaces mises en régénération.

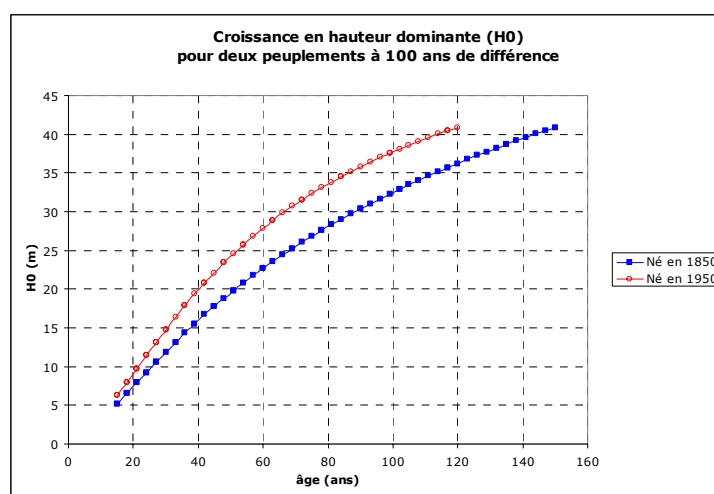


Figure 1. Évolution de la hauteur dominante de deux peuplements de hêtres, le premier né en 1850 (en bleu) et le deuxième né en 1950 (en rouge). Sous l'effet des changements de productivité, les peuplements actuels poussent plus vite que les peuplements anciens.

### Comparaison de plusieurs scénarios sylvicoles en peuplement mélangé irrégulier.

Les peuplements irréguliers (c'est à dire composés d'arbres d'âges et de tailles différentes), ou mélangés (composés d'espèces différentes) ont une dynamique plus complexe que les peuplements purs réguliers, et sont plus difficiles à gérer (IDF, 2003; De Turkheim & Bruciamacchie, 2005). Cette situation est en particulier fréquente dans les forêts de montagne, moins faciles d'accès et moins rentables, où les peuplements jouent surtout un rôle de protection contre l'érosion. Dans ces peuplements, la régénération naturelle s'exprime de façon hétérogène, notamment en fonction de la lumière disponible au sol, et entraîne une grande hétérogénéité des structures forestières. C'est ainsi que peuvent coexister, dans un même lieu,

des arbres de plusieurs générations et de plusieurs espèces en interaction.

Pour de tels peuplements, la mise au point des stratégies sylvicoles est délicate. Les outils classiquement utilisés pour les peuplements réguliers, comme les tables de production, les modèles de peuplements, ou les modèles par arbres-type ne sont pas vraiment adaptés aux peuplements irréguliers ou mélangés. En effet, ces outils sont basés sur la notion d'arbre moyen, qui traduit le fait que les arbres d'un peuplement régulier sont tous relativement similaires; et la notion de hauteur dominante, qui suppose que tous les arbres ont à peu près le même âge. Ces notions ne sont pas faciles à adapter en peuplement irrégulier ou mélangés (Spellmann, 1992). En outre, ces outils ont été construits à partir d'un grand nombre de placettes de référence, correspondant à des peuplements réguliers et à des sylvicultures normées, dont il n'existe pas l'équivalent pour les peuplements plus complexes. La mise en place de nouvelles placettes expérimentales est bien sûr toujours possible, par exemple pour comparer plusieurs scénarios sylvicoles, mais c'est un travail de longue haleine qui ne pourrait donner des résultats que après plusieurs dizaines d'années de croissance.

Nous sommes dans un cas typique où l'utilisation d'un modèle peut être une bonne solution pour dépasser le manque de placettes expérimentales, et faciliter le travail de mise au point de stratégies sylvicoles. En effet, si on arrive à construire un modèle capable de simuler la dynamique de ces peuplements irréguliers ou mélangés, on peut alors l'utiliser pour comparer l'effet de différents scénarios sylvicoles sur cette dynamique.

C'est tout à fait cette démarche qu'ont suivi Courbaud *et al.* (2000 et 2001) dans le cas des peuplements mélangés irréguliers de montagne. La première étape de ce travail a été le développement d'un modèle capable de simuler la dynamique de ces peuplements : le modèle Samsara. Pour cela, Courbaud (1997) a choisi un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre et spatialement explicite : la croissance de chaque arbre est calculée individuellement, en prenant en compte son espèce, sa position au sein du peuplement et la position relative de ses voisins. Ce modèle est basé sur le calcul de la quantité de lumière reçue par chaque arbre (Courbaud *et al.*, 2003), qui détermine ensuite sa croissance.

Le modèle Samsara utilise plus précisément une liste d'arbres décrivant le peuplement, une liste de cellules de sol décrivant le terrain et une liste de rayons lumineux permettant de représenter le rayonnement reçu sur le site sur l'ensemble d'une saison de végétation. Chaque arbre est caractérisé par son espèce, ses coordonnées spatiales, son diamètre à 1.30 m, sa hauteur, la hauteur de base et le rayon de son houppier. A chaque pas de

temps annuel, Samsara commence par calculer le rayonnement intercepté par chaque arbre du peuplement ainsi que l'éclairement résiduel au niveau de chaque cellule de sol. L'accroissement en volume de chaque arbre est alors calculé en fonction du rayonnement intercepté et de ses dimensions. Cet accroissement en volume est ensuite réparti en accroissement en diamètre et en hauteur. Une probabilité de mourir est ensuite affectée à chaque arbre en fonction de son accroissement et de sa hauteur. Une probabilité d'installation de nouveaux semis est affectée à chaque cellule de sol en fonction de l'éclairement reçu et de la présence de semenciers sur la placette. Un accroissement en hauteur est calculé pour chaque semis existant. Les semis dépassant 1.30 m sont enfin transformés en arbres : un diamètre, et un houppier leurs sont affectés. Une itération de ces processus sur plusieurs années permet de simuler une période de croissance.

Le modèle Samsara a été ajusté et validé sur des données de placettes expérimentales dans les Alpes, qui ont permis de vérifier la pertinence du modèle pour les peuplements irréguliers d'épicéas et de sapin. Ce modèle a été implémenté dans la plateforme de simulation forestière Capsis (de Coligny *et al.*, 2004), qui prévoit justement la possibilité de simuler en parallèle et de comparer plusieurs scénarios sylvicoles. L'utilisateur peut ainsi intercaler dans la simulation des étapes d'interventions sylvicoles, au cours desquelles il prélève des arbres soit en les désignant à la souris sur la carte du peuplement ou un histogramme de diamètres soit en appliquant différentes règles automatiques de prélèvement. Le modèle Samsara a ainsi récemment été utilisé par les gestionnaires pour tester différentes stratégies sylvicoles dans le cadre de la mise au point du guide de sylviculture pour ces peuplements mélangés irréguliers dans les Alpes.

Dans cet article, nous illustrons le principe de ces comparaisons sur une placette d'un demi hectare mélangée de sapin et d'épicéa et cartographiée sur le terrain, en forêt communale de Queige (Savoie) (figure 2). La placette est orientée au Nord et présente une pente modérée (20°). Le peuplement a une structure bien irrégulière mais le sapin est mieux représenté dans les petits diamètres et l'épicéa dans les gros diamètres. Dans ce type de peuplements, nous souhaitons favoriser la régénération de l'épicéa (meilleure essence commerciale mais tolérance modérée à l'ombrage) par rapport au sapin (bonne stabilité au vent et bonne tolérance à l'ombrage mais moindre intérêt commercial). Une des possibilités pour cela est d'ouvrir des trouées pour amener plus de lumière au sol, mais nous devons aussi éviter de créer de trop grandes trouées car le peuplement joue aussi un rôle de protection contre les avalanches et les chutes de pierres. Nous souhaitons évaluer l'impact de telles trouées sur la régénération.

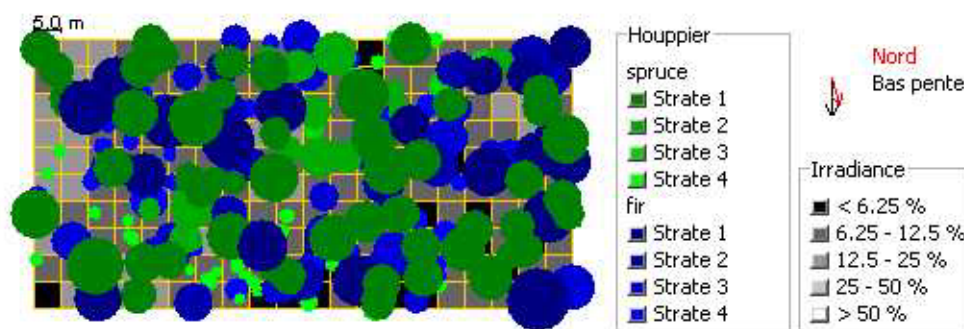


Figure 2. Cartographie de la placette installée en forêt communale de Queige : projection des houppiers d'épicéas (en vert) et de sapins (en bleu) des différentes strates de hauteur. Les cases grises représentent la quantité de lumière au sol.

Nous avons donc utilisé le modèle Samsara, en prenant cette placette comme état initial, pour simuler et comparer ses évolutions probables sous l'effet de deux scénarios sylvicoles : un scénario avec trouées, et un scénario plus classique. Dans notre premier scénario, nous avons simulé la réalisation de trouées de quelques dizaines d'ares, avec des interventions relativement peu fréquentes (deux trouées en 80 ans sur notre demi-hectare). Le deuxième scénario consiste en une coupe classique des plus gros arbres, quelle que soit leur essence, avec des interventions tous les 20 ans. Sur la durée de la comparaison, les prélèvements en surface terrière sont comparables dans les deux scénarios.

La figure 3 montre l'état des peuplements simulés après 80 ans de croissance, pour les deux stratégies, ainsi que les courbes d'évolution de la surface terrière des deux essences. Ces résultats montrent le faible impact de la stratégie par petites trouées. En effet, dans les deux cas le sapin gagne en surface terrière au détriment de l'épicéa. Ce phénomène s'explique par l'importance de la régénération préexistante du sapin qui s'installe sous le couvert du peuplement. L'ouverture de trouées permet l'installation de quelques semis d'épicéa, mais ceux-ci sont incapables de rattraper la régénération de sapin. Contrebalancer le dynamisme du sapin nécessiterait donc non seulement l'ouverture de trouées, mais également l'élimination d'une partie de la régénération de sapin pour dégager les recrues d'épicéa et limiter le sapin. La sylviculture par trouées présente néanmoins d'autres avantages : elle a permis de venir deux fois moins souvent sur la placette et donc de limiter les dégâts d'exploitation. Elle n'a par contre pas permis une sélection individuelle des arbres prélevés. Il est intéressant de remarquer également que les gros arbres étant relativement agrégés dans notre peuplement initial, la simple coupe des plus gros arbres conduit assez souvent à prélever plusieurs arbres ensembles et permet l'ouverture de micro-trouées.

La simulation permet donc ici de comparer les stratégies sylvicoles de manière relativement détaillée et met en évidence

l'interaction de plusieurs phénomènes (tolérance à l'ombre, structure initiale du peuplement, rythme, intensité et organisation spatiale des prélèvements). Cet exemple montre que la simulation apporte un éclairage intéressant à l'aménagiste, mais que celui-ci doit également prendre en compte certains phénomènes non modélisés (par exemple dégâts d'exploitation, distance aux pistes de débardage) avant de faire des choix d'aménagement.

#### **Etude de l'évolution de la composition de peuplements mélangés à l'échelle d'un massif.**

Dans les deux exemples précédents, nous avons considéré des modèles utiles pour simuler l'évolution sur quelques dizaines d'années d'une parcelle forestière. Toutefois, certaines questions nécessitent de s'intéresser à des surfaces plus grandes, sur des temps plus longs. C'est tout particulièrement vrai pour l'évolution de la composition spécifique de formations forestières. En France, cela concerne à la fois des peuplements artificiels monospécifiques, plantés, qui évoluent vers des mélanges; des accrues déjà anciens, colonisés dans une seconde phase par de nouvelles espèces (cf. par ex., Dreyfus et al., 2005a); et des forêts longtemps en équilibre mais dont la composition évolue à la faveur des changements globaux (réchauffement climatique, dépôts azotés ...).

Si on veut comprendre la dynamique de ces peuplements, et prédire leur évolution pour mieux gérer ces forêts, il est important de prendre en compte les processus de régénération à l'échelle du petit massif forestier, car ce sont eux qui sont à l'origine de la colonisation de ces espaces, et qui continuent à modifier la composition spécifique des peuplements, dans le cadre d'une succession écologique des espèces.

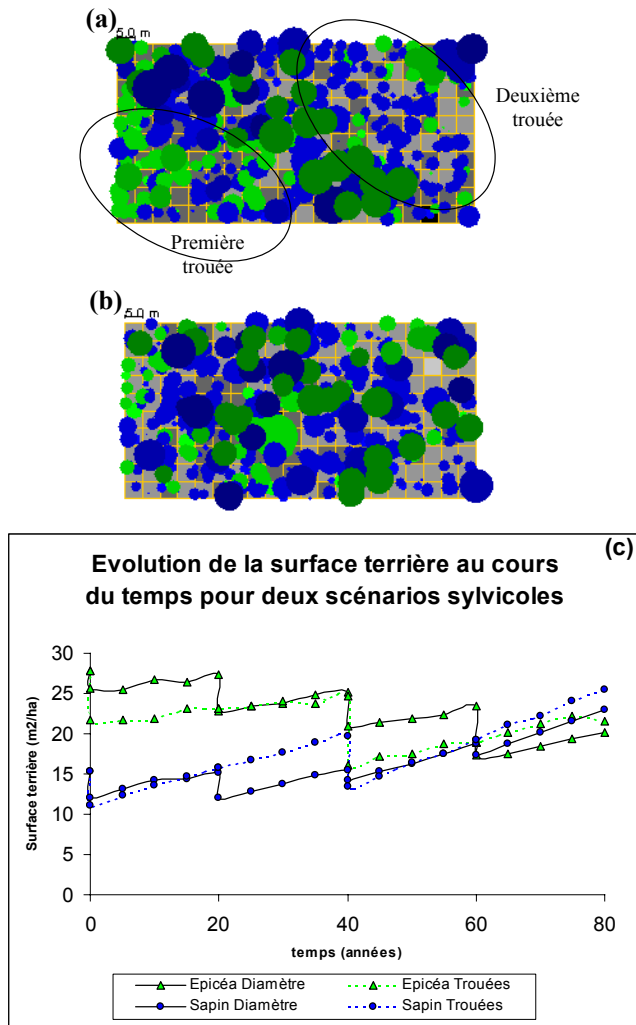


Figure 3. Résultat des simulations après 80 ans de croissance, et deux scénarios sylvicoles : (a) le scénario par trouées, et (b) le scénario classique. (c) Comparaison de l'évolution de la surface terrière des deux espèces (épicéas en vert, sapin en bleu) au cours de la simulation, pour les deux scénarios (par trouées : en pointillé, classique : trait continu).

L'exemple que nous présentons dans cet article concerne des formations forestières de l'arrière-pays méditerranéen français constituées en grande partie de pineraies artificielles monospécifiques (de Pin noir, Pin sylvestre ou Pin à crochets) issues de boisements de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et du début du 20<sup>ème</sup>, ainsi que d'accrus de Pin sylvestre souvent déjà anciens. Ces formations évoluent depuis plusieurs décennies vers des formations plus naturelles, généralement mélangées, avec le retour du Hêtre et du Sapin pectiné, principalement. Ceci pose de nouvelles questions de gestion, que ce soit au niveau de la parcelle (sylviculture de mélanges) ou au niveau de la forêt ou du petit massif (aménagement forestier, choix des essences objectifs en fonction de leur dynamisme et des conditions stationnelles).

La croissance et la mortalité, toutes deux fonctions de la compétition entre arbres (qu'ils soient ou non de la même espèce, et quels que soient leur âge et leurs dimensions) et des conditions stationnelles, peuvent être décrites, analysées, puis modélisées et simulées à l'échelle de la parcelle comme dans les exemples précédents.

Par contre, la régénération, qui se traduit par l'apparition de nouveaux individus dans le système, ne peut être prise en compte ici qu'à une échelle plus vaste puisqu'on voit apparaître des semis - d'espèces autres que celle constituant le couvert de Pin - issus de graines provenant de peuplements de Hêtre ou de Sapin souvent situés à plusieurs centaines de mètres de là. La régénération mélangée, qui apparaît ainsi très fréquemment, est à la fois issue de graines produites sur place par les pins et de graines venues de plus ou moins loin et en moins grand nombre, mais qui ont un « succès » plus important car correspondant à des espèces mieux adaptées à la survie sous couvert forestier. De plus, la puissance de la production de graines de ces sources « extérieures » varie dans le temps en fonction des dimensions des arbres et de leur nombre, et donc de leur croissance, de leur survie et des interventions sylvicoles. Celles-ci peuvent avoir divers effets sur cette production de graines : l'augmenter en stimulant la croissance des houppiers ou en favorisant la fructification par des coupes de régénération, la réduire par la coupe de certains semenciers, ou la tarir par une coupe finale éliminant les derniers semenciers. La probabilité de voir apparaître de nouveaux semis en un point donné de l'espace est ainsi déduite de relations de « dispersion efficace » (par opposition à la « dispersion potentielle », de graines), qui tiennent compte à la fois de la distance entre cette cible et les sources et de la puissance de chacune de ces dernières.

Dès lors, le modèle de dynamique forestière doit être en mesure de rendre compte conjointement de l'évolution des peuplements de Pins (en évolution vers des mélanges) et des peuplements-sources. D'autant que, pour des simulations sur 50 ou 100 ans, on peut voir apparaître de nouvelles sources, en position intermédiaire entre les premiers foyers et les pineraies les plus éloignées.

Le modèle en cours de mise au point se fonde sur une semi-spatialisation : comme pour les « modèles de trouées » (gap models, en anglais) élaborés pour de nombreuses formations forestières dans diverses régions du monde, l'espace est discrétisé sous forme d'une grille de cellules carrées (en l'occurrence, des cellules de 10 m de côté) au sein desquelles les arbres sont listés (espèce, dimensions, âge) mais pas positionnés précisément, que ce soit au stade de l'observation et de l'analyse ou au stade de la simulation. Cette grille recouvre, de manière complète ou non, l'ensemble de la zone considérée (les peuplements-sources aussi bien que les peuplements-cibles), avec des cellules qui représentent chacune des parcelles forestières.

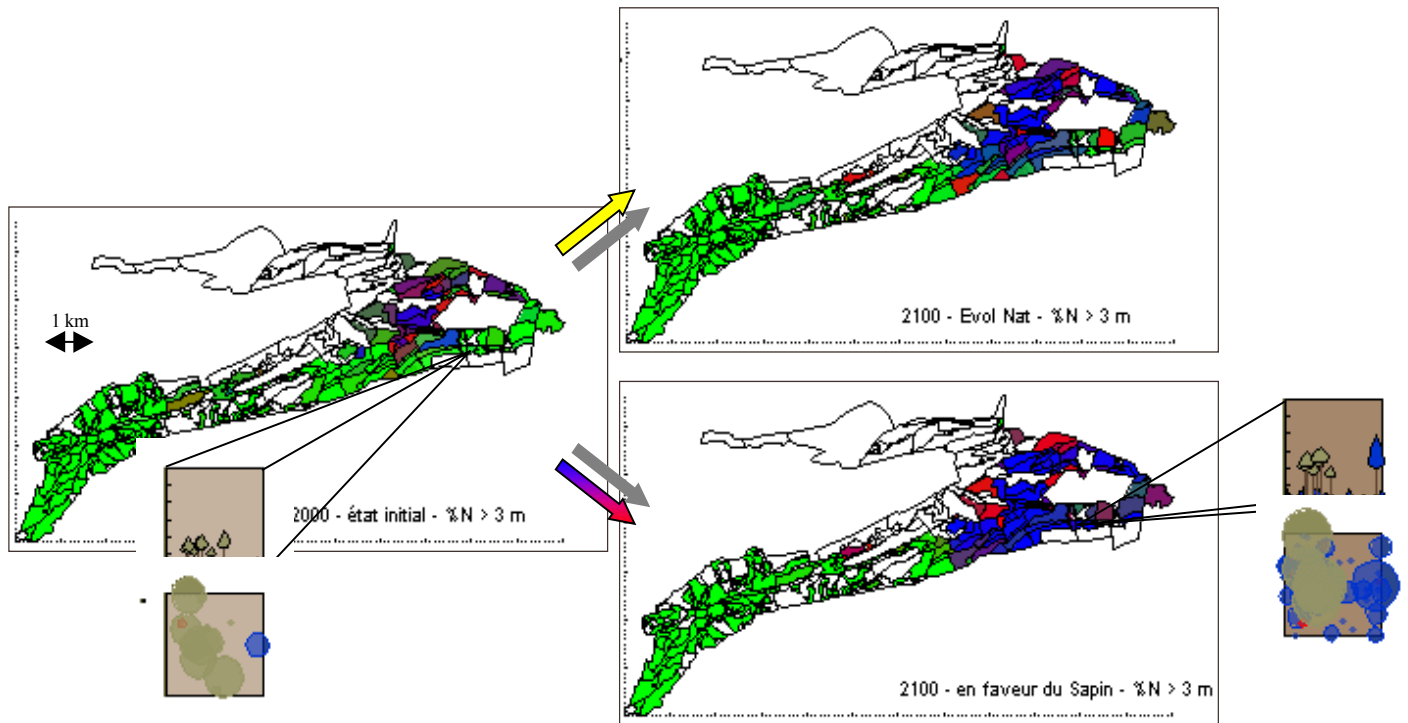


Figure 4 : Simulation sur 100 ans de la colonisation du Sapin (en bleu) et du Hêtre (en rouge) (année 2000 à gauche, et 2100 à droite) dans les peuplements de Pins (sylvestre ou à crochets, en vert) en versant nord du Mont-Ventoux (partie ouest, entre 900 et 1600 m d'altitude). Pour chaque espèce, la teinte est d'autant plus foncée que la proportion de l'espèce est forte, en nombre d'individus de plus de 3 m de hauteur (régénération et adultes). Deux scénarios de gestion : en absence d'intervention sylvicole, en haut à droite ; ou gestion favorisant le Sapin (et le Hêtre), en bas à droite.

En outre, le modèle est, en quelque sorte, « semi-individualisé » : en simulation, pour une cellule donnée, les N semis d'une espèce donnée qui apparaissent une année donnée sont représentés par un seul « arbre-type », assimilable à une cohorte d'effectif N. Aux pas suivants dans la simulation, l'arbre-type voit ses dimensions (et son âge) augmenter, tandis que son effectif N peut diminuer sous l'effet de la mortalité (et souvent tomber à 1, à un stade plus ou moins précoce, ce qui équivaut à un arbre individuel).

Les mécanismes (ou processus) modélisés, et qui interviennent à chaque pas de simulation, sont donc les suivants :

- le recrutement de petits semis de chaque espèce qui apparaissent en nombre d'autant plus grand que les semenciers sont plus proches (peuplements ou arbres plus ou moins isolés, situés sur place ou jusqu'à plusieurs centaines de mètres) et fructifient plus intensément (selon leurs dimensions et leur nombre).
- la croissance, des semis comme des arbres de toutes tailles, fonction des potentialités stationnelles, de l'âge de l'arbre, de l'espèce, de la pression de compétition (densité du peuplement, degré de fermeture du couvert),

et du statut concurrentiel (taille relative, etc.) de chaque individu.

- la mortalité, d'autant plus probable que la compétition est localement forte et que l'individu a un statut concurrentiel défavorable ou une croissance faible.
- les interventions sylvicoles sont également prises en compte en simulation ; elles régulent la compétition, induisent indirectement des dégâts (exploitation forestière) sur les régénérations en place, favorisent telle ou telle espèce à l'occasion des coupes au sein d'un peuplement, d'une régénération ou, à l'échelle de la forêt, par le choix d'essences-objectifs à privilégier en raison d'une meilleure adéquation avec les conditions écologiques ou socio-économiques.

La structure du modèle rend les simulations relativement légères. Le modèle est implémenté dans le module Ventoux, au sein de la plate-forme Capsis. Il est possible de simuler l'évolution d'une parcelle donnée selon divers scénarios sylvicoles en faisant abstraction de l'évolution des autres parcelles, mais à condition de fixer arbitrairement une valeur aux « flux entrants » de semis (considérés comme constants, ou dont on définit l'évolution). Mais l'utilisation principale concerne l'échelle de la forêt (figure

4) où il permet de représenter l'évolution la plus probable de la composition spécifique des parcelles (ainsi que de leur structure d'âge et de leurs caractéristiques dendrométriques) selon diverses stratégies de gestion appliquées sur tout ou partie du massif : non-intervention, coupes relativement fréquentes favorisant le maintien des pins ou bien plus espacées, plus légères pour favoriser la dynamique naturelle de retour des espèces d'ombre.

Le Sapin s'étend fortement à partir d'un noyau de sapinières matures ; déjà observée en 2000 (unités en bleu plus ou moins clair autour du noyau), cette évolution s'amplifie fortement, d'après la simulation, de 2000 à 2100. La partie gauche de la carte, plus éloignée des sapinières-sources, correspond en outre à des conditions stationnelles moins favorables au Sapin et au Hêtre (altitudes plus basses, sécheresse estivale plus prononcée) ; elle n'est pratiquement pas concernée par cette colonisation. Les schémas de cellule, en vues verticale et horizontale, illustrent, par un exemple, l'apparition du Sapin dans un peuplement de Pin à crochets.

Trois points importants à souligner, pour ce contexte d'évolution à relativement vaste échelle et à moyen ou long terme :

- l'évolution de la composition effective des peuplements dépend largement des caractéristiques stationnelles des zones colonisées, caractéristiques qui conditionnent en large part la survie et la croissance potentielle de chaque espèce ; pour des simulations à relativement long terme, ce facteur mérite une attention toute particulière dans le contexte actuel de changement de la composante climatique ; des actions de recherche sur cette question sont en cours d'élaboration ;
- ceci nécessite également de tenir compte de l'adaptation stationnelle ; au niveau espèce, mais aussi au niveau intra-spécifique (qualité génétique) dans les nouvelles populations issues du processus de colonisation ; des études en cours dans le même contexte permettent de simuler la structure génétique de ces populations en fonction de la dynamique démographique et de la position des sources (Dreyfus et al., 2005b, module VentouG de Capsis) ; des perspectives s'ouvrent aussi sur la prise en compte d'effets génétiques quant à l'adaptation - et à la pérennité à long terme - de ces nouveaux peuplements.
- en-dehors de simulations d'intérêt stratégique ou théorique sur des situations-types fictives, le résultat de la simulation d'une option de gestion sur une forêt donnée est d'autant plus pertinent que l'information initiale (départ de la simulation) est plus réaliste et riche ; chercheurs et gestionnaires ont des progrès à accomplir en commun sur la mise au point de méthodes de description (diagnostic) de peuplements, sur des surfaces vastes, méthodes restant compatibles avec les contraintes de la gestion opérationnelle et qui permettraient des pronostics encore plus pertinents.

## Discussion

*Nous avons vu dans cet article comment la construction et l'utilisation de modèles pouvaient effectivement faciliter le travail des gestionnaires forestiers.*

Tout d'abord, les modèles forestiers permettent d'obtenir des prédictions d'évolution des peuplements dans des cas de figure complexes où les tables de production sont insuffisantes, en intégrant par exemple les changements de productivité, ou en considérant des peuplements irréguliers ou mélangés. Ensuite, les modèles rendent possible une comparaison rapide de plusieurs scénarios sylvicoles, ce qui aurait demandé auparavant de longues années d'expérimentation. Cette utilisation est tout particulièrement indiquée lors de la rédaction des guides de sylviculture. Enfin, nous avons vu que la modélisation permet également d'intégrer des phénomènes à plus large échelle de temps et d'espace, comme la colonisation successive d'un espace par différentes espèces, qu'il nous est difficile d'appréhender autrement. Notons en outre que les simulateurs de dynamique forestière se sont avérés d'excellents outils pédagogiques, pour la formation initiale ou continue, en facilitant la représentation des peuplements, par exemple dans des expériences de marteloscope, ou en permettant aux étudiants de tester et de comparer plusieurs itinéraires sylvicoles.

En France, plusieurs modèles forestiers sont déjà utilisés par les gestionnaires comme outils d'aide à la décision, notamment les modèles à l'échelle des peuplements qui correspondent à des peuplements réguliers. Ainsi, ces modèles aident aujourd'hui l'Office National des Forêts à construire des guides de sylviculture par essence et par grandes régions biogéographiques (Perot & Ginisty, 2004). Les modèles plus élaborés, concernant les peuplements irréguliers ou mélangés, sont par contre encore le plus souvent des objets de recherche, pour lesquels un effort de diffusion est souhaitable. Toutefois, on peut s'attendre à ce que l'utilisation de modèles comme outils d'aide à la décision s'amplifie dans les années à venir, notamment avec le développement de plates-formes de simulations conviviales, éventuellement liées à des Systèmes d'Information Géographique et à d'autres systèmes de gestion de bases de données.

*L'utilisation d'une plate-forme de simulation est essentielle pour faciliter la construction et la diffusion des modèles.*

Dans les trois applications présentées dans cet article, nous avons utilisé des modèles intégrés dans la plate-forme logicielle Capsis (de Coligny *et al.*, 2004). Ces exemples permettent d'illustrer l'avantage de telles plate-formes, à la fois dans la phase de construction des modèles, et dans la phase d'utilisation.

En ce qui concerne la phase de construction des modèles, le principal avantage de Capsis réside dans la dynamique de co-développement mis en place autour de la plate-forme. Capsis est une plate-forme modulaire (figure 5) écrite en java : autour d'un

noyau développé par l'informaticien responsable du projet, viennent s'articuler des modules (1 par modèle), des extensions (pour visualiser les données), des bibliothèques (regroupant des outils spécifiques partagés), et des pilotes (pour lancer les simulations via l'interface écran ou en mode script). Chaque modélisateur a une grande autonomie sur son module, dont il est responsable, et bénéficie à ce titre d'une formation spécifique, mais il n'a pas à s'inquiéter du développement du noyau ou des interfaces. En outre, la modularité facilite le partage et la réutilisation du code informatique d'un module à l'autre. Dans les cas les plus simples, on peut même créer un nouveau module en faisant une copie d'un module existant et en adaptant les équations du modèle.

L'utilisation des modèles hébergés dans la plate-forme est également grandement facilitée parce qu'ils sont simulés à partir de la même interface, avec les mêmes repères, et le même vocabulaire. Un utilisateur, qu'il soit chercheur ou gestionnaire, n'est pas dépaycé en passant d'un modèle à l'autre : si il sait utiliser un module il peut sans difficultés réaliser des simulations avec les autres modules. Cette pérennisation d'une interface conviviale, et plus largement de l'environnement de simulation, joue un rôle important dans l'appropriation par les utilisateurs des outils de simulation, qui peuvent dans d'autres cas paraître rébarbatifs. En outre, chez les modélisateurs, la dynamique du projet et le partage de la plate-forme a mis en place une réelle animation scientifique qui, au delà des questions d'implémentation, fait émerger des questions de fond sur nos objets d'étude.

*La confrontation des modèles aux besoins des utilisateurs nous renvoie aussi des questions, qui préfigurent les perspectives de recherche pour les modélisateurs forestiers.*

Durant ces quinze dernières années l'effort de construction des modèles a essentiellement porté sur les peuplements réguliers. Or les peuplements hétérogènes couvrent plus de 50% de la surface forestière française (IFN, 2000) et représentent un enjeu croissant au niveau écologique et social. La première priorité semble donc être de modéliser efficacement des peuplements de plus en plus complexes, et en particulier des peuplements mélangés, qui sont aujourd'hui considérés comme des objectifs de gestion pour favoriser la diversité et la résilience des écosystèmes forestiers, et présentent aussi des intérêts en terme de production. Pour pouvoir utiliser efficacement ces modèles, il faudra être capable de gérer les changements d'échelle, à la fois pour les processus dynamiques simulés et pour les données d'entrées disponibles.

Une deuxième priorité semble être de coupler ces modèles à d'autres processus biologiques, à l'image de ce qui a été réalisé pour la qualité du bois : des modèles de végétation, de biodiversité, de gibier, de flux biogéochimiques, ou encore des modèles économiques.

Enfin, si on souhaite pouvoir réaliser des simulations à plus long terme, il sera indispensable d'améliorer notablement les modèles de régénération et de mortalité, mais aussi d'étudier plus précisément les problèmes de validation et de cumul d'erreur lors des simulations, notamment pour les modèles à composantes stochastiques.

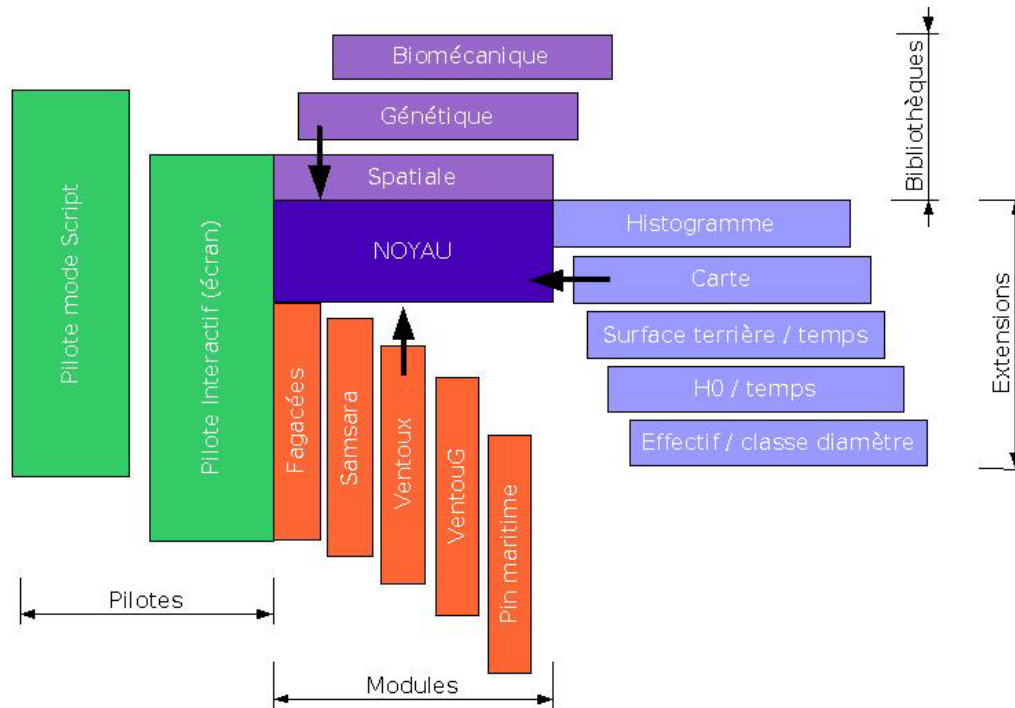


Figure 5 : Architecture de la plate-forme Capsis

*Notons enfin qu'il est essentiel de garder à l'esprit les principales limites de la démarche de modélisation pour assurer une bonne utilisation des modèles.*

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité : quel que soit son niveau de précision, il ne peut remplacer l'objet réel qu'il modélise. Un peuplement forestier réel sera toujours plus complexe, et plus riche, que les résultats de simulation des modèles. Il y aura toujours des événements imprévisibles, comme une tempête, une maladie, ou un changement climatique, qui n'auront pas été inclus dans le modèle, même si celui-ci comporte une composante stochastique. Les résultats des simulations des modèles forestiers doivent donc être vus comme des compléments à l'expertise et à la connaissance des forestiers, et n'ont pas vocation à les remplacer.

La construction et l'utilisation de modèles de prédiction nécessitent également un grand nombre de données, à la fois pour l'estimation des paramètres (l'ajustement), la confrontation des résultats à la réalité (la validation), et enfin la définition des états initiaux des simulations. Ce besoin en données est d'autant plus grand que le modèle est complexe. L'utilisation de modèles ne nous affranchit donc pas de l'installation de dispositifs expérimentaux, elle peut par contre nous aider à mieux utiliser les données existantes et à optimiser l'installation de nouveaux dispositifs pour répondre à une question précise.

Un modèle est en général construit pour répondre à un objectif précis, et dans un domaine de validité particulier, qui dépend des données utilisées pour son ajustement et sa validation. Toute

utilisation d'un modèle pour un autre objectif, ou en dehors de son domaine de validité, risque fort de donner de mauvais résultats. Par exemple, on ne peut pas utiliser un modèle de croissance à court terme de peuplements réguliers d'épicéas du nord-est de la France pour simuler l'évolution à long terme de pessières irrégulières dans les Alpes : même si certains processus de base (croissance, mortalité, compétition) sont communs à ces deux groupes de situation, d'autres s'y ajoutent (régénération) et l'importance relative de chacun d'eux diffèrent. En conjonction avec d'importantes différences climatiques et de fertilité des sols, ces mécanismes produisent au bout du compte des structures et des patrons d'évolution tout à fait dissemblables.

Enfin, notons que l'interprétation des résultats de simulation est parfois délicate. C'est tout particulièrement le cas avec les modèles stochastiques, qui prennent en compte certains phénomènes aléatoires, et produisent une certaine variabilité d'une simulation à l'autre (*cf.* par ex., Goreaud *et al.*, 2005). Pour de tels modèles complexes, il est nécessaire de développer des outils d'analyse adaptés, comme par exemple utiliser un grand nombre de simulations de Monte Carlo pour définir des intervalles de confiance pour ces résultats de simulation.

## Conclusion

Dans cet article, nous avons illustré comment les modèles forestiers peuvent être utiles à la gestion et à l'aménagement forestier : ils permettent notamment de prédire l'évolution d'une

parcelle, de comparer des scénarios sylvicoles, ou encore de considérer des surfaces plus grandes sur des temps plus longs. Dans certains cas complexes, l'usage de modèles est même indispensable.

Cependant, l'utilisation d'un modèle n'est pas toujours simple, et un apprentissage est nécessaire pour bien maîtriser leurs limites. Nous pensons donc qu'un partenariat fort entre les chercheurs et les gestionnaires est indispensable pour permettre aux modèles forestiers de jouer pleinement leur rôle en tant qu'outils d'aide à l'aménagement et à la gestion forestière.

**Remerciements :** Les applications présentées dans cet article ont été en partie financées par le ministère français de l'agriculture et de la pêche, le programme Biodiversité et Gestion Forestière (GIP ÉCOSystèmes FORestiers et Ministère français en charge de l'Environnement), et le Bureau des Ressources Génétiques (GIS).

## Bibliographie

- Bontemps, J.D.; Vallet, P.; Hervé, J.C.; Rittié, D.; Dupouey, J.L.; Dhôte, J.F. 2005. Des hêtres qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? *Revue Forestière Française*, LVII (2) : 123-142.
- Courbaud, B. 1997. Modélisation de l'éclaircissement et de la croissance de l'épicéa (*Picea abies* L. Karst) en forêt irrégulière de montagne. *Thèse*, Lyon I. 236 p.
- Courbaud, B.; de Coligny, F.; Cordonnier, T. 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1) : 1-18.
- Courbaud, B.; Goreaud, F.; Dreyfus, Ph.; Bonnet, F.R. 2000. Sylviculture et modèle de croissance dépendant des distances : mise en oeuvre du logiciel CAPSIS 3.0 sur des pessières irrégulières de montagne. *Revue Forestière Française*, LII (5) : 425-440.
- Courbaud, B.; Goreaud, F.; Dreyfus, Ph.; Bonnet, F.R. 2001. Evaluating thinning strategies using a Tree Distance Dependent Growth Model : some examples based on the CAPSIS software "Uneven-Aged Spruce Forests" module. *Forest Ecology and Management*, 145 : 15-28.
- de Coligny, F.; Ancelin, P.; Cornu, G.; Courbaud, B.; Dreyfus, Ph.; Goreaud, F.; Gourlet-Fleury, S.; Meredieu, C.; Orazio, C.; Saint-André, L. 2004. Capsis: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture: Open architecture for a shared forest-modelling platform. *Actes du colloque IUFRO : Working Party S5.01-04 conference (September 2002), Harrison, British Columbia, Canada* : 371-380. (téléchargeable à : <http://capsis.free.fr>)
- de Turckheim, B.; Bruciamacchie, M. 2005. La futaie irrégulière - Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. *Edisud*. 286 p.
- Dhôte, J.F. 1995. Définition de scénarios d'éclaircie pour le Hêtre et le Chêne. *Revue Forestière Française*, numéro spécial 1995 «Modélisation de la croissance et de la qualité des bois», XLVII : 106-110.
- Dreyfus, Ph.; Bonnet, F.R. 1996. CAPSIS (Computer-Aided Projection of Strategies in Silviculture) : an interactive simulation and comparison tool for tree and stand growth, silvicultural treatments and timber assortment. Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software. *Actes du colloque IUFRO : WP S5.01-04 second workshop, Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa. August 26-31, 1996* : 57-58.
- Dreyfus, Ph.; Curt, T.; Rameau, J.C. 2005a. Le Hêtre : dynamiques de recolonisation. *Revue Forestière Française*, LVII (2) : 189-200.
- Dreyfus, Ph.; Pichot, C.; de Coligny, F.; Gourlet-Fleury, S.; Cornu, G.; Jéssel, S.; Dessard, H.; Oddou-Muratorio, S.; Gerber, S.; Caron, H.; Latouche-Hallé, C.; Lefèvre, F.; Courbet, F.; Seynave, I. 2005b. Couplage de modèles de flux de gènes et de modèles de dynamique forestière. *Un dialogue pour la diversité génétique - Actes du 5ème colloque national BRG, Lyon, 3-5 novembre 2004 - Les Actes du BRG n°5 (sous presse)* : 8 pp.
- Dubourdieu, J. 1997. Manuel d'aménagement forestier : gestion durable et intégrée des écosystèmes forestiers. *ONF, Paris* : 244 p.
- Dupouey, J.L.; Dhôte, J.F.; Ranger, J.; Granier, A.; Guehl, J.M. 2005. Un patrimoine en évolution. In « *Forêts d'Europe* », *Textes et Documents pour la Classe, CNDP, Paris (France)*, 890 : 6-11.
- ENGREF; INRA; ONF. 1984. Tables de production pour les forêts françaises. - 2ème édition revue par B. Vannière. *Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts* : 160 p.
- Franc, A.; Houllier, F. 1989. Etude des relations entre milieu et production. Quelques critères de choix des méthodes. In "Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques". *Buffet et Girault (ed.)*, CEMAGREF : 13-49.
- Goreaud, F.; Courbaud, B.; de Coligny, F. 2005. How long does the spatial structure of an initial state influence the dynamics of a forest growth model ? A simulation study using the Capsis platform. *Actes du colloque : Open International Conference on Modeling and Simulation - OICMS 2005, 13-15 June 2005, Clermont Ferrand (France)* : 217-230.
- Houllier, F. 1991. Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : application à la gestion des ressources forestières. *Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Claude Bernard - Lyon I* : 75 p.
- Houllier, F.; Bouchon, J.; Birot, Y. 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Revue Forestière Française*, XLIII(2) : 87-108.
- IDF. 2003. Peuplements irréguliers et mode de traitement irrégulier. *Dossier du numéro spécial de la revue Forêt Entreprise n° 151, juin 2003*.
- IFN. 2000. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. *IFN, Ministère de l'agriculture et de la pêche* : 129p.
- Jarret, P. 2004. Guide des sylviculture de la chênaie atlantique. *ONF* : 335 p.
- Lanner, R.M. 1985. On the insensitivity of height growth to spacing. *Forest Ecology and Management*, 13 : 143-148.
- Leban, J.M. 1995. Estimations des propriétés des sciages d'une ressource forestière : application à l'Epicéa commun (*Picea abies* Karst.). *Revue Forestière Française* XLVII(n°sp) : 131-140.
- Loustau, D. (éd.). 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. *Rapport Final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et Convention GIP ECOFOR n° 3/2001, Juin 2004, INRA, Bordeaux-Pierroton (France)* : 137 p.
- Meredieu, C.; Dreyfus, Ph.; Riou-Nivert, Ph. 2001a. Des modèles de croissance et de branchaison pour le pin laricio. *Forêt Entreprise*, 137 : 25-31.
- Meredieu, C.; Dreyfus, Ph.; Riou-Nivert, Ph. 2001b. L'apport de la modélisation pour le sylviculteur de pin laricio. Simulation de scénarios sylvicoles. *Forêt Entreprise*, 137 : 38-46.
- Muetzelfeldt, R.; Massheder, J. 2003. The Simile visual modelling environment. *European Journal of Agronomy*, 18 : 345-358.
- Pardé, J.; Bouchon, J. 1988. Dendrométrie - 2ème édition. *ENGREF* : 328 p.
- Pavé, A. 1994. Modélisation en biologie et en écologie. *Aléas, Lyon* : 560 p.
- Perot, T.; Ginisty, C. 2004. Bilan et perspectives sur les modèles de croissance, de dynamique forestière et de qualité des bois. *Rapport de convention Cemagref/DGFA, Cemagref* : 190p.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Dursky, J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162 : 3-21.
- RFF. 1999. L'aménagement forestier hier, aujourd'hui, demain. *Numéro spécial de la Revue Forestière Française, 1999*.
- Spellmann, H. 1992. Concepts for mixed stand studies. *Actes du colloque IUFRO : the IUFRO conference, held in Berlin-Eberswalde, 1992*. 10 p.
- Spiecker, H.; Mielikäinen, K.; Köhl, M.; Skovsgaard, J.P. (éd.). 1996. Growth trends in European forests. *Springer Verlag, Berlin* : 372 p.