

VINCENT FAVRICHON
CIRAD-Forêt

MODÉLISATION EN FORÊT NATURELLE

Les modèles à compartiments comme outils d'aide
à l'aménagement forestier

La construction
d'un modèle
à compartiments permet
de synthétiser
les connaissances, obtenues
à Paracou (Guyane
française), sur la dynamique
d'un peuplement forestier
tropical humide. Ce modèle
offre en outre la possibilité
de simuler l'impact
de l'exploitation forestière
et des traitements sylvicoles
ultérieurs.



Swartzia sp., ou bois corbeau, sur le sentier botanique de Paracou en Guyane française.
Swartzia sp., or « bois corbeau », on the Paracou nature trail in French Guiana.

La forêt tropicale est souvent décrite comme une ressource naturelle renouvelable. Ce caractère renouvelable n'est toutefois pas une évidence : il dépend du mode de gestion appliqué par l'homme à la forêt. L'un des modes de gestion possible repose sur la production de bois d'œuvre. Comment juger du caractère renouvelable ou « durable » d'un tel aménagement ? Nous nous intéresserons ici simplement à l'aspect technique des choses, c'est-à-dire aux conséquences d'une exploitation forestière sur la dynamique d'un peuplement en forêt dense humide. Pour établir ce diagnostic, il est nécessaire de connaître les mécanismes de la dynamique forestière puis, à partir de ces connaissances, de prédire dans le temps l'évolution d'un peuplement après une perturbation.

La dynamique forestière se situe à une échelle de temps qui dépasse largement une génération humaine. On ne peut donc espérer juger du caractère durable d'une action sylvicole qu'à long terme. Or les observations disponibles aujourd'hui dans ce type de formation végétale portent sur une durée trop courte pour pouvoir être utilisées directement. Les plans d'aménagement élaborés actuellement dans ces forêts reposent donc seulement sur des données de dynamique partielles.

La modélisation est un moyen de contourner cette difficulté. Elle consiste en effet à réaliser une synthèse des connaissances, à un moment donné, pour construire, à partir d'un certain nombre d'hypothèses, une représentation simplifiée de la réalité. Cette représentation, schématique ou mathématique, devient alors un outil à la fois pour la recherche et pour la gestion. Elle donne, par exemple, la possibilité de formuler des questions relatives à la compréhension de la dynamique forestière et permet de simuler rapidement un comportement possible du système réel à long terme après application de différents scénarios de gestion.

En termes forestiers, cela signifie par exemple :

- la représentation de la dynamique forestière par le jeu des paramètres de croissance et de mortalité des arbres, ainsi que la compréhension du rôle de ces paramètres dans la structure et l'évolution des populations,
- l'étude de la stabilité d'un peuplement non perturbé, stabilité qui peut servir de référence pour un diagnostic de « durabilité »,
- la simulation à moyen terme de la réaction d'un peuplement après différents traitements sylvicoles, aidant ainsi le gestionnaire dans ses choix d'aménagement.

Notre objectif est de construire un modèle simple, décrivant la dynamique d'un peuplement forestier tropical humide et permettant de prévoir son évolution après une intervention sylvicole. Ce modèle doit être applicable dans le cadre d'un aménagement forestier et donc faire

appel à des données d'inventaires classiques, souvent peu détaillées. Ces données nécessaires, mais pas forcément suffisantes, sont en particulier la répartition des individus par classes de diamètre et la composition floristique du peuplement. Nous présenterons successivement le modèle choisi et son comportement théorique, puis la construction concrète d'un modèle à partir des données du dispositif de Paracou mis en place par le CIRAD-Forêt en Guyane française (SCHMITT et BARITEAU, 1990) et enfin quelques résultats obtenus.

MODÈLE À COMPARTIMENTS

Principe et propriétés

Avant d'entamer ce travail, il s'agit de bien connaître le système réel à modéliser et les contraintes existantes. Le terme « hétérogénéité » peut caractériser la dynamique d'une forêt tropicale. Cette hétérogénéité se manifeste en premier lieu par la grande diversité spécifique mais aussi par la structuration verticale et horizontale complexe. Ces éléments se combinent et aboutissent à des dynamiques individuelles de régénération, croissance et mortalité, très variées. Face à ces hétérogénéités, le chercheur utilisant un dispositif précis tel que celui de Paracou, se trouve souvent désarmé par l'insuffisance relative des données (sans parler de sa propre expérience en modélisation). Cette insuffisance s'exprime sous deux aspects.

- Le premier concerne la quantité de données récoltées : faible nombre de variables mesurées et surtout durée d'observation encore courte.



Parcelles-témoins : inventaire annuel des diamètres.
Control plots : annual girth inventory.

- Le second a trait à la qualité des données : faible précision des mesures de croissance et reconnaissance botanique des arbres imparfaite.

Compte tenu des objectifs fixés et des contraintes rapidement décrites, nous avons choisi d'utiliser, parmi les nombreux types de modèles existants (HOULLIER, 1986 ; VANCLAY, 1995), un modèle démographique de peuplement basé sur l'utilisation de matrices de passage, modèle dont nous présentons maintenant le principe et les propriétés (cf. également HOUDE, LEDOUX, 1995).

PRINCIPE

Toute modélisation passe par des simplifications de la réalité et, dans le cas d'un modèle démographique, il s'agit de simplifier, dans l'espace, le temps et la diversité, des comportements individuels. Ces choix sont difficiles, car réducteurs d'une réalité complexe et ils impliquent une part d'arbitraire. Il est indispensable de bien les expliciter et, autant que possible, d'en évaluer les conséquences en terme de comportement du modèle. On a défini ici : une surface unitaire représentant un peuplement « moyen », un pas de temps ou période de projection, des groupes d'arbres ayant un comportement supposé identique.

Le principe d'un tel modèle peut ensuite être exposé à partir d'une représentation très schématique de la dynamique d'un peuplement forestier (cf. fig. 1).

Au temps t , les arbres sont répartis en k compartiments, par exemple des classes de diamètre, d'effectifs $n_{1t} \ n_{2t} \dots \ n_{it} \dots \ n_{kt}$. On représente donc l'état du peuplement par le vecteur N_t des effectifs par classes. La dynamique du peuplement est ensuite représentée, par analogie avec les processus probabilistes de Markov, par le suivi de la croissance et de la mort des individus. Un arbre vivant dans la classe de diamètre i au temps t peut, au temps $t + 1$:

- soit rester dans cette classe avec la probabilité $p_{ii,t}$

- soit passer dans la classe $i+1$ avec la probabilité $p_{i+1,t}$
- soit mourir avec la probabilité $m_{i,t}$.

Comme on ne considère que les arbres de plus de 10 cm de diamètre à 1,30 m, le peuplement est tronqué et l'on doit introduire également le recrutement, $r_{i,t}$, c'est-à-dire le nombre d'arbres qui atteignent le diamètre de précomptage entre les temps t et $t + 1$.

FORMALISATION

Cette représentation schématique peut être formalisée par une équation de récurrence :

$$N_{t+1} = P(t) (I - M(t)) N_t + R(t)$$

où :

N_t est le vecteur d'état au temps t ,

$P(t)$ est la matrice des probabilités de passage, $p_{ij,t}$ entre les temps t et $t + 1$,

$M(t)$ est la matrice des probabilités de mort, $m_{i,t}$ entre les temps t et $t + 1$,

$R(t)$ est le vecteur des effectifs recrutés, $r_{i,t}$ entre les temps t et $t + 1$,

I est la matrice identité.

Pour calculer le vecteur N_{t+1} , on procède donc de la façon suivante : à partir du vecteur N_t on applique la matrice de survie $I - M(t)$ puis, sur les arbres restant vivants, la matrice de passage $P(t)$. On ajoute ensuite le recrutement $R(t)$. On peut noter que, dans le cas de ce modèle général, les matrices P et M et le vecteur R dépendent du temps. Plus précisément, on traduira cette absence de stationnarité du système par la dépendance entre les paramètres du modèle et des variables liées à l'état du peuplement au temps t . Cette dépendance permet de faire le lien entre les observations disponibles sur le système (construction des équations de régulation) et les prédictions (simulation du comportement futur).

La forme développée de l'équation précédente montre la structure de ces matrices.

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_k \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} p_{11} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ p_{12} & p_{22} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p_{k-1,k} & p_{kk} \end{pmatrix}_t \begin{pmatrix} 1-m_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1-m_2 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-m_k \end{pmatrix}_t \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_k \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{pmatrix}_t$$

Remarque : on suppose ici que :

$$p_{ij,t} = 0 \text{ si } j > i + 1 \text{ ou si } j < i$$

c'est-à-dire que, de par le choix du pas de temps et des classes de diamètre, un arbre ne peut pas sauter de plus

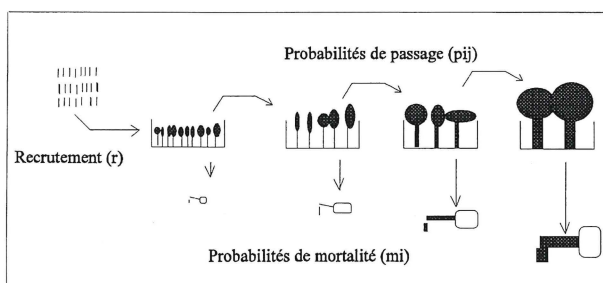


Figure 1. Représentation schématique de la dynamique d'un peuplement forestier par un modèle à compartiments. Schematic representation of the dynamics of a forest stand using a compartmental model.

d'une classe pendant une période de temps et, d'autre part, ne peut pas passer dans une classe inférieure.

Comment estime-t-on les probabilités $p_{ij,t}$, $p_{i,j+1,t}$ et $m_{i,t}$? Dans le cas d'un modèle déterministe, on ne s'intéresse pas aux probabilités attachées à chaque individu mais à l'espérance de ces probabilités pour l'ensemble des individus d'une classe donnée. Quand on dispose, comme c'est le cas à Paracou, du suivi annuel du diamètre de chaque arbre, l'estimateur du maximum de vraisemblance de ces probabilités est alors calculé, à partir de notre échantillon, par les proportions d'arbres de la classe i qui restent dans leur classe, changent de classe ou meurent entre les temps t et $t + 1$ (ANDERSON, GOODMAN, 1957).

CONDITIONS D'APPLICATION ET PROPRIÉTÉS

Pour obtenir un comportement à long terme satisfaisant et pouvoir rendre compte de l'effet de perturbations artificielles, il est nécessaire de faire intervenir une ou des régulations sur les paramètres du modèle. Le modèle repose alors sur le fait que la variation de l'état du peuplement au cours du temps influe sur sa dynamique. Le choix des paramètres régulés (recrutement, probabilités de passage ou probabilités de mort), et le choix des variables et de la forme des régulations influent sur le comportement du modèle (état d'équilibre et vitesse de convergence vers cet état). Par exemple, dans le cas d'une régulation du seul recrutement par une variable d'état telle que l'effectif total N_t , plusieurs auteurs ont montré que le modèle conduit à un état stable, en effectif et structure diamétrique, qui est unique (BUONGIORNO, MICHIE, 1980 ; HOULLIER *et al.*, 1989). Cet état stable est en particulier indépendant de l'état initial. Si l'on ajoute à la simple régulation du recrutement une régulation des probabilités $p_{ij,t}$ et $m_{i,t}$ on ne dispose plus alors de résultats analytiques sur le comportement du modèle, mais les simulations réalisées sur Paracou indiquent également l'existence d'un état stable unique.

DÉMARCHE PRATIQUE DE CONSTRUCTION DU MODÈLE

BREF RAPPEL SUR PARACOU

En 1984, 12 parcelles carrées de 6,25 ha ont été délimitées dans une forêt primaire près de Kourou (5°15' N ; 52°55' O). Quatre traitements sylvicoles ont été appliqués selon un dispositif en bloc complet (MAITRE, 1984) :

- 3 parcelles sont restées intactes (parcelles-témoins, notées T_0),



Pancarte à Paracou : le plan du dispositif de recherche sylvicole pour l'aménagement de la forêt guyanaise.
Notice board at Paracou : the silvicultural research unit management plan for forest development in French Guiana.

- 3 parcelles ont subi une exploitation du bois d'œuvre en 1986 (T_1),
- 3 parcelles ont subi une exploitation du bois d'œuvre, puis une éclaircie par dévitalisation en 1987 (T_2),
- enfin les 3 dernières parcelles ont fait l'objet d'une exploitation du bois d'œuvre et du bois énergie suivie d'une éclaircie (T_3).

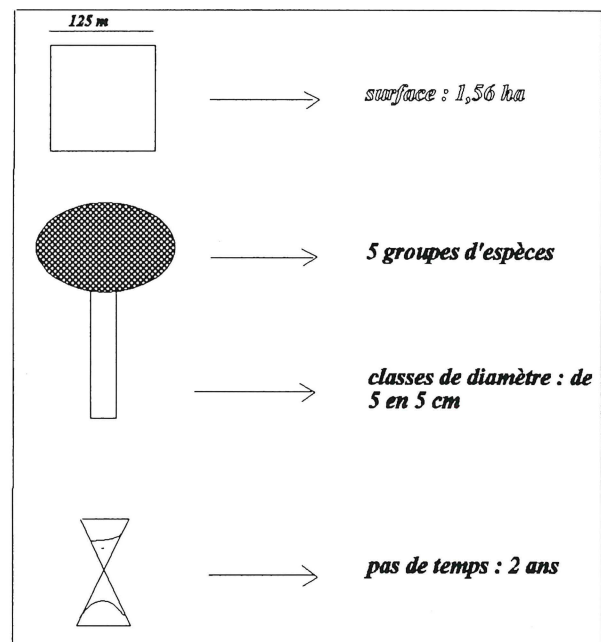


Figure 2. Préable à la modélisation : choix des unités élémentaires de surface, temps et compartiments.
Prior to modeling : choice of elementary units of surface, time and compartments.

Le positionnement des arbres et le suivi annuel du diamètre et de la mortalité depuis 1984 permettent de nombreuses études sur la structure et la dynamique des peuplements ou des individus. L'effet immédiat des traitements sur la dynamique a été étudié en particulier par SCHMITT et BARRITEAU (1990). L'analyse du système à modéliser aboutit ensuite au choix des unités élémentaires.

Nous avons retenu de travailler sur des carrés unitaires de 1,56 ha, de réaliser les estimations de paramètres et les projections avec un pas de temps de deux ans et de grouper les arbres par classes de diamètre. Nous avons retenu 11 classes de taille constante égale à 5 cm. Nous avons également regroupé les individus en 5 groupes d'espèces (SWAINE, WHITMORE, 1988 ; FAVRICHON, 1994).

IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

Une fois établis ces choix, on procède alors à l'identification des paramètres du modèle. Cette identification repose sur le calcul du recrutement et des probabilités de passage ou de mort sur les carrés élémentaires, sur lesquels on calcule également la valeur de variables de régulation liées au peuplement, telles que par exemple la densité totale N_t ou la surface terrière totale G_t . On cherche ensuite les meilleurs ajustements des paramètres en fonction de ces variables. Une des qualités de ces ajustements est leur simplicité, c'est-à-dire que le nombre minimal de variables est retenu dans toute la mesure du possible (principe de parcimonie, PAVÉ, 1994). Nous avons considéré le recrutement comme dépendant de l'effectif total du peuplement, la mortalité constante par classe de diamètre et les probabilités de passage, fonction du diamètre considéré et de la densité du peuplement.

Il nous a semblé également indispensable de rendre compte de l'influence de l'état initial du peuplement sur l'état final. Nous avons utilisé le rapport N_t/N_0 comme variable de régulation du recrutement et le rapport G_t/G_0 pour la régulation des probabilités de passage (où N_0 et G_0 sont les valeurs de la densité et de la surface terrière totale du peuplement avant tout traitement sylvicole). L'état stable obtenu est alors une fonction continue et monotone de l'état initial. Contrairement à la plupart des modèles de ce type utilisés en foresterie, on introduit donc un effet indirect de la station.

Les fonctions de régulation suivantes ont finalement été retenues (FAVRICHON, 1995) :

- Recrutement :

$$r_{1,t} = a \exp(-b N_t/N_0) \text{ et } r_{i,t} = 0 \text{ pour } i > 1$$

- Probabilité de mort :

$$m_{i,t} = c$$

- Probabilité de passage :

$$p_{i+1,t} = b_{T0} + b_{T1}D_i + b_{T2}D_i^2 + b_{T3}D_i^3 + b_{E0} + b_{E1} G_t/G_0$$

où D_i est le centre de la classe de diamètre i .

Dans la dernière équation, le paramètre « régulateur » b_{E1} est négatif, ce qui traduit bien un effet négatif de la densité du peuplement sur la croissance individuelle moyenne. Un jeu de fonctions de régulation est construit pour chaque groupe d'espèces. Une hypothèse supplémentaire relative à la régulation des groupes les uns par rapport aux autres a été faite. N'ayant pas pu mettre en évidence d'interactions particulières d'un groupe sur un autre, on a calculé les régulations pour un groupe en fonction de variables globales du peuplement. L'intensité de ces régulations dépend toutefois du groupe considéré traduisant ainsi les différences de tempérament.

QUELQUES RÉSULTATS

Les équations retenues pour modéliser les paramètres de dynamique forestière ne permettent pas d'étudier directement le comportement du modèle. Pour observer, analyser et valider ce comportement il est nécessaire d'appliquer le modèle à un peuplement réel (projection dans le temps) et de calculer l'évolution des principales caractéristiques de celui-ci ; ce qui intéresse le gestionnaire est surtout l'évolution des parcelles après exploitation et éclaircie. Nous avons donc simulé les traitements appliqués à Paracou.

On présente p. 28, à titre d'illustration, l'utilisation du modèle précédent dans le cas d'une perturbation de type « exploitation des arbres d'essences commer-



Parcelles traitées : le peuplement six ans après exploitation et éclaircie.

Treated plots : the stand six years after logging and thinning.

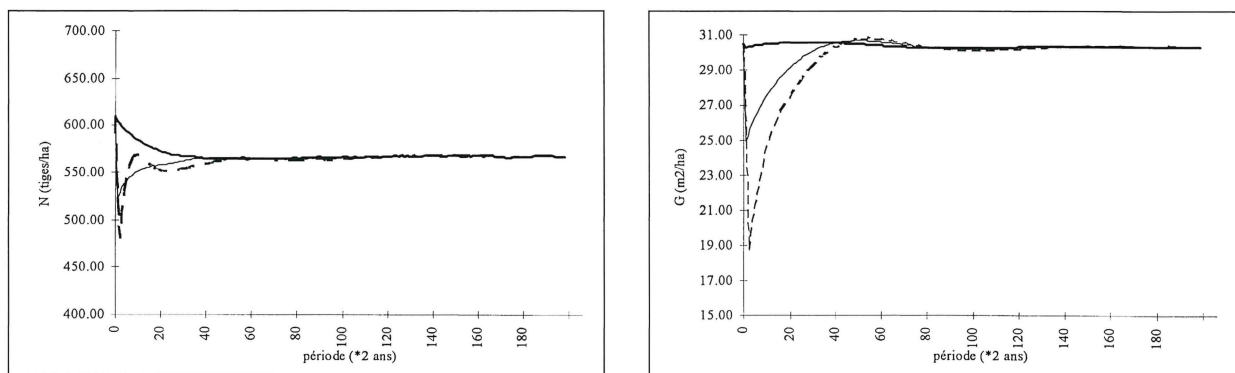


Figure 3. Evolution de l'effectif (à gauche) et de la surface terrière (à droite) de l'ensemble du peuplement. Comparaison des traitements par exploitation seule (trait fin) et par exploitation + éclaircie (trait discontinu) avec le peuplement témoin (trait épais).

Development of numbers (left) and surface area (right) of the overall stand. Comparison of treatment by logging alone (fine line) and by logging + thinning (dotted line) with the control stand (bold line).

ciales » (T1) et « exploitation des arbres d'essences commerciales suivi d'une éclaircie » (T2) au temps $t = 1$.

Comme le montre la figure 3, le modèle conduit, dans un premier temps, à une diminution importante de l'effectif par exploitation et dégâts directs.

Le peuplement retrouve ensuite les valeurs initiales de N et G après 80 à 120 ans suivant l'intensité de la perturbation. On peut noter l'effet plus déstabilisant d'un traitement fort de type T_2 . Cette durée de retour à l'équilibre pourrait servir de base à la définition d'un cycle de rotation des coupes.

L'évolution de chaque groupe d'espèces est présentée dans la figure 4 pour le traitement sylvicole (évolution de N_{T_2}).

Ces projections en parcelles traitées donnent une image de l'impact des perturbations sur la composition floristique. On observe, en particulier, quels sont les groupes favorisés à court et moyen termes (groupes héliophiles surtout). Dans le cas d'un traitement fort, on assiste à une explosion sur 40 ans environ des effectifs des espèces pionnières et à la réaction, nette et plus prolongée, des espèces héliophiles (pendant au moins 120 ans). Le groupe 3, qui contient la plupart des espèces commerciales, ne retrouve sa place qu'après plus de 100 ans.

Il faut toutefois valider ce modèle, c'est-à-dire au minimum vérifier si les prévisions sont compatibles avec des données réelles. C'est une étape indispensable mais souvent difficile en foresterie faute de données sur une durée assez longue. Nous avons pu réaliser cette comparaison à court terme, 6 ans, sur le dispositif de Paracou et à moyen terme, 40 ans, sur le dispositif du BAFOG

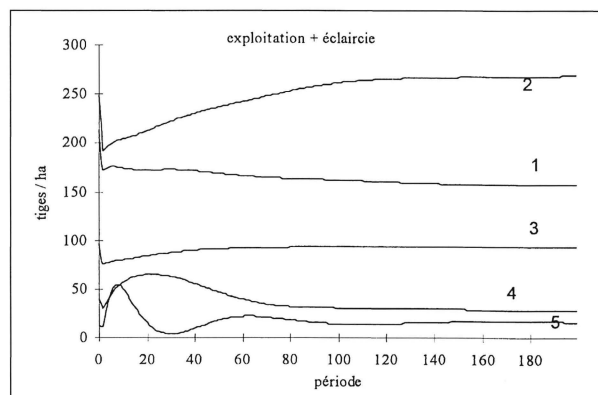


Figure 4. Evolution simulée de l'effectif par groupes d'espèces pour le traitement sylvicole T_2 .

Groupe 1 : espèces tolérantes du sous-bois.

Groupe 2 : espèces tolérantes de la voûte.

Groupe 3 : espèces semi-tolérantes émergentes.

Groupe 4 : espèces héliophiles de la voûte.

Groupe 5 : espèces héliophiles de strate inférieure.

Simulated growth in number of trees by groups of species for the silvicultural treatment T_2 .

Group 1 : tolerant understory species.

Group 2 : tolerant canopy species.

Group 3 : semi-tolerant emergent species.

Group 4 : light-demanding canopy species.

Group 5 : lower stratum light-demanding species.

(Guyane française). Malgré quelques différences qu'il est difficile de tester, on a conclu que les simulations obtenues par le modèle pour l'ensemble du peuplement sont réalistes à court comme à moyen termes (FAVRICHON,

1995). On observe que la dynamique par groupe d'espèces est également cohérente avec les comportements qualitatifs théoriques et avec les observations faites par de nombreux auteurs (GAZEL, 1983). Toutefois, cette évolution par groupes n'a pas pu être validée quantitativement faute de données suffisantes.

DISCUSSION

Ce travail de modélisation, bien que très simplificateur, apporte un certain nombre d'éléments de réflexion pour le gestionnaire forestier. Dans les parcelles perturbées, les projections effectuées indiquent un retour à l'état stable environ 80 ans après traitement sylvicole. Ces projections sont relativement bien validées à court et moyen termes. Mais les perturbations dues à la sylviculture entraînent une évolution marquée et prolongée de la composition floristique. L'impact de l'intensité des perturbations est très net en particulier sur la place relative des espèces héliophiles. On retiendra donc que le modèle rend bien compte et quantifie l'importance d'une prise en considération du facteur espèce dans la définition d'une sylviculture « durable ». Les simulations permettent de visualiser l'évolution de la composition floristique après perturbation, évolution observée par

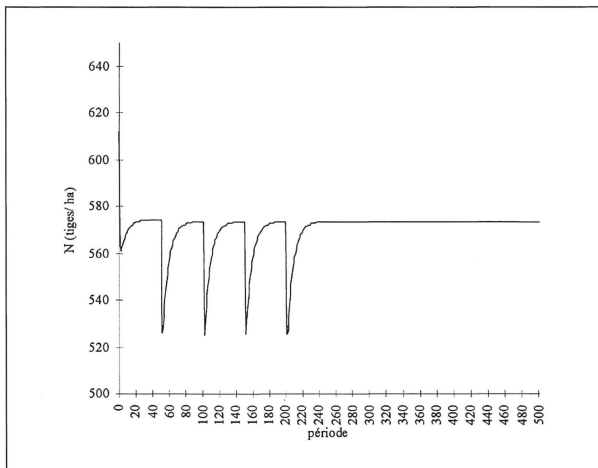


Figure 5. Evolution de l'effectif total dans le cas d'une exploitation du bois d'œuvre avec un cycle de rotation de cent ans.

Growth in total numbers of trees in the case of timber logging with a 100-year rotation cycle.

certain auteurs sur le terrain (GAZEL, 1983 ; SILVA *et al.*, 1995). On sera en particulier prudent quant à l'utilisation d'un traitement sylvicole intense après exploitation. Dans le cas d'une simple exploitation, le modèle permet de proposer des durées de rotation variant entre 50 et 80 ans suivant l'intensité de la coupe. Si l'on exploite régulièrement, le modèle met en évidence que l'on observera inéluctablement une transformation du milieu. Même si l'état forestier (effectif et surface terrière totaux) est conservé (fig. 5), on modifie durablement la composition floristique. L'intérêt du suivi, même simplifié, de la diversité floristique, apparaît ici puisque cette diversité pourrait servir d'indicateur de perturbation du milieu (PREVOST, SABATIER, 1993).

Les perspectives ouvertes à l'issue de ce travail sont nombreuses. Nous citerons par exemple :

- L'utilisation de logiciels de programmation existants, plus conviviaux pour rendre le modèle opérationnel pour les aménagistes.
- L'intégration dans un modèle plus large avec la prise en compte d'autres données, de régénération par exemple, pour évaluer la viabilité d'un mode de gestion au-delà de la première rotation. Cette intégration serait possible en utilisant les données de l'INRA sur le dispositif de Paracou.
- L'application du modèle dans d'autres sites, en Afrique ou en Asie par exemple.
- L'étude théorique du comportement des modèles à régulation complexe, en particulier dans le cas du modèle à plusieurs groupes d'espèces.

Ce travail s'inscrit enfin dans un ensemble d'études, menées en Guyane dans le cadre du G.I.S. Silvolab, qui devraient aboutir à une meilleure description et compréhension de la dynamique forestière. Nous citerons entre autres des travaux de systématique, de modélisation basé sur la dynamique individuelle (à l'aide de système multi-agents ou d'automates cellulaires), de caractérisation des stations forestières et de diversité génétique. □

Remerciements : L'auteur remercie M.-F. PRÉVOST, J.-C. BERGONZINI, F. HOULLIER, L. HOUDE pour leurs conseils, ainsi que P. PETRONELLI et toute l'équipe de Paracou pour leurs observations de terrain.

► Vincent FAVRICHON
Programme Forêt naturelle
CIRAD-Forêt / Baillarguet
B.P. 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON T. W., GOODMAN L. A., 1957.
Statistical interference about Markov chain. *Ann. Math. Stat.* 28 : 89-110.
- BUONGIORNO J., MICHIE B. R., 1980.
A matrix model of uneven-aged forest management. *For. Sci.* 26 (4) : 609-625.
- FAVRICHON V., 1994.
Classification des espèces arborées en groupes fonctionnels en vue de la réalisation d'un modèle de dynamique de peuplement en forêt guyanaise. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)* 49 : 379-403.
- FAVRICHON V., 1995.
Modèle matriciel déterministe en temps discret. Application à l'étude de la dynamique d'un peuplement forestier tropical humide (Guyane française). Thèse de doctorat. Université Lyon I, 252 p. + annexes.
- GAZEL M., 1983.
Croissance des arbres et productivité des peuplements en forêt dense équatoriale de Guyane, rapport ONF, 129 p.
- HOUDE L., LEDOUX H., 1995.
Modélisation en forêt naturelle : stabilité du peuplement. *Bois et Forêts des Tropiques* 245 : 21-26.
- HOULLIER F., 1986.
Echantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. Application au cas de l'inventaire forestier national. Thèse Université Lyon I, 292 p.
- HOULLIER F., LEBRETON J.-D., PONTIER D., 1989.
Sampling properties of the asymptotic behavior of age- or stage-grouped populations models. *Math. Biosci.* 95 : 161-177.
- LESLIE P. H., 1945.
On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika* 33 : 183-212.
- MAITRE H.-F., 1984.
Projet de recherches sylvicoles sur les peuplements naturels en forêt dense guyanaise. Rapport interne. Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, 65 p.
- PAVÉ A., 1994.
Modélisation en biologie et en écologie. Ed. Aléas, Lyon, 559 p.
- PREVOST M. F., SABATIER D., 1993.
Variations spatiales de la richesse et de la diversité du peuplement arboré en forêt guyanaise. In : *Coll. Phytogéographie tropicale : réalités et perspectives*. MNHN, Paris, 20 p.
- SCHMITT L., BARITEAU M., 1990.
Gestion de l'écosystème forestier guyanais. Etude de la croissance et de la régénération naturelle. Dispositif de Paracou. *Bois et Forêts des Tropiques*. 220 : 3-24.
- SILVA J. N. M., CARVALHO J. O. P., LOPES J. do C. A., ALMEIDA B. F. de, OLIVEIRA L. C. de, VANCLAY J. K., SKOVSGAARD J. P., 1995.
Growth and yield of a tropical rain forest in the Brazilian Amazon 13 years after logging. *For. Ecol. and Manage.* 71 : 267-274.
- SWAINE M. D., WHITMORE T. C., 1988.
On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio* 75 : 81-86.
- VANCLAY J. K., 1995.
Growth models for tropical forests : a synthesis of models and methods. *For. Sci.* 41 (1) : 7-42.

R É S U M É

MODÉLISATION EN FORÊT NATURELLE

Les modèles à compartiments comme outils d'aide à l'aménagement forestier

Un modèle matriciel déterministe en temps discret avec densité-dépendance est présenté ici. Il doit fournir un guide dans le choix de méthodes de gestion de la forêt tropicale humide (durée de rotation et intensité de coupe, impacts sur la diversité floristique).

Ce modèle est calibré grâce aux données recueillies sur le dispositif du CIRAD-Forêt à Paracou en Guyane française. Le modèle, partiellement validé à court et moyen termes sur des données externes, permet de discuter de la stabilité d'un peuplement naturel et de sa réaction après une perturbation sylvicole en termes de structure diamétrique et de composition floristique.

Mots-clés : Forêt tropicale humide. Guyane française. Evolution de la population. Peuplement forestier. Composition botanique. Modélisation. Modèle mathématique. Analyse statistique.

A B S T R A C T

MODELING IN NATURAL FOREST

Compartmental models as tools to assist forest management

A discrete time deterministic matricial model with density dependence is here described. It is intended to provide guidance in the choice of management methods for tropical rain forest (length of rotation period and felling intensity, impact on species diversity).

This model is calibrated on the basis of data collected from the CIRAD-Forêt unit at Paracou in French Guiana. The model has been partially validated in the short and medium term on external data. It helps to discuss the stability of a natural stand and its reaction after a silvicultural treatment in terms of diametric structure and species composition.

Key words : Tropical rain forest. French Guiana. Population dynamics. Forest stands. Botanical composition. Models. Mathematic models. Statistical analysis.

R E S U M E N

MODELIZACIÓN EN BOSQUE NATURAL

Los modelos de compartimientos a título de ayuda para la ordenación forestal

Se presenta en este artículo un modelo matricial determinista en tiempo discreto con densidad-dependencia. Este modelo está llamado a proporcionar un guía para la opción de métodos de gestión del bosque tropical húmedo (duración de la rotación e intensidad de cortes, impactos sobre la diversidad florística).

Se ha calibrado este modelo merced a los datos compilados por el dispositivo del CIRAD-Forêt existente en Paracou, en la Guayana Francesa. El modelo, parcialmente validado a corto y medio plazos sobre datos externos, permite poner en discusión la estabilidad de una población natural y de su reacción tras una perturbación silvícola en términos de estructura diamétrica y de composición florística.

Palabras clave : Bosque tropical húmedo. Guayana francesa. Evolución de la población. Rodales. Composición botánica. Modelos matemáticos. Análisis estadística.

SYNOPSIS

MODELING IN NATURAL FOREST

Compartmental models as tools to assist forest management

VINCENT FAVRICHON

In the context of the rapid disappearance of the tropical rain forest and possible ways to protect it involving its silvicultural development, modeling has a secure place as a management assistance tool. A discrete time deterministic matrix model is then developed to provide guidance for the choice of management methods (length of rotation and felling intensity, impact on species diversity).

THE PRINCIPLE AND PROPERTIES OF THE MODEL

This type of model is based both on the grouping of individual trees – in supposedly homogeneous classes, and on the estimation of the probabilities of transition from one class to another – as a result of the growth and mortality of the trees. With the matrix formulation of this model, it is possible, in a certain number of simple cases and in particular when the transitional probabilities are independent of time, to make an analytical study of its behaviour – existence of a stable state, sensitivity to parameters. In order to simulate the effect of silvicultural treatments, it is nevertheless necessary to introduce an adjustment of the parameters by means of the stand density. The term

density-dependent model is then applied.

Thanks to the data collected at the CIRAD-Forêt unit at Paracou, in French Guiana, an initial analysis is made of the functioning of a nature forest stand. The follow-up, since 1984, of control plots and plots that have undergone variable intensity silvicultural treatments, makes it possible to have a good overview of the stands' reactions. The diameter of a tree and the species (or rather the species group) to which it belongs are the two factors upon which the grouping of the individuals is based. Eleven diameter classes and five species groups are accordingly established, based on their temperament and their potential dimension. The growth, mortality and recruitment parameters which characterize the average dynamic of each class on a one-hectare scale are then estimated on the control and treated plots. Next, the value of these parameters is modeled in relation to variables associated with the state of the stand (density and basal area for example). Different methods of adjustment depending on the variables and regression type used may be applied. The behaviour of the model is studied by simulating the development in time of the stand's characteristic-diameteric structure and species composition.

SOME FINDINGS

As far as any adjustment of recruitment and transitional probabilities is concerned, the model converges towards a stable state. The addition of a random factor in the recruitment calculation leads to fluctuations in total density around a state of equilibrium, which more properly conveys the system's real behaviour. After a silvicultural-type treatment, the return to the state stable takes a certain length of time, depending on the degree of the treatment. To start with, a return to a stable density is observed after 60-100 years. The return to the initial species composition takes longer. Particularly noteworthy is the predominance of light-demanding species encouraged by the opening-up of the cover ; these species only regain their initial place more than 200 years after any major treatment.

It has only been possible to partially validate the model in the short and medium term on external data. But it can provide a guide for the choice of logging intensity and length of rotation period for the first felling and thinning cycle. It also helps to open a certain number of doors for establishing a sustainable form of silviculture in terms of volume and species composition.