

MODÈLES DE CROISSANCE ET GESTION DES FORÊTS : UNE ÉTROITE COMPLÉMENTARITÉ

Jacques Rondeux

Professeur
Département des Eaux et Forêts
Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux
Gembloux, Belgique

RESUME

De la gestion locale d'un peuplement à la planification des ressources forestières, les modèles de croissance apportent aux gestionnaires les éléments qui leur font souvent défaut pour prendre une décision. Les modèles conçus à l'échelle de peuplements ou à celle d'arbres considérés individuellement évoluent dans leur conception méthodologique et sont largement tributaires de la nature et de la qualité des données qu'il est possible de récolter. L'auteur présente trois philosophies de modèles de croissance, de type "peuplement" et de type "arbre", tous orientés vers le traitement, la gestion ou la récolte. Le premier s'appuie sur la notion d'éclaircies numériques appliquées aux peuplements équiennes et relève d'une véritable gestion "à la carte" ; le deuxième est envisagé dans le cadre de la dynamique de l'évolution de peuplements inéquiennes et le troisième concerne l'évolution des ressources ligneuses et l'évaluation de la disponibilité en bois.

ABSTRACT

The aim of this paper is to propose some examples of use for growth and yield models in forest management at different levels of resolution (stand, forest, region) especially by projecting the stand under planned management or silvicultural practices to evaluate their impact. The first example deals with a flexible yield and management model (a whole stand model) for evenaged stands, it uses the principle of numerical thinnings. The second example is based upon an individual tree distance independent model useful to manage and control natural unevenaged stands. The third is above all an application of a forest growth projection system linked to a regional forest inventory.

INTRODUCTION

Qu'il s'agisse de la croissance d'arbres ou de peuplements, celle-ci étant exprimée sous forme de modèles, l'échelle d'application et les objectifs poursuivis restent un élément déterminant à prendre en compte. Les techniques d'estimation de la production ont tellement évolué au cours de ce dernier quart de siècle qu'elles ont largement contribué à améliorer la gestion proprement dite des forêts. A ce titre les modèles de peuplement, les modèles d'arbre et les modèles d'évolution de la ressource, par leur capacité à simuler un grand nombre de situa-

tions, sont autant d'outils potentiels d'aide à la décision utilisables dans un grand nombre d'applications (TITUS et MORTON, 1985) telles que :

- la mise à jour d'inventaires ;
- l'analyse de l'influence de traitements sylvicoles alternatifs ;
- la gestion de peuplements et la planification des ressources ;
- la pratique de sylvicultures à objectifs de production variés.

Dans les lignes qui suivent, nous présentons la philosophie de la démarche utilisée dans trois applications qui illustrent, à des degrés divers, les relations étroites qui peuvent exister entre les modèles de croissance ou de production et les modèles de gestion : la première traitera de la mise en oeuvre d'un modèle de gestion et de récolte "à la carte" conçu pour des peuplements équiennes, la deuxième s'attachera à montrer comment insérer un modèle "arbre" dans une perspective de traitement de peuplements inéquiennes et la troisième, que nous analyserons de manière un peu plus fouillée, explicitera la construction d'un modèle d'évolution de la ressource au départ de l'information fournie par un inventaire forestier régional.

MODÈLE DE GESTION ET DE RÉCOLTE "À LA CARTE"

Ce modèle met en oeuvre le principe des éclaircies numériques et tente de répondre, par simulation, à une question du type "que faut-il faire pour atteindre tel objectif prédéterminé ?".

Si l'on admet que pour un peuplement équiennne monospécifique donné, l'accroissement total en surface terrière est indépendant, dans de larges limites, du nombre d'arbres, le principe même de l'éclaircie numérique est de répartir un potentiel d'accroissement de surface terrière en conformité avec un rythme d'accroissement individuel des arbres en diamètre préfixé (RONDEUX, 1979).

Si l'arbre de surface terrière moyenne d'un peuplement passe entre deux coupes successives d'un diamètre connu à un autre diamètre préfixé, il devra s'accroître d'une quantité de surface terrière individuelle qui, compte tenu de l'accroissement total prévisible en surface terrière, permet de calculer le nombre de bois compatible avec pareilles contraintes. L'accroissement total en surface terrière attribuable à un peuplement est fourni par des tables de production ou est issu de la comparaison d'inventaires successifs portant sur des peuplements aussi comparables que possible à celui qui est étudié.

L'accroissement total prévisible en surface terrière divisé par l'accroissement en surface terrière individuelle, fournit le nombre d'arbres compatible avec cette contrainte. En effet, si nous désignons par :

- d_g = diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne
- i_{d_g} = accroissement annuel en diamètre moyen souhaité
- n = nombre d'années séparant la mesure du diamètre d de la prochaine coupe
- Δg = accroissement périodique de la surface terrière individuelle
- ΔG = accroissement périodique de la surface terrière par hectare entre la mesure de d_g et la prochaine coupe (issu d'une table de production ou de comparaisons d'inventaire)
- N = nombre de bois par hectare compatible avec les accroissements en surface terrière précités.

On peut écrire les relations fondamentales suivantes :

• Données de référence

TABLES DE PRODUCTION

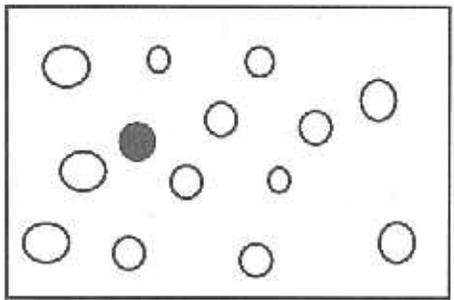
cl 3						
cl 2						
cl 1	A	h _{dom}	Δv	E	Δp	Δcc

COMPARAISON
INVENTAIRES
-
Peuplements
comparables

$\Delta G = f(A, I_0)$

ΔG

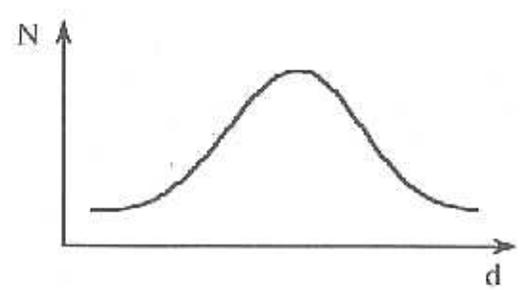
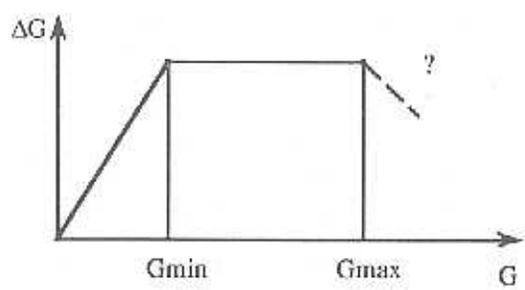
• Données à récolter et contraintes



● = d_g

Peuplement	Contraintes
. âge	id _g (app.)
. h _{dom}	%id _g (biol.)
. d _g	/cl. âge (rotation)
. N	révolution

• Hypothèses .



Equations de base

$$\Delta g = \frac{\pi}{4} (d_g^2 + 2 id_g d_g)$$

$$\Delta g_B = \Delta g \cdot \%$$

$$d_g' = \sqrt{\frac{4(g + \Delta g_B)}{\pi}} \quad (\text{av. \acute{e}cl.})$$

$$N_{AV} = \Delta G / \Delta g_B$$

$$G_{AV} = N_{AV} (g + \Delta g_B)$$

$$NECL = N_{AP} - N_{AV}$$

$$GECL = G_{AP} - G_{AV}$$

$$V = f(G, h_{dom})$$

Figure 1. - Modèle de gestion et de récolte "à la carte" d'un peuplement équiennne

$$\Delta g = \frac{\pi (d_g + n i_{d_g})^2}{4} - \frac{\pi d_g^2}{4} \quad \text{et} \quad N = \frac{\Delta G}{\Delta g}$$

Pour pouvoir être utilisé, le modèle proposé nécessite la connaissance d'un très petit nombre de données : essence, âge, hauteur dominante, diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne et nombre de bois à l'hectare. Il nécessite aussi la prise en compte de contraintes sylvicoles liées aux objectifs poursuivis par le gestionnaire forestier : rotation des coupes d'éclaircie, terme d'exploitabilité (révolution du peuplement exprimée en âge ou en grosseur moyenne) et accroissement individuel moyen ou périodique en diamètre souhaité. Cet accroissement portant sur l'arbre de surface terrière moyenne correspond en réalité à un accroissement apparent. On peut identifier le matériel sur pied avant et après la coupe en appliquant les notions d'accroissement biologique et d'accroissement technique, la première étant liée au temps et la seconde à l'effet même de la coupe (différence entre les diamètres des arbres moyens observés immédiatement après la coupe et avant la coupe).

La fixation de l'accroissement apparent sur le diamètre moyen et de l'accroissement biologique (en pourcentage du premier) constituent les principales contraintes du modèle (figure 1).

MODELE DE GESTION EN FUTAIE INEQUIENNE

De plus en plus de modèles visant à maîtriser le développement des peuplements inéquiennes, éventuellement mélangés, exploitent des relations portant sur l'accroissement individuel d'arbres soumis à des degrés divers de compétition.

Un modèle de gestion de futaies d'allure jardinée mélangée de hêtres et de chênes est actuellement en cours de validation à la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux. Il s'agit en réalité d'un modèle arbre "indépendant des distances" s'articulant sur des équations exprimant la croissance individuelle d'arbres et sur une procédure de simulation des interventions sylvicoles (figure 2) ainsi que sur un sous-modèle "régénération" tenant compte des possibilités de passage à la futaie au cours du temps. A défaut de pouvoir être traduite par un indice dendrométrique de station basé sur l'âge, la variabilité stationnelle est matérialisée au moyen de variables écologiques se référant au climat et au sol.

Dans une première phase, par l'intermédiaire d'unités d'échantillonnage, on identifie les conditions initiales et on mesure les caractéristiques dendrométriques d'arbres (circonférences, hauteurs totales, ...). L'accroissement en circonférence d'un arbre est une fonction de sa circonférence, de sa position sociale, de la densité moyenne et de la structure du peuplement ainsi que de caractéristiques écologiques. La structure est exprimée globalement au moyen du rapport existant entre la variance et la moyenne des grosseurs ($\sigma^2 / \bar{C}M$).

Pour conférer la dimension "gestion" ou "traitement" au modèle, une seconde phase consiste à simuler des interventions sylvicoles. La stratégie de prélèvement peut être exprimée de différentes façons :

- fixation de proportions d'arbres à prélever par classes de grosseur et par essences ;
- fixation de ces mêmes proportions par référence au nombre de bois à prélever dans l'optique d'un peuplement théorique équilibré auquel on aurait appliqué une

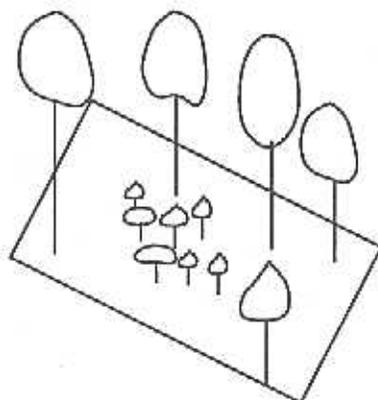
● **Données de base**

- Niveau arbre
futaie (circ > 40 cm)

c_i (circonférence)

Δc_i (accroissement annuel)

P_i (position sociale)



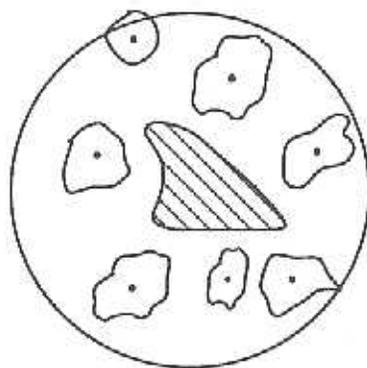
- Régénération
(peuplement)
(circ < 40 cm)

- Niveau peuplement

G (densité)

S (structure = σ^2/CM)

FS (facteurs stationnels)



% occupation par
stades de développement

$S_1 \dots S_4$

● **Modèle**

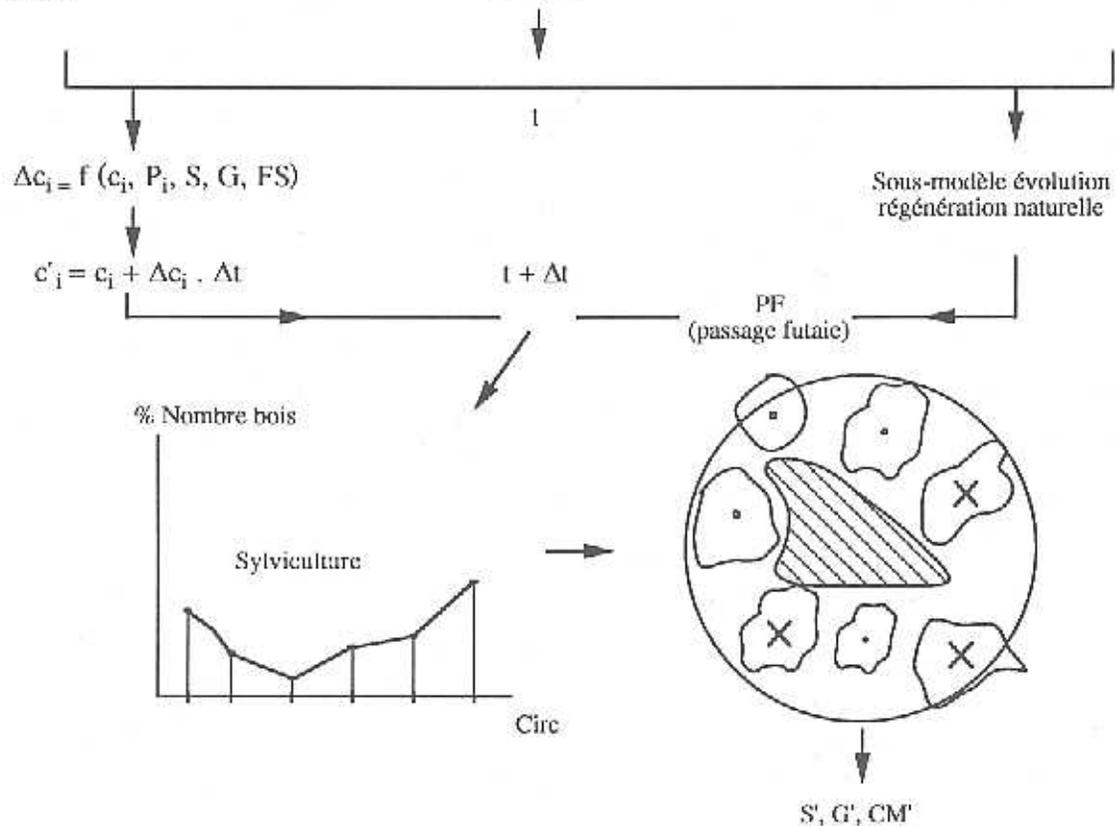


Figure 2. - Schéma général d'un modèle de gestion de futaie inéquienne

promotion moyenne⁽¹⁾ identique à celle relative au peuplement observé (RONDEUX et LECOMTE, 1988) ;

- prélèvement d'une proportion prédéterminée de l'accroissement biologique en surface terrière ;
- prélèvement d'arbres jusqu'à concurrence d'une densité (surface terrière G) rémanente fixée.

On génère ainsi un état final incluant les modifications intervenues dans le peuplement (densité, répartition des nombres de tiges par classes de circonférence) et permettant d'estimer les nouvelles valeurs des variables explicatives intervenant dans le modèle d'accroissement. En fonction de la stratégie d'éclaircies retenue on peut aussi envisager de mettre en oeuvre un processus itératif destiné à identifier le type d'intervention compatible avec un objectif bien déterminé tel qu'une répartition équilibrée des tiges par catégories (sous la contrainte d'une régénération naturelle continue) caractérisée par une courbe en J inversée, par exemple.

MODÈLE D'ÉVOLUTION DE LA RESSOURCE

La mise en oeuvre de ce type de modèle implique l'utilisation de modèles de peuplement (HOULLIER *et al.*, 1991 ; OTTORINI, 1984) ou même d'arbre (USDA, 1979) appliqués à des données récoltées dans des inventaires par échantillonnage nationaux ou régionaux (LECOMTE et RONDEUX, 1992) axés sur l'estimation de la disponibilité en bois. Cet objectif, a priori, n'impose pas une connaissance fine des mécanismes biologiques. Sans doute l'approche "arbre" est-elle compatible aussi bien avec des peuplements de type équienne ou inéquienne et l'approche peuplement cadre-t-elle mieux avec des peuplements exclusivement équiennes. Cette dernière a été appliquée en Belgique, à 200.000 hectares de peuplements équiennes d'épicéa.

La démarche utilisée tient en 3 points :

- réalisation d'un inventaire régional;
- construction d'un modèle de production adapté à l'essence et à plusieurs types de traitement sylvicole;
- élaboration du modèle d'évolution proprement dit.

Inventaire Régional

L'inventaire régional à partir duquel les données de base ont été récoltées s'appuie sur un échantillonnage systématique à maille rectangulaire de 1000 m x 500 m (en ce qui concerne plus particulièrement l'ensemble des peuplements d'épicéa). Les unités d'échantillonnage ont une surface variable selon la densité des peuplements de telle manière qu'elles comportent toujours un nombre de bois voisin de 15 (HEBERT *et al.*, 1988).

Les principales variables dendrométriques suivantes ont été récoltées : âges, circonférences à 1,5 m, hauteurs des $n - 1$ plus gros arbres sur n ares d'unité d'échantillonnage, en vue d'estimer une hauteur dominante. Le remesurage de 15 % des unités a été effectué après une période de 10 ans ce qui a, entre autres, fourni une estimation de l'accroissement moyen périodique en volume.

(¹) Nombre de classes de grosseur que franchissent, en moyenne, les arbres des différentes classes de grosseur du peuplement, au cours d'une période d'accroissement (une promotion moyenne de 1,2, par exemple, signifie que 20 % des arbres d'une classe de grosseur i passent à la classe $i + 2$ et que les 80 % restants passent à la classe $i + 1$).

Modèle de Production de Référence

Le modèle de production mis en oeuvre est typiquement un modèle de peuplement s'appuyant sur la distribution des arbres par catégories de grosseur (HOULLIER *et al.*, 1992) et exploitant des données issues de placettes temporaires et semi-permanentes.

Il comporte trois sous-modèles (DAGNELIE *et al.*, 1988) prenant respectivement en charge :

- la productivité des milieux;
- l'évolution du peuplement principal et du peuplement accessoire;
- le traitement sylvicole pratiqué.

La *productivité des milieux* a été caractérisée grâce à un faisceau de courbes exprimant l'évolution de la hauteur dominante (h_{dom}) en fonction de l'âge (A) et basé sur l'utilisation du modèle de GAUSS modifié qui s'écrit :

$$h_{dom} = b_0 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{A - b_2}{b_1} \right)^2 \right) \right]$$

et qui permet d'identifier plusieurs niveaux de productivité par référence à la hauteur dominante atteinte à l'âge de 50 ans.

L'évolution du peuplement principal et du peuplement accessoire part de l'idée que pour un âge à mi-rotation d'éclaircies⁽²⁾ et un indice de productivité donnés, on peut estimer la circonférence moyenne, le nombre de tiges à l'hectare et les paramètres caractérisant la distribution des circonférences. Les équations utilisées pour définir la distribution des arbres par classes de circonférence mettent en oeuvre le nombre de bois à l'hectare (N), la moyenne arithmétique des circonférences (CM), l'écart-type des circonférences (ETC), les coefficients de dissymétrie de FISHER (G_1) et d'aplatissement de PEARSON (B_2) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \ln N &= a_0 + a_1 \ln CM \\ CM &= a_0 + a_1 h_{dom} + a_2 A \\ \ln ETC &= a_0 + a_1 \ln CM + a_2 \ln h_{dom} \\ B_2 &= a_0 + a_1 CM^2 \\ G_1 &= \text{constante} \end{aligned}$$

On décrit alors les distributions par des distributions continues du type I de PEARSON et par discrétisation de celles-ci, on obtient l'énumération des circonférences.

Grâce à une relation permettant d'estimer l'accroissement E des 5 derniers cerne pour chaque arbre en fonction de sa circonférence C et de son âge A, soit :

$$\ln E = a_0 + a_1 \ln C + a_2 \ln CM + a_3 \ln A,$$

on peut ensuite déterminer la circonférence de ceux-ci en début et en fin de rotation.

L'énumération des circonférences permet le calcul de la surface terrière et du volume sur pied à partir d'équations de cubage adaptées (DAGNELIE *et al.*, 1985). Si les calculs sont effectués pour deux rotations successives, la différence entre la situation à la fin d'une rotation et celle au début de la rotation suivante permet d'estimer les caractéristiques de l'éclaircie.

⁽²⁾ L'intervalle des âges de la table de production issue du modèle correspond, par convention, à la rotation des éclaircies (5 ans).

Le *traitement sylvicole*, important à considérer dans une optique ultérieure de simulation de la récolte de bois, est pris en compte dans la table en imposant un accroissement moyen périodique constant de la circonférence moyenne au cours de la vie du peuplement.

Par application des équations de base on a ainsi défini 5 types de traitements pour chacune des 6 classes de productivité suggérées par l'amplitude du faisceau de courbes hauteur dominante / âge, ce qui a donné lieu à 30 tables de production.

Modèle d'Evolution proprement dit

Le modèle s'applique exclusivement à des peuplements équiennes d'épicéa exploités par coupes rases et vise à fournir l'évolution probable de ceux-ci en termes de surfaces ainsi que de volumes sur pied et de volumes exploités dans une perspective de 5 à 20 ans. Les surfaces sont supposées être réparties uniformément au sein de chaque classe d'âge et on admet que les accroissements annuels courants en volume au sein de chaque classe restent pratiquement constants, pour autant que le rapport entre le volume estimé par le modèle et le volume de référence (table de production) soit compris entre 0,8 et 1,5.

Une succession d'équations permettant de contrôler l'évolution des surfaces et des volumes à l'hectare au cours de périodes échelonnées de 10 en 10 ans a été mise en oeuvre. L'état initial est défini à partir des données récoltées au sein des unités d'échantillonnage couvrant l'ensemble des massifs concernés et est constitué de valeurs de surfaces (estimées par comptages de points) et de volumes (ramenés à l'hectare) répartis par classes d'âge (d'amplitude égale à 10 ans) au sein des différents niveaux de productivité qui ont été identifiés. L'évolution des surfaces résulte de glissements successifs en tenant compte des coupes rases partielles et l'estimation des volumes prend en considération le passage progressif d'une classe d'âge à l'autre avec pour chacune d'elles un prélèvement et un accroissement propres.

Dans ces conditions et de manière très générale on peut écrire, pour une classe d'âge i , et pour $i > 1$, que :

$$S'(i) = [S(i-1)] [1 - CR(i)]$$

- où S' = surface en fin de période (ha),
 S = surface en début de période (ha),
 CR = proportion de surface exploitée en coupe rase (mise à blanc),

et que :

$$V'(i) = V(i-1) + \frac{p-1}{2} [\Delta V(i) - E(i) \cdot V(i) / V_t(i)] \\ + \frac{p+1}{2} [\Delta V(i-1) - E(i-1) \cdot V(i-1) / V_t(i-1)]$$

- où V' = volume en fin de période (m^3/ha)
 V = volume en début de période (m^3/ha)
 ΔV = accroissement annuel en volume (m^3/ha)
 E = prélèvement (éclaircie) annuel moyen en volume (m^3/ha)
 V_t = volume moyen par ha en début de période (valeur issue d'une table de production)
 p = amplitude (années) d'une classe d'âge et durée d'une période de simulation

Quant à l'estimation des prélèvements et des accroissements en volume, ils résultent des équations ci-après :

$$Ve(i) = E(i) [V(i)/Vt(i)] \left[\frac{p+1}{2} S(i) + \frac{p-1}{2} S'(i) \right]$$

$$Vr(i) = S(i) CR(i) \left[V(i) + \frac{p+1}{2} [\Delta V(i) - E(i) \cdot V(i)/Vt(i)] \right]$$

$$VA(i) = \Delta V(i) \left[\frac{p+1}{2} S(i) + \frac{p-1}{2} S'(i) \right]$$

- où Ve = volume total prélevé en éclaircie (m^3)
 VA = accroissement total en volume (m^3)
 Vr = volume exploité en coupe rase (m^3).

Il y a également lieu d'intégrer le volume des promus (VP) dans le processus de calcul (matériel ligneux des peuplements accédant à la première classe mesurable durant la période d'évolution) et de tenir compte des surfaces nouvellement affectées à la production forestière (SN) ainsi qu'aux reboisements de coupes rases à titre de replantations et en incluant les délais de celles-ci.

Dans le premier cas on écrira, pour $i > 1$:

$$VP = \sum [S'(i) V'(i) - S(i) V(i) + Vr(i) + Ve(i) - VA(i)]$$

et dans le second :

$$S'(1) = S(0) + \left(1 - \frac{k}{p}\right) \left[\sum CR(i) S(i) + SN \right]$$

$$S'(0) = \frac{k}{p} \left(\sum CR(i) S(i) + SN \right)$$

où

- $S'(1)$ = surface en fin de première période
 $S'(0)$ = surfaces nues
 k = délai de plantation après coupe rase
 SN = nouvelles surfaces affectées à la production.

Un problème essentiel et dont l'incidence sur les résultats simulés est importante, concerne le choix du terme d'exploitabilité. Grâce à des remesurages effectués au sein de placettes implantées 10 ans plus tôt, il a été possible de définir le terme d'exploitabilité sur des bases objectives et de simuler des taux de mise à blanc fournis par classes d'âge de manière à mieux refléter la sylviculture réellement pratiquée.

CONCLUSIONS

Les modèles de croissance pourraient ne rien être de plus que des tables de production. Cependant au fil du temps, surtout grâce à l'informatique, ils sont devenus nettement plus élaborés ce qui ne justifie pas qu'ils soient pour autant plus complexes, du moins en ce qui concerne leur utilisation, que les tables de production. Les modèles eux-mêmes, dans leur configuration, ont ouvert la voie à des approches plus fouillées et il semble bien que la majorité des

concepteurs ont avant tout privilégié la qualité des prédictions. Le point crucial est cependant de pouvoir disposer de nombreuses données de qualité et d'observations portant sur de longues périodes de temps pour éviter de devoir accepter ou suggérer des hypothèses souvent insuffisamment vérifiées. Le modèle de croissance, vu sous l'angle de l'aide à la gestion, et donc le modèle de gestion qui en découle relèvent d'approches qui ne peuvent s'accommoder d'analyses séparées même si les échelles concernées peuvent parfois être très différentes.

BIBLIOGRAPHIE

- DAGNELIE P., PALM R., RONDEUX J., THILL A. (1985) - *Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 148 p.
- DAGNELIE P., PALM R., RONDEUX J., THILL A. (1988) - *Tables de production relatives à l'épicéa commun (Picea abies KARST)*. Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 123 p.
- HEBERT J., RONDEUX J., LAURENT C. (1988) - Comparaison par simulation de trois types d'unités d'échantillonnage en futaies feuillues de hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. Sci. For.* **45**, 209-221.
- HOULLIER F., BOUCHON J., BIROT Y. (1991) - Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Rev. For. Fr.* **43**, 87-107.
- LECOMTE H., RONDEUX J. (1992) - Les inventaires forestiers nationaux en Europe. Tentative de synthèse. *Cah. For. Gembloux* **5**, 35 p.
- OTTORINI J.M. (1984) - Medium term of available yield from Norway Spruce forests in the North-East of France. *Forestry* **57**, 45-58.
- RONDEUX J. (1979) - A flexible yield and management model for spruce in Belgian Ardenes. In : *Planning, performance and evaluation of growth and yield studies*. Oxford, Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford, 100-109.
- RONDEUX J. (1985) - An outline of a regional forest inventory in Belgium. IUFRO Symposium on "National Forest Inventory System in Europe". Freiburg-im-Brisgau, June 10-14, 1985. In : *Nationale Forstinventuren in Europa*. Mitteilungen der Abteilung für forstliche Biometrie **85**, 328 p.
- RONDEUX J., LECOMTE H. (1988) - Considérations sur la structure actuelle des hêtraies en Ardenne et en Région Jurassique. Implications en matière de traitement sylvicole. *Bull. Soc. R. For. Belgique* **95**, 279-292.
- TITUS S.J., MORTON R.T. (1985) - Forest stand growth models : what for ? *For. Chron.* **1**, 19-22.
- USDA (1979) - *A generalized forest growth projection system applied to the Lake States region*. USDA Forest Service, Gen. Techn. Rep. NC-49, 96 p.