

MODÉLISATION DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS : ENJEUX, PROBLÈMES ET APPROCHES

Alain PAVÉ

*Directeur du Programme interdisciplinaire de recherche
Environnement, Vie et Sociétés du CNRS*

Les enjeux actuels (changements planétaires, érosion de la biodiversité, déforestation, renouvelabilité des ressources vivantes, etc.) conduisent à une amplification des études sur les grands écosystèmes à divers niveaux d'organisation, de l'individu à l'écosystème, voire au biome, et à diverses échelles de temps et d'espace, de l'heure au millénaire, de la parcelle à la région, voire au continent ou à l'océan. Ces études procèdent d'une double démarche : d'une part l'étude expérimentale des structures, des processus et des dynamiques et d'autre part l'élaboration de plus en plus fréquente de modèles qui complètent l'approche expérimentale. Cette dernière méthodologie s'est fortement développée ces dernières années dans les sciences de la vie, tout particulièrement en écologie, non seulement grâce à divers progrès en mathématiques, en statistique, en automatique et surtout en informatique, mais aussi par un savoir faire de plus en plus répandu dans la communauté des biologistes et écologues. Le Programme Environnement, puis le Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS ont successivement considéré qu'il s'agissait ici d'un axe stratégique et qu'il était urgent de soutenir, de conforter et de développer, dans la communauté scientifique française, les initiatives de modélisation des systèmes écologiques et plus généralement des systèmes environnementaux. C'est dans ce contexte que le séminaire de Kourou, en juillet 1993, sur la modélisation des systèmes forestiers a été organisé. Les contributions réunies ici ont été rédigées par la suite et évaluées collectivement.

Les approches

Le cas des écosystèmes forestiers est un peu particulier. En effet, pour des raisons économiques de valorisation et d'exploitation des forêts tempérées, le développement et l'utilisation de modèles mathématiques et statistiques ont fait, très tôt, partie de l'arsenal méthodologique des forestiers. D'un certain point de vue ces motivations et ces démarches sont à rapprocher de celles de l'haliéutique. Cependant, les études sont menées sur des systèmes artificialisés, dont l'expression ultime est la plantation d'arbres monospécifique et équienne. Dans ce cadre, les processus fondamentaux de naissance, ou de régénération, et de mortalité qui caractérisent les systèmes vivants sont maîtrisés, ou supposés tels (plantations, abattage des arbres). Il reste à contrôler ou à suivre la croissance individuelle, d'en

déduire des indicateurs à l'échelle de la parcelle, d'en inférer les conséquences au niveau des peuplements (changements de niveau et changements d'échelle), sur divers facteurs intrinsèques (physiologiques et génétiques) et environnementaux (environnement édaphique, variations climatiques, effets des parasites et ravageurs, etc.), ainsi que les interactions entre ces facteurs et tout cela en tenant compte de la politique de gestion (éclaircies, fertilisation, coupes, etc.). L'objectif est de produire beaucoup de bois et de bonne qualité, critère dépendant de l'utilisation (bois d'œuvre, aggloméré, bois de feu, pâte à papier, etc.). Ces modèles sont utilisés pour évaluer la ressource et prévoir son évolution. Un grand soin est porté aux propriétés de ces modèles et aux méthodes mathématiques et statistiques de leur exploitation (estimations des paramètres, précision des estimations et des prévisions, etc.). La dimension spatiale et notamment son hétérogénéité est peu prise en compte : les peuplements (au sens des forestiers) sont « homogénéisés ». L'échelle de temps correspond en gros à la « durée de vie de l'arbre » (du jeune plant à l'arbre coupé) (1).

Parallèlement, les écologues s'intéressent aussi aux systèmes forestiers. Les motivations sont un peu différentes : la forêt n'est généralement pas un objet premier, mais un objet d'étude privilégié, un modèle d'écosystème, pour l'approche de structures et de mécanismes écologiques fondamentaux. Le plus souvent, le choix a été porté sur des systèmes peu ou pas artificialisés, là où les processus « naturels » sont sensés s'exprimer sans interférence avec les actions anthropiques. Ce fut tout particulièrement le cas des grandes forêts intertropicales sempervivantes. Cependant, la complexité de ces systèmes, très diversifiés, a longtemps été un frein, ou ressenti comme tel, aux tentatives de modélisation (2). En revanche, il a rapidement apparu la nécessité de spatialiser les processus, d'étudier les dynamiques sur des échelles de temps suffisantes (importance des études historiques « intergénérationnelles » à savoir sur plusieurs générations d'arbres), d'évaluer la contribution des écosystèmes forestiers aux cycles biogéochimiques, de préciser l'influence de certains types d'interactions, comme l'interaction animal-végétal dans la dynamique forestière, etc.

Vers une gestion écologique de la forêt

Récemment, les deux points de vue se sont rapprochés. Ce rapprochement dû à une double nécessité :

— Pour les forestiers, on assiste à un élargissement, voire une modification des objectifs et des modes de gestion qui en dérivent (gestion de la forêt dans son ensemble, quelquefois y compris l'animal, prise en compte de peuplements multispécifiques, passage de l'exploitation minière des forêts naturelles à la véritable gestion de ces forêts, intérêt pour le rôle social et écologique global de la forêt : biodiversité, protection des sols, cycles biogéochimiques, espace de loisir et culturel, etc.).

(1) On pourra trouver un exposé précis et synthétique de ces problèmes dans les travaux de Houllier (Houllier *et al.*, 1991) et de J.F. Dhôte (Dhôte, 1990). On soulignera également l'origine des contributions françaises à l'étude des aspects morphogénétiques de la croissance des arbres (Reffye *et al.*, 1980).

(2) Par exemple, on peut citer les travaux de Shugart sur les modèles de dynamiques forestières (Shugart, 1984), ou encore l'approche « système informatique intégré d'aide à la gestion » de Koop (Koop, 1989).

— Pour les écologues, l'implication dans les aspects finalisés devient de plus en plus d'actualité ; on assiste également à une prise de conscience de l'intérêt des systèmes simplifiés, artificialisés ou perturbés pour l'acquisition de précieuses informations sur les mécanismes bio-écologiques fondamentaux.

De fait les perspectives, les démarches et les pratiques des deux communautés, si elles furent et sont encore parfois conflictuelles, sont singulièrement complémentaires. Elles se traduisent évidemment dans les méthodes, tout particulièrement la modélisation.

La modélisation de la dynamique des systèmes forestiers : réalités et perspectives

Comme nous l'avons vu la modélisation imprègne les deux communautés de façon très différente. Elle est entrée très vite dans l'univers des forestiers, avec une pratique plus proche d'ailleurs de celle des ingénieurs que des scientifiques (modèles normatifs ou utilitaires *versus* modèles cognitifs). Bien que l'écologie dans son ensemble ait une tradition ancienne de modélisation et de réflexion théorique, cette démarche commence seulement à pénétrer le monde des écologues forestiers. Cela est sans doute dû à la complexité des systèmes abordés par cette communauté scientifique.

Outre le processus de convergence entre les objectifs, le développement récent de nouveaux modes de représentation et d'outils de modélisation, les progrès méthodologiques eux-mêmes permettent d'aborder des situations de plus en plus complexes. On en trouvera des exemples dans les différentes contributions réunies dans ce fascicule. Dans ce contexte, il est apparu non seulement souhaitable de faciliter le rapprochement entre les communautés sur un projet commun de modélisation, mais aussi d'impliquer des spécialistes des systèmes de représentation et des outils eux-mêmes : mathématiciens, automaticiens et informaticiens. Outre l'intérêt du modèle en tant que tel, c'est aussi un élément fondamental de dialogue interdisciplinaire et un instrument d'intégration des savoirs.

En effet, si la méthode réductionniste a fait ses preuves, elle montre aussi ses limites dans la résolution de nombreux problèmes actuels qui demandent une compréhension de plus en plus globale, au sens français du mot, des systèmes écologiques. Ainsi, la forêt n'est pas réductible à une collection d'arbres, ni même à la composante végétale dans son ensemble. Par exemple :

- Les relations inter-individuelles sont essentielles (compétition, coopération, allopathie, etc.).
- Les interactions animal-végétal et microorganisme-végétal sont importantes dans divers processus (parasitisme, prédation, pathologies, symbiose, fécondation, dissémination, etc.).
- Les rôles des systèmes édaphiques et hydrologiques sont fondamentaux : comment concevoir le système amazonien sans l'exceptionnel réseau hydrographique qui le caractérise ?
- L'influence actuelle et passée de l'homme doit être prise en compte pour expliquer certaines structures (par exemple, dans certaines zones, la concentration « anormale » d'espèces « intéressantes »).

- Les variations des conditions climatiques (précipitation, température, éclaircissement, régime saisonnier), voire de la composition de l'atmosphère (exemple de l'enrichissement actuel en CO₂) influent sur les processus écologiques.

Il s'agit, dans un contexte donné non seulement d'approfondir certains points mais aussi d'intégrer progressivement les connaissances, voire la façon même de les acquérir dans un but de représentation globale. A ces fins, la modélisation est une méthode complétant harmonieusement la démarche expérimentale (3) et en se plaçant dans une perspective dynamique et spatiale, le modèle peut être un excellent outil de prévision, d'analyse de politiques d'aménagement et de gestion, voire même de compréhension historique (par exemple, de l'histoire récente du système amazonien telle qu'elle est étudiée par le Programme ECCO de l'ORSTOM et du CNRS). Les conclusions proposées par Claude Millon et François Houllier permettent de se faire une idée précise des opérations qui peuvent être raisonnablement menées dans le proche avenir suivant les objectifs aux différents niveaux d'organisation et les échelles temporelles et spatiales.

Une politique scientifique

Les enjeux sont grands, à la dimension des questions posées aujourd'hui (des inquiétudes de mieux en mieux explicitées (déforestation massive dans la zone intertropicale et, inversement, extension des zones forestières dans certains pays du nord, avec leurs conséquences écologiques et sociales). Ces enjeux sont du même ordre que ceux de la prévision météorologique et climatique ; les problèmes sont d'une complexité au moins équivalente sinon supérieure. Ce projet doit donc s'inscrire dans le long terme, car de multiples difficultés doivent être surmontées tant sur le plan méthodologique qu'expérimental.

Des projets du même type devraient être lancés sur d'autres biomes (savanes, steppes, zones désertiques, agrosystèmes, etc.), prenant en compte simultanément les systèmes imbriqués et les échanges entre ces systèmes (par exemple, le couplage système hydrologique-système forestier) de façon à engendrer progressivement une vue globale, modélisée, de la biosphère continentale intégrant les processus bioécologiques et biogéochimiques, avec les incidences sur l'homme (par exemple en termes de santé, de bien être, de développement économique, etc.), puis prenant en compte les effets directs ou indirects des stratégies et actions anthropiques, voire à terme les conditionnant (politiques d'aménagement, d'exploitation, de valorisation, de protection, d'utilisation des terres, effets des pollutions, etc.).

Pour éviter d'accoucher de monstres, de fabriquer des « usines à gaz » inefficaces, de se diluer dans un univers scientifique mou et flou, le projet

(3) On reprend ici un concept large de la notion de modélisation, telle qu'elle a déjà été expliquée par ailleurs (Pavé, 1989 et 1994) : construction et utilisation de représentations formelles. Au-delà des modèles mathématiques, il s'agit aussi des modèles informatiques (par exemple, ceux de l'intelligence artificielle comme les modèles multi-agents ou les bases de connaissances), ou encore d'autres représentations (cartes thématiques des géographes, des biogéographes, des géomorphologues, etc., schémas fonctionnels, etc.). Cette conception de la modélisation permet d'adapter et de transposer les concepts et méthodes et de montrer que les démarches se recoupent largement indépendamment du système formel choisi.

d'élaboration de tels projets doit être progressif, soigneusement ajusté. La politique scientifique doit intégrer de tels objectifs dans sa réflexion stratégique, sachant, encore une fois, qu'on s'inscrit dans le long terme. On trouve ici un exemple, d'application de cette politique : à partir de l'existant, des savoirs et savoir-faire.

Cette préoccupation est omniprésente dans le cadrage thématique du Programme interdisciplinaire de recherche Environnement, Vie et Sociétés du CNRS telle qu'elle est exprimée dans son plan d'action pour les années 1995-1998. On comprend aussi que dans cette dynamique scientifique ce cadrage ne peut avoir qu'une durée de vie limitée dans le temps. Il doit être remis en question périodiquement. C'est là tout l'avantage d'une programmation scientifique.

RÉFÉRENCES

- DHÔTE, J.-F. (1990). — Modèles de la dynamique des peuplements forestiers : articulation entre les niveaux de l'arbre et du peuplement. Applications à la sylviculture des hêtraies. Thèse de Doctorat, Université Claude-Bernard, Lyon, 256 pp.
- CHARLES-DOMINIQUE, P. (1991). — Présentation de la station de recherche des Nouragues. In « Rapport final sur l'aménagement et la conservation de l'écosystème forestier tropical humide ». MAB/UNESCO, Jouve Pub.
- GENTRY, A.H. (Ed.) (1990). — Four Neotropical Rainforests. Yale University Press, 627 pp.
- HOULLIER, F., BOUCHON, J. & BIROT, Y. (1991). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Revue Forestière Française*, XLIII (2), 87-108.
- KOOP, H. (1989). — Forest Dynamics - SILVI-STAR : a comprehensive Monitoring system. Springer Verlag Berlin, 229 pp.
- PAVÉ, A. (1989). — Biométrie, Modélisation et Intelligence Artificielle. *Communication, Cognition and Artificial Intelligence*, 6, 2/3: 153-176.
- PAVÉ, A. (1994). — Modélisation en biologie et en écologie. Aléas, Lyon, 559 pp.
- DE REFFYE, Ph., EDELIN, C. & JAEGER, M. (1989). — La modélisation de la croissance des plantes. *La Recherche*, 207, 158-169.
- SCHMITT, L. & BARITEAU, M. (1990). — La gestion de l'écosystème forestier guyanais. Étude de la croissance et de la régénération naturelle. Dispositif de Paracou. *Bois et Forêts des Tropiques*, 220, 3-23.
- SCUDO, F.M. & ZIEGLER, J.R. (1978). — The Golden Age of Theoretical Ecology : 1923-1940. Lect. Notes in Biomathematics, Springer-Verlag, Berlin.
- SHUGART, H. H. (1984). — A Theory of Forest Dynamics. The Ecological Implications of Forest Succession Models. Springer-Verlag, Berlin, 278 pp.

