



HAL
open science

Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne

Benoît Courbaud

► **To cite this version:**

Benoît Courbaud. Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne. Revue forestière française, 1995, 47 (Spécial), pp.173-182. <10.4267/2042/26710>. <hal-03444249>

HAL Id: hal-03444249

<https://hal.science/hal-03444249v1>

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.



HAL Authorization

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE EN FORÊT IRRÉGULIÈRE. PERSPECTIVES POUR LES PESSIÈRES IRRÉGULIÈRES DE MONTAGNE

B. COURBAUD

Favorisées par la nature des essences présentes, la diversité stationnelle et les aléas naturels, les forêts de structure irrégulière tiennent une place considérable en montagne. Elles y sont souvent mises en avant pour leur renouvellement continu et leur capacité à remplir des fonctions multiples : rôle de protection des activités humaines contre les aléas naturels (avalanches, chutes de blocs, érosions...), rôle paysager, rôle de réservoir biologique, et enfin rôle de production. Les perspectives de l'économie actuelle poussent cependant le forestier à se désengager de nombreuses forêts d'exploitation difficile. La diversité de ces contraintes rend la gestion forestière de montagne particulièrement délicate.

Pour tenter de clarifier les données du problème, notre équipe s'est engagée depuis 1990 dans une série de travaux complémentaires visant à préciser le rôle de protection de la forêt (Berger et Renaud, 1994), à analyser la diversité de structures des peuplements (Renaud *et al.*, 1994), à comprendre leur dynamique et à proposer des réponses sylvicoles. La réalisation d'un modèle de croissance pour l'Épicéa en peuplements purs irréguliers est apparue comme une piste intéressante pour apporter des éléments de réponse aux deux derniers points. L'article suivant présente les perspectives de ce travail en cours de développement.

LA SYLVICULTURE EN FORÊT IRRÉGULIÈRE — QU'ATTENDRE DE LA MODÉLISATION ?

Les bases sylvicoles actuelles

Une structure forestière irrégulière se caractérise par deux éléments :

— La diversité des individus : diversité des diamètres généralement représentée sous forme d'histogramme, mais aussi celle des hauteurs qui rend compte de la répartition verticale des individus, celle des âges et enfin la diversité génétique.

— La complexité de leur répartition spatiale : depuis la répartition pied à pied jusqu'au mélange bouquets/trouées.

En montagne, la structure des peuplements forestiers joue un rôle central en conditionnant les capacités de l'écosystème à remplir ses fonctions multiples. Elle conditionne aussi l'évolution forestière elle-même au travers de la compétition entre les arbres.

Il n'existe de théorie sylvicole que pour deux cas extrêmes de structures de futaie : la futaie régulière et le jardinage pied à pied en situation d'équilibre, cette seconde situation constituant un cas très particulier de la forêt irrégulière (Schütz, 1989) :

— Le nombre d'individus par catégorie de diamètre suit une exponentielle décroissante (loi de Liocourt). Le rajeunissement du peuplement est continu.

— La répartition spatiale des individus d'une catégorie donnée est également régulière. Des arbres de tous âges et de toutes dimensions se trouvent sur une surface restreinte sans que les houppiers ne soient contigus.

Un très grand nombre de forêts de montagne n'appartiennent à aucun de ces modes. On rencontre ainsi très fréquemment des superpositions de deux strates correspondant à un peuplement âgé surmontant un peuplement jeune, des peuplements lacunaires, des peuplements en mosaïques d'unités plus ou moins indépendantes, de plages et de bouquets de tailles variées. Un inventaire classique à l'échelle de la parcelle est alors souvent trompeur : un même histogramme peut aussi bien représenter un ensemble uni qu'une juxtaposition de micro-peuplements indépendants. Le coefficient de variation du volume par hectare calculé à partir de placettes d'inventaire statistique peut ainsi monter à 1,2 (Duplat et Perrotte, 1981).

Devant la diversité et la complexité des forêts irrégulières, il était tout d'abord indispensable d'effectuer un travail de caractérisation des forêts de montagne. Une typologie des structures des pessières des Alpes du Nord a été réalisée dans ce but (Renaud *et al.*, 1994) :

— Un maillage systématique du peuplement en placettes d'un quart d'hectare permet de réaliser une description spatiale relativement fine et exhaustive tout en restant compatible avec une analyse globale à l'échelle du versant.

— Chaque placette élémentaire est ensuite rattachée à un type de structure défini à partir de critères qualitatifs (étagement, importance des trouées...) et quantitatifs (densité, surface terrière...).

La modélisation de la croissance devrait permettre de situer chaque placette dans sa trajectoire dynamique la plus vraisemblable, avec ou sans intervention humaine. Elle aidera ainsi le forestier à mieux évaluer l'évolution de sa mosaïque et affiner sa stratégie sylvicole en conséquence.

Pourquoi construire un modèle ?

De nombreuses études de dynamique en forêt irrégulière ou naturelle reposent sur une typologie des peuplements suivie d'une analyse synchronique pour établir les cycles forestiers ou les enchaînements de types (Mortier, 1990). Cette approche est cependant délicate car les variations de structure dues à l'hétérogénéité stationnelle d'une forêt viennent se superposer à celles qui sont dues à la dynamique. L'interprétation évolutive est donc souvent assez subjective. Il est par ailleurs difficile de trouver tous les intermédiaires assurant les transitions entre types (en particulier entre types réguliers et irréguliers). Les constantes de temps et les vitesses d'évolution sont enfin délicates à déterminer.

L'expérimentation sylvicole est quant à elle limitée par la lenteur des processus forestiers. Elle est encore compliquée en forêt de montagne par la diversité des types de structures à étudier. En France, on ne dispose par ailleurs d'aucune expérimentation sylvicole implantée depuis longtemps sur des forêts irrégulières de montagne. Les informations issues des documents de gestion classiques apportent des informations uniquement à l'échelle de la parcelle qui sont soit globales (inventaires pied à pied), soit peu fiables (descriptions subjectives) et donc difficilement utilisables. Nous manquons enfin de témoin suivi avec précision ; la comparaison directe avec une forêt régulière est rendue délicate par le manque d'un référentiel temporel commun.

Ce constat nous a poussé à étudier la dynamique des peuplements irréguliers au travers de la modélisation de leur croissance. En établissant un certain nombre de relations mathématiques, statistiques ou logiques qui représentent l'évolution d'un ensemble de variables descriptives des peuplements forestiers et des arbres étudiés (Houllier, Bouchon, Birot, 1991), nous espérons pouvoir étudier de manière objective le développement d'un peuplement sur un moyen terme (50 ans...).

L'écriture d'un modèle présente deux atouts :

— Elle permet de formaliser, préciser et tester un certain nombre de connaissances au travers des relations entre variables. Le modèle amène à quantifier et à hiérarchiser les phénomènes.

— Son formalisme le rend opérationnel. Il permettra concrètement de multiplier les structures étudiées et de simuler facilement de nombreux scénarios sylvicoles spatio-temporels.

LES MODÈLES DE CROISSANCE EN PEUPEMENTS IRRÉGULIERS

Les modèles existants

Quatre grands types de modèles forestiers ont été conçus pour la forêt irrégulière. Leur diversité s'explique par celle des écosystèmes étudiés et des attentes des utilisateurs.

Les modèles les plus simples, qui s'apparentent aux modèles classiques utilisés en démographie humaine ou animale, reposent sur la structuration d'une population d'arbres en stades ou en classes de dimensions (Buongiorno *et al.*, 1995). Une matrice de transition représentant les flux d'arbres d'une classe à l'autre dans un intervalle de temps élémentaire permet de calculer l'évolution du peuplement. Si on fait l'hypothèse de la permanence des paramètres, on linéarise le modèle, il est alors facile d'étudier son comportement asymptotique à très long terme. Ces modèles globaux représentatifs du comportement de peuplements classiques sont bien adaptés à une démarche d'aménagement ou d'analyse régionale de la ressource et de la disponibilité en bois mais ne sont pas très souples pour tester des sylvicultures.

Pour tenter de rendre compte plus finement de la diversité des croissances au sein d'un peuplement, des modèles basés sur les caractéristiques individuelles des arbres ont été construits, en particulier pour les grandes forêts relativement irrégulières et mélangées américaines (par exemple Stand Prognosis Model, Wykoff, Crookston et Stage, 1982). À partir de données classiques d'inventaires, des lois sont établies de manière statistique pour relier la valeur des accroissements individuels en diamètre, hauteur ou volume aux dimensions initiales des arbres et à des indices de compétition. Ces derniers, plus ou moins compliqués, sont généralement basés sur le nombre, les dimensions et la position des concurrents. Établis à partir de grosses bases de données, ces modèles dendrométriques classiques permettent de répondre à une problématique d'aménagement régional avec une fiabilité satisfaisante mais ils se révèlent insuffisants pour l'étude fine des parcelles.

D'autres modèles ont été développés à l'échelle de la trouée forestière, ce sont les "gap models" (Shugart, 1984 ; Schäfer *et al.*, 1992) essentiellement tropicaux. Leur objectif se situe beaucoup plus au niveau de la compréhension de l'écologie forestière : ils sont souvent utilisés pour essayer de prévoir les successions d'espèces. La croissance et la compétition y sont représentées au travers d'une modélisation plus ou moins détaillée de processus écophysologiques. Ils présentent malheureusement généralement deux lacunes importantes : les difficultés de la prise en compte de l'organisation spatiale du peuplement sont éliminées grâce à une conception figée de la mosaïque forestière, chaque unité élémentaire de peuplement initiée par un chablis ou "gap" fonctionnant de manière totalement indépendante. La validation des modèles est par ailleurs souvent difficile.

Enfin, un certain nombre de modèles sont en cours d'élaboration en Europe (Pretzsch et Kahn, 1995 ; Koop, 1990), dont l'objectif est plus sylvicole. Ces modèles nécessitent des données dendrométriques fines : mesures de houppiers, localisation des arbres. Les lois de croissance sont encore

établies statistiquement de manière empirique mais cherchent à s'inspirer des processus écophysiologiques (compétition par contact ou pour la lumière, rôle central du houppier dans la photosynthèse...). Adaptés à la simulation de scénarios sylvicoles sur des placettes ou de petits peuplements et validés à cette échelle, ce sont ceux qui se rapprochent le plus de nos objectifs. Si on dispose de références bien établies en peuplements réguliers dans cette gamme de modèles (modèle de Mitchell, 1975), au niveau des peuplements irréguliers nous n'en sommes en revanche qu'aux débuts.

Les besoins spécifiques de la forêt de montagne

L'outil dont nous avons besoin doit répondre à un cahier des charges assez spécifique aussi bien au niveau de l'échelle spatiale que de la structure des peuplements (figure 1, ci-dessous) :

- Modélisation de l'évolution de petites placettes d'un quart d'hectare.
- Peuplement pur d'Épicéa.
- Conditions de forte pente.
- Grande diversité d'âges et de dimensions.
- Grande diversité d'agencements spatiaux.
- Description suffisamment fine de la structure pour rattacher chaque placette à un type structural.

Aucun modèle préexistant ne répondant de manière satisfaisante à l'ensemble de ces caractéristiques, il nous a été nécessaire d'envisager l'élaboration d'un modèle propre.

Figure 1 LES CONTRAINTES DE LA MODÉLISATION EN FORÊT IRRÉGULIÈRE DE MONTAGNE

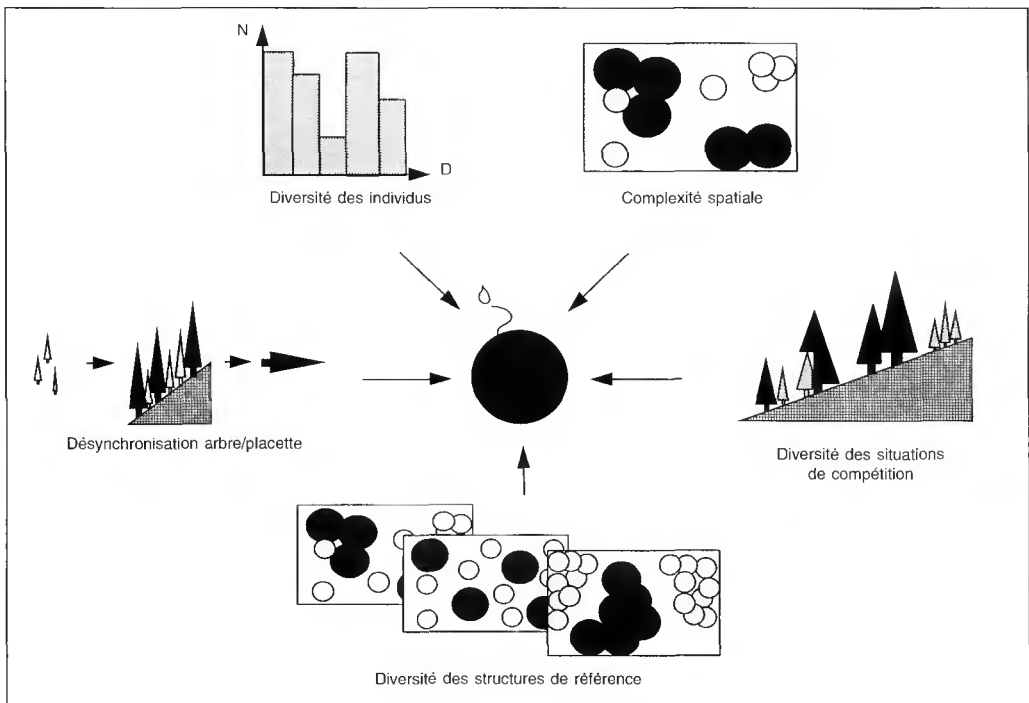
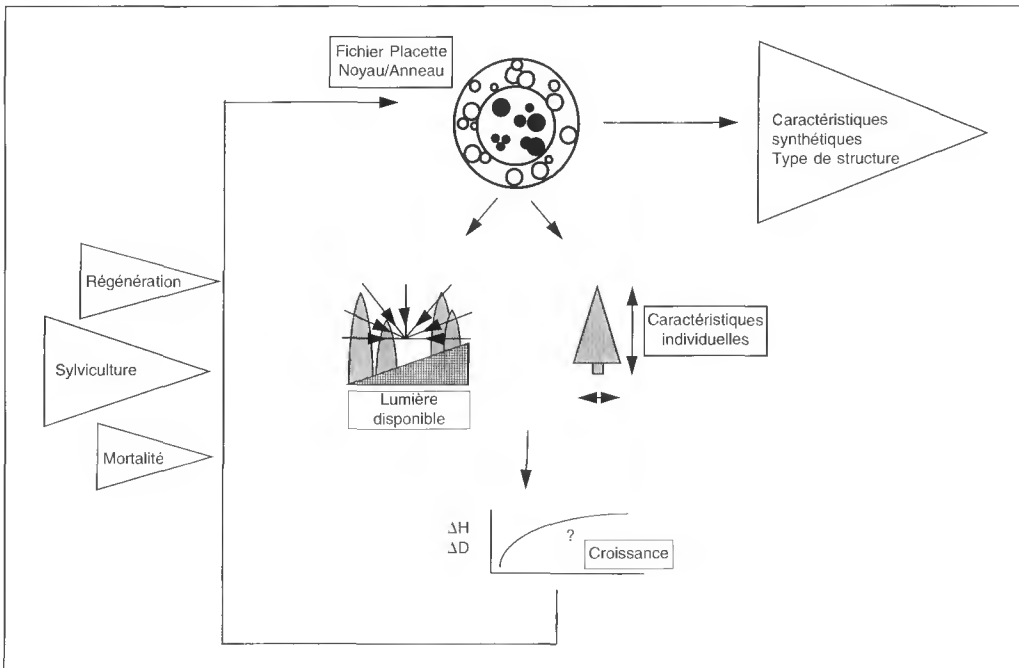


Figure 2

STRUCTURE DU MODÈLE



PERSPECTIVES POUR LES PESSIÈRES IRRÉGULIÈRES DE MONTAGNE

Le choix d'un niveau d'organisation et d'une stratégie

Un travail à l'échelle de "l'arbre spatialisé" (ou modèle "arbre dépendant des distances") permet de prendre en compte les deux contraintes de la diversité des individus et des répartitions spatiales. Nous travaillons sur des placettes d'environ un quart d'hectare sur lesquelles tous les arbres sont décrits de manière simple (hauteur, diamètre, âge) et cartographiés. Le choix a été fait d'une description fine de la structure puisque c'est un maillon clé de la sylviculture de montagne, à la fois au niveau de la dynamique forestière et de la capacité multifonctionnelle de la forêt. La description des arbres est par contre de niveau intermédiaire (pas de description architecturale) et permet d'utiliser le modèle avec un nombre relativement important d'individus.

La compétition est un maillon clé du modèle. Elle permet en effet d'établir le lien entre structure et dynamique, et c'est à son niveau que le forestier peut piloter l'écosystème. L'environnement local des arbres situés en périphérie de placette est malheureusement mal connu. Pour résoudre cette difficulté nous avons choisi l'emboîtement de deux niveaux de précision dans le modèle. Le modèle complet avec compétition est appliqué sur un noyau central d'une cinquantaine d'individus. Un modèle simplifié est appliqué en parallèle sur un anneau périphérique permettant de reconstituer une "ambiance forestière" autour du noyau et d'assurer la continuité entre placettes juxtaposées.

Le modèle procède par itérations annuelles. Un fichier descriptif de la placette initiale donne les caractéristiques de base de chaque arbre. Il permet de calculer des variables intermédiaires plus complexes : forme du houppier et intensité de compétition subie, puis accroissement en hauteur et en diamètre qui permettent d'aboutir au fichier de base de l'année suivante (figure 2, ci-dessus). Régénération, sylviculture et mortalité ne sont pas encore intégrées à l'heure actuelle.

B. COURBAUD

Le modèle est en cours de paramétrage à partir de deux placettes expérimentales à Sainte-Foy-Tarentaise (Savoie) et Sixt (Haute-Savoie). Devant la variété des types de structures irrégulières, il est difficile de se limiter à quelques placettes pour prétendre à la représentativité des structures. Nous avons donc essayé d'utiliser les atouts d'un modèle arbre en choisissant des placettes de terrain présentant une variété maximale de situations individuelles de compétition. C'est donc une "interpolation" à l'échelle de l'arbre qui sert de base au modèle, son utilisation dans des structures variées de peuplement devant se faire par "extrapolation".

La construction du modèle est réalisée en deux étapes permettant une validation de terrain séparée : ajustement et validation d'un modèle de compétition pour la lumière grâce à des photographies hémisphériques prises en différents points de nos placettes, et ajustement et validation d'un modèle de croissance par reconstitution des croissances en hauteur et en diamètre de tous les arbres sur 25 ans. La possibilité de séparer ces deux validations est un avantage important par rapport aux approches empiriques classiques de la compétition car elle permet de diagnostiquer quelles sont les étapes qui peuvent limiter les performances du modèle. Une validation globale du modèle est également possible en comparant l'évolution des placettes sur 25 ans (par exemple, par le suivi des histogrammes du nombre d'individus par classes de diamètre).

La modélisation de la compétition entre individus

De nombreux indices empiriques de compétition ont été élaborés (Houllier, Bouchon, Birot, 1991). D'efficacité limitée quand on descend à l'échelle de l'arbre, les indices classiques manquent surtout de robustesse et de capacités d'extrapolation (Gourlet-Fleury, 1992).

En peuplement irrégulier, la compétition revêt par ailleurs des formes et des intensités variées, nécessitant une représentation polyvalente : la distance jusqu'à laquelle on peut considérer qu'un arbre est concurrent est très variable ; elle dépend des dimensions respectives des individus, de la nature de ce qui les sépare (rideau d'arbres dense ou trouée), de la pente et de l'exposition. L'hétérogénéité verticale est également à prendre en compte avec la possibilité de petits arbres surcimés. Seuls des indices très rustiques présentent cette souplesse (Courbaud, Houllier, Rupé, 1993) et leur performance reste limitée.

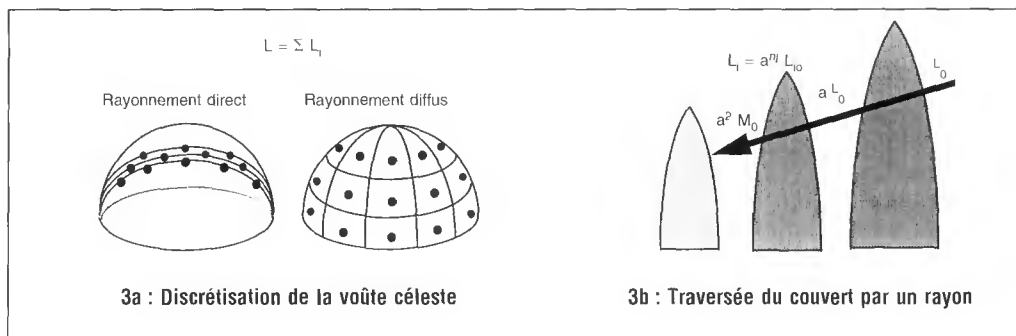
La compétition entre arbres s'exprime en fait à travers la concurrence pour une ressource du milieu : lumière, eau, éléments minéraux, et éventuellement espace. Ces facteurs du milieu agissent de manière conjointe. En pratique, il est cependant indispensable de les hiérarchiser. Dans les pessières des Alpes du Nord, la stratification verticale est marquée. La lumière apparaît donc comme un facteur très variable, bon candidat pour expliquer la diversité des croissances individuelles. Le climat étant très arrosé, le facteur hydrique apparaît par contre rarement limitant. Le facteur lumière est par ailleurs intégrateur de relations spatiales extrêmement diverses entre individus (avec ou sans contact, avec ou sans superposition verticale). Nous avons donc pris le parti d'axer notre modèle sur la compétition pour la lumière en tenant compte cependant des déformations du houppier dues au contact.

L'énergie radiative disponible pour chaque individu est le résultat de la diffusion de la lumière au sein de la canopée. Les modèles développés actuellement en bioclimatologie (Varlet-Grancher *et al.*, 1993 ; Wang et Jarvis, 1990) reposent généralement sur l'analyse des rayons lumineux provenant de la voûte céleste (figure 3a, p. 179). À un instant donné, on peut distinguer rayonnement direct provenant de la direction du soleil et rayonnement diffus provenant de l'ensemble du ciel. Pour garder un pas de temps cohérent avec la durée de vie d'un arbre, nous avons décidé de calculer, dans un sous-programme indépendant, le poids respectif de chaque direction de l'espace comme source d'énergie à une échelle de temps annuelle, avant pénétration dans la canopée. L'hémisphère céleste est ainsi discrétisé en une centaine d'angles solides représentatifs du rayonnement diffus. Le poids de chaque élément dépend de sa hauteur angulaire suivant un modèle classique (le "Standard

Overcast Sky" in Bonhomme, 1993). Une cinquantaine de rayons échantillonnés le long de trajectoires solaires mensuelles permettent quant à eux de répartir spatialement le rayonnement annuel direct (Bonhomme, 1993).

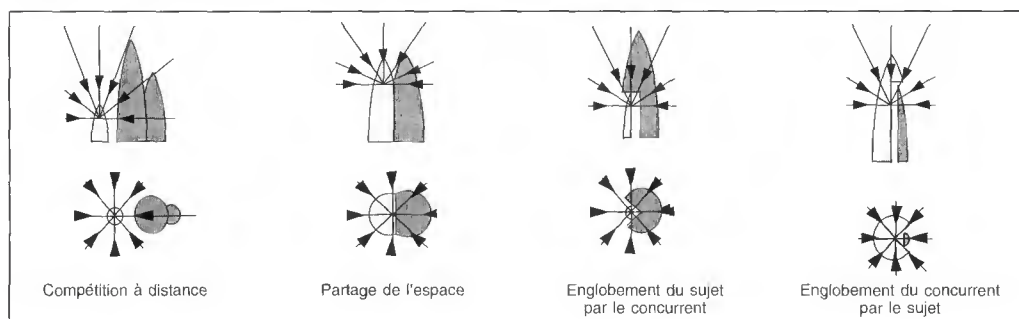
L'influence des compétiteurs sur la lumière intervient dans un second temps grâce au suivi de la trajectoire de chaque rayon élémentaire. Chaque traversée de houppier réduit l'énergie d'un rayon élémentaire suivant une fraction constante (figure 3b, ci-dessous). Cette loi d'extinction très simple a été choisie pour ne pas entrer dans les détails de la répartition complexe du feuillage et de la matière ligneuse au sein d'un houppier. La somme de l'énergie véhiculée par tous les rayons permet enfin de calculer la lumière disponible en un point donné.

Figure 3 PRINCIPES DU CALCUL DE LA LUMIÈRE PAR RAYONS LUMINEUX



La forme des houppiers des concurrents est importante pour calculer les interceptions. Une forme de base symétrique de révolution permet de décrire relativement bien un houppier d'Épicéa, il est alors aisé de tester pour chaque rayon s'il y a interception. Dans les peuplements irréguliers, les houppiers prennent cependant des formes complexes qui nous ont amené à distinguer quatre situations géométriques de base entre le sujet et un concurrent (figure 4, ci-dessous). Quand le concurrent est à distance, il garde sa forme symétrique de base. S'il y a contact, sa forme est tronquée par un plan de partage avec le sujet. S'il surcime le sujet, on lui enlève un quartier lui permettant de l'englober par ses branches rayonnantes. S'il est à son tour englobé, c'est à lui de prendre la forme en quartier. Ces quatre situations permettent un traitement géométrique continu de l'interception d'un rayon par un houppier, quelles que soient la distance et les dimensions d'un concurrent. La validation de cette démarche par comparaison avec des photographies hémisphériques est encore en cours.

Figure 4 LES QUATRE PRINCIPAUX TYPES D'INTERACTIONS GÉOMÉTRIQUES ENTRE HOUPPIERS



La modélisation de la croissance

Le module "croissance" est encore en cours d'élaboration. Devant la complexité des processus physiologiques mis en jeu par la croissance d'un arbre : variabilité de la photosynthèse et de la respiration au sein du houppier, faiblesse des connaissances sur la gestion des flux de matière dans l'arbre, interactions avec les flux hydriques, limites des connaissances sur la croissance en hauteur..., nous avons décidé de l'étudier de manière empirique malgré l'ouverture sur les processus que représente le calcul de la lumière.

Ne pouvant effectuer un suivi expérimental de croissance, nous avons reconstitué l'évolution annuelle des trois variables de base (hauteur, diamètre et âge) de chacun des arbres de nos deux placettes de terrain pour les vingt-cinq dernières années. Ces informations permettent de mettre en relation les accroissements des individus et l'éclairement dont ils ont bénéficié, calculé à partir de la reconstitution annuelle de la carte des placettes. Cette stratégie impose cependant une contrainte importante dans le choix des placettes : aucun individu ne doit avoir disparu sans qu'on en ait eu connaissance. Les deux placettes utilisées pour l'instant n'ont pas subi d'intervention sylvicole depuis trente ans et ne présentent pas de chablis récents, on peut donc estimer qu'aucun compétiteur de taille importante n'a disparu pendant la période de reconstitution. Elles ne peuvent cependant être utilisées que pour une étude globale de la croissance qui devra être complétée par une étude plus fine de la réaction des arbres à un événement brutal tel qu'une éclaircie.

Le modèle est établi par régressions non linéaires sur les nuages constitués par les accroissements et les quatre variables : hauteur, diamètre, âge et lumière disponible. Accroissement en hauteur et en diamètre sont modélisés séparément, en combinant croissance potentielle (la variable clé paraissant être l'âge de l'arbre) et compétition pour la lumière.

Le calcul de lumière disponible est en fait effectué à chaque fois en un seul point de l'arbre (respectivement à 90 % et 60 % de sa hauteur pour la modélisation des accroissements en hauteur et en diamètre) et utilisé comme un indice de compétition classique. Ces deux points fictifs utilisés comme des "barycentres de croissance" permettent d'avoir une première évaluation de la lumière disponible pour l'ensemble de la partie supérieure du houppier avec des temps de calcul relativement courts.

La mortalité et la régénération ne sont pas intégrées actuellement dans le modèle, ce qui limite les possibilités de simulations sur le long terme. Ces aspects complexes devront être étudiés ultérieurement, le module de calcul de lumière constituant un atout précieux pour le faire.

L'utilisation à l'échelle du peuplement

Le travail sur des placettes élémentaires rend nécessaire un passage à l'échelle du peuplement. Il peut être réalisé grâce à l'analyse en mosaïque d'éléments d'un quart d'hectare.

La distinction sur les placettes de modélisation d'un noyau central et d'un anneau périphérique permet de tenir compte de l'influence des éléments de mosaïque adjacents sur le devenir d'une placette. La continuité spatiale du peuplement est ainsi assurée.

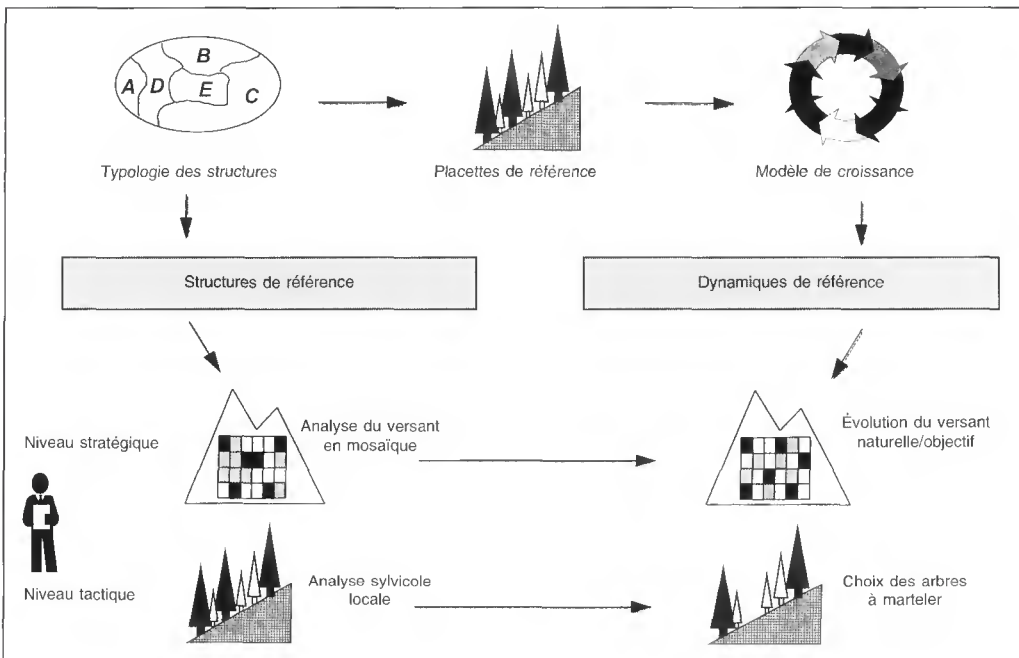
En fait, une utilisation directe du modèle par le praticien sur une forêt réelle n'est pas envisagée même si elle est théoriquement possible, car elle serait trop lourde. Elle doit plutôt être conçue en lien avec la typologie des structures, en amont de la gestion. Le modèle constitue pour nous un outil privilégié pour l'étude des évolutions de types structuraux bien définis à l'échelle du quart d'hectare. Grâce à des placettes de terrain représentatives de structures de référence, nous espérons être en mesure de mettre en évidence par simulation les dynamiques typiques qui leur sont liées et de proposer des stratégies sylvicoles adaptées. Le modèle servirait ainsi à élaborer un référentiel de la dynamique des structures, c'est ce produit qui est destiné à être transféré vers la gestion.

L'outil que nous espérons élaborer pour le praticien s'utilise donc à deux échelles qui correspondent bien à la pratique de la gestion forestière de montagne (figure 5, ci-dessous) :

— La typologie des structures permet l'analyse forestière du versant en mosaïque à mailles d'un quart d'hectare, le référentiel de dynamique permet d'évaluer son évolution. C'est le contexte global de réflexion stratégique du gestionnaire.

— Au moment du martelage, ils interviennent tous deux à un niveau plus tactique. La typologie des structures et des dynamiques joue le rôle de référence et aide le forestier à affiner son analyse de la portion de peuplement qu'il perçoit directement.

Figure 5 **PLACE DE LA TYPOLOGIE ET DU MODÈLE DANS LA GESTION**



CONCLUSIONS

La modélisation de la croissance est délicate en forêt irrégulière mais la complexité du système l'y rend particulièrement utile. Elle peut aider à explorer la variété des peuplements rencontrés, expliquer des comportements qualitativement différents, formaliser et préciser nos connaissances. Elle constitue par ailleurs un élément de progression vers une gestion multifonctionnelle de forêts diversifiées, étroitement adaptées aux conditions locales, écologiques et humaines.

B. COURBAUD
 CEMAGREF - Groupement de Grenoble
 Domaine universitaire
 2, rue de la Papeterie
 F-38402 SAINT-MARTIN-D'HERES CEDEX

BIBLIOGRAPHIE

- BERGER (F.), RENAUD (J.-P.). — Stabilité et fonction de protection des forêts de montagne dans les Alpes du Nord. L'exemple de la forêt domaniale de Rioupéroux (Isère). — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 4, 1994, pp. 359-374.
- BONHOMME (R.). — The solar radiation : characterization and distribution in the canopy. *In* : Crop structure and light microclimate. Characterization and applications / C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet Eds. — Paris : INRA, 1993.
- BUONGIORNO (J.), PEYRON (J.-L.), HOULLIER (F.), BRUCIAMACCHIE (M.). — Growth and management of mixt-species, uneven-aged forests in the french Jura : implications for economic returns and tree diversity. — *Forest Science*, vol. 41, n° 3, 1995, pp. 397-429.
- COURBAUD (B.), HOULLIER (F.), RUPÉ (C.). — Un modèle de croissance en hauteur des arbres en pessière pure irrégulière de montagne. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 50, 1993, pp. 337-351.
- DHÔTE (J.-F.), HOULLIER (F.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : niveaux d'organisation, échelles spatiales et temporelles. *In* : Biométrie et Environnement/J.-D. Lebreton et B. Asselin Éd. — Paris : Masson, 1993.
- DUPLAT (P.), PERROTTE (G.). — Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers. — Office national des Forêts - Section technique, 1981.
- GOURLET-FLEURY (S.). — Indices de compétition : les possibilités d'application à la gestion en forêt dense tropicale humide. — ENGREF ; Université Lyon I, 1992 (Rapport de DEA).
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- KOOP (H.). — Forest dynamics. — Berlin : Springer Verlag, 1989. — XII-229 p.
- MITCHELL (K.). — Dynamics and simulated yield of Douglas-fir. — *Forest Science Monograph*, 17, 1975, 39 p.
- MORTIER (F.). — Sylvigénèse et structures spatiales en forêts tempérées. — Nancy : ENGREF ; Université Nancy I, 1990 (Rapport de DEA).
- PRETZSCH (H.), KAHN (M.). — Modelling growth of Bavarian mixed stands in a changing environment. — IUFRO XX World Congress, 6-12 August 1995, Tampere (Finland), 1995.
- RENAUD (J.-P.), RUPÉ (C.), CHAUVIN (C.), MERMIN (E.), LECLERC (D.), FAY (J.). — Les Forêts résineuses à fonction de protection dans les Alpes du Nord françaises. Typologie générale des structures et méthode descriptive. Analyse de la stabilité des peuplements et interventions sylvicoles. — Rapport de synthèse CEMAGREF/ONF/DERF, 1994.
- SCHÄFER (H.), KRIEGER (H.), BOSSEL (H.). — Process-Oriented models for simulation of growth dynamics of tropical natural and plantation forests. *In* : Tropical Forests in transition/J.G. Goldammer Ed. — Birkhäuser Verlag, 1992.
- SCHÜTZ (J.-Ph.). — Le Régime du jardinage. Document autographique du cours de sylviculture III. — Zürich : ETH - Chaire de Sylviculture, 1989. — 55 p.
- SHUGART (H.). — A theory of forest dynamics. — Berlin : Springer Verlag, 1984. — XIV-278 p.
- VARLET-GRANCHER (C.), BONHOMME (R.), SINOQUET (H.). — Crop structure and light microclimate - characterization and applications. — Versailles : INRA Éditions, 1993.
- WANG (Y.P.), JARVIS (P.G.). — Description and validation of an array model - MAESTRO. — *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 1990, pp. 257-280.
- WYKOFF (W.R.), CROOKSTON (N.L.), STAGE (A.R.). — User's guide to the Stand Prognosis Model. — USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station GTR INT 133, 1982.