



ERIC LOFFEIER
CIRAD-Forêt

VINCENT FAVRICHON
CIRAD-Forêt

LA FORÊT VIRTUELLE

État des lieux



Vue de la forêt gabonaise dans la région de Lastourville.
View of the Gabonese forest in the Lastourville region.

La modélisation des systèmes complexes est l'un des axes majeurs des recherches actuelles en écologie.

Les auteurs brossent ici un tableau rapide de ses contraintes et atouts. Ils présentent également l'essentiel des applications dans le domaine forestier.

Or un modèle ne se suffit jamais à lui-même : il faut le confronter à la réalité, le jeter à l'eau. Flotte-t-il, c'est un point d'importance ; qu'il sombre, tout est à recommencer.

Fernand Braudel

L'indentité de la France. Espace et histoire.

Rien ne permet d'imaginer que l'on arrivera dans un avenir proche à comprendre les mécanismes qui régissent l'extrême complexité des écosystèmes forestiers, notamment tropicaux, sauf à réduire notablement ce niveau de diversité et de complexité par une représentation simplifiée. C'est pourquoi la voie de la modélisation a été choisie par de nombreuses équipes de chercheurs, dans un monde technique très diversifié que les praticiens de la forêt pourront vraisemblablement mettre à profit dans un proche avenir.

Les journées scientifiques du programme Environnement, Vie et Société du C.N.R.S., qui ont eu lieu les 15, 16 et 17 janvier 1996, ont récemment proposé un tour de table particulièrement riche des méthodes de modélisation utilisées dans les sciences de l'environnement. Ce programme succède depuis juin 1994 au Programme Environnement. Il s'inscrit dans la continuité des actions entreprises par le C.N.R.S. en recherche sur l'environnement et prête notamment une attention particulière aux relations entre les sociétés humaines et leur environnement.

Le plan d'action propose en particulier le renforcement du programme thématique Méthodes, Modèles et Théories (MMT). En effet, le recours à la modélisation apparaît comme l'une des tendances majeures de la recherche sur l'environnement.

Il nous a paru utile, à l'occasion de cette manifestation, d'analyser l'état de l'art, d'en dégager les lignes de force et d'estimer en quoi certaines des méthodes exposées pouvaient être applicables à l'analyse de la dynamique des écosystèmes forestiers. Le présent article expose tout d'abord quelques éléments théoriques ; ils seront suivis par un exposé technique sur les principaux outils et méthodes dont disposent les modélisateurs. Enfin, des exemples seront proposés aux lecteurs peu familiarisés avec ces méthodes, suivis d'un glossaire des termes employés par les spécialistes.

LA MODÉLISATION

La science s'est efforcée, depuis la plus haute antiquité, de formaliser simplement les phénomènes de la nature. Leur complexité représentait, et représente encore de nos jours, un défi contre l'*ordre normal* des choses qu'il convient de maîtriser par une représentation réductrice mais structurée, en soi rassurante, du monde qui nous entoure. Georges BRAQUE, cité par la Revue « La Recherche » (1991), ne disait-il pas : « L'art est fait pour troubler, la science rassure ».

Cette formalisation repose sur une véritable interprétation philosophique du monde et de sa représentation. Elle s'enracine dans une pratique scientifique à laquelle

Platon (IV^e siècle av. J.-C.) participait déjà : le désordre apparent masque un ordre caché que la science a pour rôle de découvrir et d'explicitier. Les phénomènes naturels seraient, par essence, de nature déterministe, donc formalisables par des modèles simples car l'ordre naturel reposerait sur des principes de perfection formelle comme : simplicité, pureté, harmonie, régularité...

Cette quête de la simplification a bien entendu imprégné également la biologie et notamment les sciences forestières. Comment ne pas rechercher un semblant de logique dans un tel océan de complexité ? Ce sentiment, cette angoisse, ne peuvent qu'être renforcés devant des écosystèmes comme ceux rencontrés dans les forêts tropicales. Modéliser est ainsi devenu un outil majeur de recherche pour les laboratoires traitant du fonctionnement des systèmes biologiques, depuis l'infiniment petit pour les organismes unicellulaires aux géants de la forêt tropicale, depuis l'échelle de l'organite à celle du globe pour les modèles météorologiques ou de circulation atmosphérique.

QU'APPORTE LA MODÉLISATION ?

La modélisation apparaît avant tout comme un « lieu » implicite de synthèse interdisciplinaire et de dialogue. Comme le souligne MATHIEU (C.N.R.S., 1996), elle apporte une capacité d'intégration d'un ensemble de démarches dans un ensemble relationnel cohérent.

Les systèmes multi-agents, par exemple, permettent l'élaboration de modèles régissant aussi bien les systèmes physiques, biologiques et sociaux que leurs interactions mutuelles. L'objectif n'est plus alors de faire « coller » un modèle à la réalité mais de comprendre comment les différents acteurs (agents) réagissent les uns par rapport aux autres et influent sur la dynamique du système.

Le modèle autorise un dialogue constructif entre acteurs et décideurs. Il apporte une aide à la négociation car il conduit à formaliser les différentes représentations du monde que les acteurs portent en eux, notamment les liens entre les différentes fonctions écologiques et leurs représentations sociales.

L'abstraction modélisatrice comporte cependant un risque important de dérive, celui de se poser en démiurge et de créer des mondes virtuels, succombant à la tentation et à l'obsession de la beauté formelle, perdant l'objectif et la finalité de la modélisation. La fuite dans l'imaginaire, dont parlent TREUIL et MULLON (C.N.R.S., 1996), entraîne un oubli du monde réel pour ne se consacrer qu'à une construction de l'esprit bien incapable d'apporter la moindre contribution à la compréhension du système étudié.

C'est aussi un enjeu de pouvoir, dont il faut se garder, car un modèle n'est pas la réalité. La prise de décision à l'aide de la modélisation doit être conduite avec prudence. N'oublions pas qu'un modèle est pour partie la transposition de la vision du monde que le modélisateur défend implicitement. Les modèles cartographiques en sont une bonne illustration, lorsqu'ils fixent une limite entre deux zones définies comme hétérogènes.

Lors de la conclusion des journées scientifiques du programme Environnement, Vie et Société du C.N.R.S., Richard TOMASSONE demandait d'ailleurs aux modélisateurs de respecter une éthique ; Alain PAVÉ (1994) rappelle pour sa part que le code de déontologie du modélisateur reste à inventer.

COMMENT MODÉLISER ?

Selon ce même auteur, directeur du programme Environnement, Vie et Société du C.N.R.S., l'un des meilleurs spécialistes du moment dans le domaine, un modèle est « une représentation symbolique de certains aspects d'un objet ou d'un phénomène du monde réel, c'est-à-dire une expression ou une formule écrite suivant les règles du système symbolique d'où est issue cette représentation » (PAVÉ, *op. cit.*). Les modèles mathématiques utilisent ainsi le langage mathématique, les modèles informatiques sont élaborés pour leur part à partir des différents langages informatiques.

La démarche de modélisation comprend typiquement les étapes de définition concernant les *objectifs*, l'analyse du *problème biologique* posé, le *système* et les *variables* qui le caractérisent, la traduction de la dynamique du système dans un *formalisme mathématique ou informatique*, la *vérification* du modèle retenu et enfin la *validation* de son comportement et l'*utilisation*.

QUELQUES ASPECTS THÉORIQUES

Les étapes préalables à l'élaboration d'un modèle méritent qu'on leur consacre quelques développements particuliers, afin d'appréhender leur mise en pratique.

VOUS AVEZ DIT SYSTÈME !

Il est devenu difficile, voire inconcevable, d'étudier une population et sa dynamique sans prendre en compte l'environnement et les relations de cette population avec les autres composantes du milieu. L'histoire naturelle a cédé sa place à l'écologie, qui se définit comme la science des systèmes biologiques.

Nous retiendrons la définition de GUARNIERI et WYBO (C.N.R.S., 1996), pour qui un système est tout à la fois :

- « un ensemble en rapport avec son environnement, ces échanges lui assurant une certaine autonomie,
- un ensemble formé de sous-systèmes en interactions, cette interdépendance lui assurant une certaine cohérence,
- un ensemble subissant des modifications plus ou moins profondes dans le temps, tout en conservant une certaine permanence....

Le concept de système est inséparable du concept de modèle, lui-même conçu comme un système représentatif d'un système concret. Tout système réel n'est connu qu'à travers des modèles ».

COMMENT DÉFINIR LA COMPLEXITÉ ?

La complexité s'exprime tout d'abord par la multiplicité des niveaux d'organisation qui constituent les systèmes biologiques et qui renvoient à des objets différents, d'une part, et aux échelles d'observation qui leur sont liées, d'autre part. Par exemple, l'amplitude minimale de perception du gestionnaire forestier s'étend du niveau d'organisation de l'arbre jusqu'à celui de la région forestière. L'intégration d'éléments constitutifs de l'arbre peut même s'avérer indispensable et conduire à prendre en compte des niveaux d'organisation encore inférieurs, les cellules ligneuses par exemple, si l'on s'intéresse aux liaisons stations forestières/qualité du bois.

Chaque niveau de complexité s'organise autour d'une structure qui lui est propre et qui permet d'assurer la reproduction et la survie du système (GIORDAN, 1996). GIORDAN résume l'un des principaux défis posés au modélisateur par la question « comment comprendre les interactions entre les unités de niveaux inférieurs et comment l'unité globale rétroagit sur celles-ci ? », car ce sont bien les échanges d'informations inter- et intra-niveaux qui assurent la permanence du système dans son ensemble. Cette question pose donc le problème du changement d'échelle, fondamental dès lors que les données acquièrent une ou plusieurs composantes spatialisées. « Le tout devient beaucoup plus que la somme des parties » et des propriétés nouvelles, qui n'existaient pas au niveau $(n - 1)$, émergent au niveau n (concept de propriété émergente).

A ce propos, COURBAUD (C.N.R.S., 1996) mentionne judicieusement que la compétition est bien un effet de rétroaction du peuplement sur l'arbre : « la représentation de la compétition permet d'assurer la cohérence entre niveaux d'organisation en explicitant les régulations exercées par le peuplement sur l'arbre et la complémentarité des trajectoires individuelles ».

Et si, comme nous le rappelle Alain FRANC (C.N.R.S., 1996), on retient comme définition de la complexité celle de KOLMOGOROV-CHAITIN (la complexité d'une suite de nombres se mesure à la longueur du plus petit

programme nécessaire à sa reconstruction), alors un système forestier n'est pas un système simple, aisément modélisable, à la mesure de la longueur du programme nécessaire à sa simulation.

Au-delà de leur complexité « existentielle », les trajectoires des systèmes physiques ou biologiques sont loin de présenter la linéarité sans faille que la plupart des modèles tendent à privilégier. En effet, des situations très voisines de ses systèmes, même simples, peuvent diverger très rapidement, rendant ainsi toute prévision de leur dynamique, faible voire nulle. Ces comportements relèvent pour certains auteurs de la théorie du *chaos*, qui ne signifie pas désordre, mais qui se mesure à l'incapacité à remonter dans le temps la dynamique d'un système et à l'impossibilité de retrouver les conditions initiales (La Recherche, 1991).

A titre d'exemple, la prévision météorologique à courte échéance (jusqu'à trois jours) a fait de réels progrès depuis vingt ans alors que les prévisions à long terme (deux semaines) sont toujours hors de portée malgré une multiplication par 500 de la puissance de calcul de Météo-France (ROCHAS, 1996).

Notons en outre que la linéarité supposée des processus, sous-jacente aux modèles couramment utilisés en foresterie et en prévision de la ressource, est une vue de l'esprit. Les systèmes biologiques comportent de nombreux mécanismes ou sous-systèmes non linéaires, et ce à toutes les échelles de temps et d'espace : chablis à l'échelle humaine, flux de conquête ou reflux forestier lors des grandes modifications climatiques, successions végétales aux échelles du millénaire, extinction ou apparition d'espèces aux échelles du million d'années. Les travaux présentés pendant le récent symposium ORSTOM/C.N.R.S., qui s'est tenu à Bondy, les 20, 21 et 22 mars 1996, ont montré que les formations forestières ne présentent pas l'immuabilité et la stabilité qu'on pose généralement comme hypothèses dans l'élaboration des modèles de dynamique forestière, aussi bien en Afrique qu'en Amérique du Sud (ORSTOM/C.N.R.S., 1996).

Les méthodes de modélisation ne sont pas toutes en mesure de prendre ces comportements chaotiques en compte et cette nouvelle donne pèsera fortement sur les choix techniques. Il est même probable que la dynamique forestière ne pourra pas faire l'objet de prédictions à long terme, au moins aux échelles de l'arbre et du bouquet d'arbres.

MODÈLE BIOMÉTRIQUE OU FONCTIONNEL ?

Une classification simple oppose en première analyse deux grandes familles de modèles qui se partagent les faveurs des praticiens, les appellations sont variables

selon les auteurs mais peuvent être schématisées par les deux néologismes suivants : modèles « centrés-données » et modèles « centrés-concepts ». Pour qualifier les premiers, on trouve dans la littérature les mots de *empirique* (HOULLIER *et al.*, 1991), *morphométrie* (FRANC in C.N.R.S., 1996), *boîte noire, guidé par les données* (PAVÉ, *op. cit.*) ; pour les seconds, les termes de *fonctionnel* (HOULLIER *et al.*, 1991), *guidé par les concepts* (PAVÉ, *op. cit.*).

Alain FRANC qualifie les premiers de *morphométriques* car ils ressortent typiquement de la biométrie. Leur conception est conduite selon trois étapes : isoler des variables quantitatives mesurables qui sont censées représenter un peuplement, ajuster un modèle déterministe à l'aide de systèmes d'équations différentielles, valider ces modèles par comparaison entre prévisions et observations.

Cette démarche a porté ses fruits pour l'analyse de la dynamique des peuplements réguliers (tables de production), notamment des plantations, mais ces modèles ne sont pas en mesure de représenter ni la complexité, ni la structure spatiale des forêts hétérogènes. L'échelle du massif ou même de la région est celle qui leur convient le mieux, car il s'agit en général de prédire une production à cette échelle.

Les modèles « centrés concepts » présentent une forte diversité du fait de la grande variété dans les choix des variables et des processus écophysologiques retenus par le modélisateur. Ces modèles présentent l'avantage de pouvoir être complexifiés pas à pas en y intégrant au fur et à mesure de leur mise au point des éléments nouveaux.

En deuxième analyse, la distinction apparaît plutôt entre :

- Les modèles où l'entité modélisée est celle qui a fait l'objet des mesures.
- Les modèles décrivant un niveau d'organisation n à partir d'éléments identifiés à des niveaux d'organisation inférieurs.

Les modèles "arbre" développés par la laboratoire AMAP, qui trouve son origine dans la formalisation architecturale de l'école montpelliéraine, sont une bonne illustration de cette typologie : le modèle de croissance du rameau est *empirique* mais le modèle d'arbre *fonctionne* à partir de ces rameaux. Le réalisme ainsi obtenu permet d'envisager à terme la création d'un véritable laboratoire virtuel capable de tester différentes hypothèses de sylviculture, dont les résultats sur le terrain sont bien difficiles à mesurer.

PEUT-ON VALIDER ?

Mais est-il suffisant de s'assurer de la ressemblance graphique du modèle avec la réalité pour pouvoir affirmer

sa pertinence ? Cette phase de contrôle, au même titre que celle qui consiste à vérifier le bon fonctionnement des algorithmes constitutifs, fait partie intégrante de la démarche théorique. Elle est généralement effectuée en comparant les valeurs de sortie du modèle avec des données réelles.

G. de MARSILY (C.N.R.S., 1996) rappelle à ce propos le principe de Popper : « une théorie ne peut jamais être validée, ..., tout au plus peut-elle ne pas être invalidée par l'expérience ». Et une théorie n'est-elle pas un modèle idéalisé de la réalité ? Il compare malicieusement les principes de la validation d'un modèle de type boîte noire aux contraintes de la tragédie grecque :

- **Unité de lieu** : l'extrapolation dans l'espace n'est jamais validée par l'expérience. Bien au contraire, la variabilité des paramètres limite souvent le domaine d'application du modèle aux données qui ont servi à le calibrer.
- **Unité d'action** : un changement dans les processus de la dynamique peut intervenir par rapport à ceux existant lors de la calibration du modèle.
- **Unité de temps** : il peut y avoir modification du système pour cause de non stationnarité interne ou en cas de perturbation externe.

Au mieux, un modèle ne serait ainsi valide que dans son domaine de viabilité, c'est-à-dire dans le domaine qui a servi à identifier ses paramètres. Une tentative de validation, même réussie, ne posséderait aucun caractère probant en ce qui concerne la confiance à accorder au modèle en prévision.

Pour Alain PAVÉ également, la validation reste une étape délicate, qui peut être conduite sur des cas simples pour lesquels on dispose d'un certain nombre d'outils : étude de la suite des écarts, test de la pente nulle...

Doit-on pour autant renoncer à toute idée de modélisation, sous le prétexte que la rationalité scientifique n'y trouve pas son compte ? LEVIANDIER (C.N.R.S., 1996) estime, quant à lui, que ce serait une surenchère facile en matière de rigueur qui conduirait à interdire la modélisation d'objets mal connus et que la validation d'un modèle, du moins en hydrologie, peut être faite à partir d'autres données que celles ayant servi à l'établir, *a fortiori* à le caler, afin d'en évaluer avant tout la qualité prédictive.

La validation d'un modèle semble ne pas pouvoir être considérée sans tenir compte ni des objectifs, ni de la « philosophie » qui ont orienté sa construction.

Sans prétendre épuiser le sujet, GAUTIER et GODRON (C.N.R.S., 1996) nous donnent l'occasion de rappeler que les modèles sont des outils de dialogue entre les acteurs locaux et les chercheurs, qui sont amenés les uns et les autres à reconsidérer leur positions ou leurs informa-

tions en fonction des simulations d'actions de gestion qui affectent le paysage. La validation, sans être un faux problème, prend alors une importance moindre lorsque la modélisation participe à une stratégie globale sans en être l'objectif unique et absolu.

APPLICATION AUX FORÊTS HÉTÉROGÈNES

Dans l'état actuel des connaissances, les modèles forestiers sont essentiellement des modèles de peuplement ligneux (HOULLIER *et al.*, 1991 ; VANCLAY, 1995). Comme le souligne BOUSQUET (1994), dans ce type de modèle, « lorsque les auteurs modélisent la dynamique de la ressource, l'activité anthropique est considérée comme une perturbation dont on cherche à évaluer l'impact ». Ces modèles s'attachent donc à décrire au mieux, selon les objectifs qui leur sont fixés, les phénomènes de croissance, de mortalité et de régénération (fructification, dissémination, germination) des arbres. Chaque modèle privilégie, et souvent combine, la représentation de ces phénomènes de manière empirique (on ajuste par exemple sur des données la croissance en fonction du diamètre) ou avec une approche plus fonctionnelle (on modélise par exemple la photosynthèse et on en déduit la croissance en diamètre).

Si les approches sont nombreuses, elles nous semblent toutefois faire appel à un nombre réduit de concepts de base qui sont mathématiques ou informatiques. Parmi les outils mathématiques classiquement utilisés, citons les équations différentielles et les matrices. Parmi les outils informatiques nouveaux, il faut souligner l'importance des simulations numériques par systèmes multi-agents (cf. exemple n° 4, p. 16) et par automates cellulaires (cf. exemple n° 5, p. 16).

Par ailleurs, les modèles reposent tous sur un principe de simplification plus ou moins poussée du système et peuvent donc se différencier par le degré de finesse de description. Cette simplification vise, d'une part, à réduire la diversité floristique, d'autre part à représenter la structure dimensionnelle d'un peuplement et enfin à rendre compte de la répartition spatiale des individus (HOULLIER, 1995).

DES SIMPLIFICATIONS NÉCESSAIRES

Concernant la diversité floristique, les recherches s'orientent de plus en plus vers la construction de « groupes fonctionnels » ou groupes d'espèces qui jouent le même rôle ou la même fonction dans l'écosystème. Ces groupes dépendent de la fonction à décrire et donc de l'objectif du modèle (PASCAL, 1995 ; PUIG, 1995).

La représentation de la structure dimensionnelle de la forêt fait appel soit à :

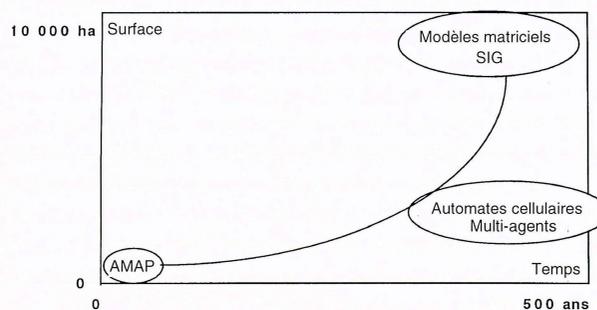
- Une grandeur moyenne du peuplement (la densité par exemple et on peut parler alors de représentation par un « arbre moyen »). Il s'agit des modèles de peuplement.
- Un vecteur d'effectifs d'arbres regroupés en k classes caractérisées par le diamètre, le statut social ou toute autre variable individuelle (on utilise donc k « arbres moyens » pour décrire le peuplement car on suppose que tous les arbres d'une même classe ont le même comportement). Il s'agit des modèles démographiques.
- La liste exhaustive des arbres du peuplement. Il s'agit ici des modèles d'arbre.

Enfin, la spatialisation de la dynamique est rendue soit à travers le découpage de l'espace en cellules unitaires ou quadrats, soit à travers la prise en compte explicite des coordonnées de chaque individu en (x, y) , voire en (x, y, z) .

Rappelons pour conclure une évidence : plus un modèle décrit de façon détaillée le peuplement, plus il nécessite des données précises et variées pour sa construction comme pour sa validation et ainsi plus il devrait apporter d'informations en sortie.

TENTATIVE DE CLASSIFICATION DES MODÈLES FORESTIERS

Le schéma et le tableau suivants proposent une classification schématique de ces modèles, inspirée de HOULLIER et MILLIER (1995). Elle est basée sur les échelles d'espace et de temps appréhendées. Les exemples 1 à 6, pp. 13-18, présentent des cas concrets, qui nous semblent significatifs, de modèles opérationnels ou en cours de réalisation. Ils font appel à divers outils mais ce sont leurs caractéristiques les plus marquantes qui sont mises en évidence ici.



Topologie spatio-temporelle de la modélisation en forêt tropicale.

Space-time topology of tropical forest modeling.

NIVEAU DE DESCRIPTION DU PEUPEMENT ET OUTILS DE BASE UTILISÉS

Description du peuplement		Type de modèle	Outil de modélisation
Niveau de description	Spatialisation		
1 arbre moyen	non*	table de production	équation différentielle
1 vecteur (exemple 1)	non*	modèle démographique non spatialisé	processus de Markov équation différentielle
1 vecteur (exemple 2)	quadrats	modèle démographique spatialisé modèle de réaction-diffusion	système différentiel automate cellulaire
liste des arbres (exemple 3)	localisation en 2D	modèle de croissance individuelle	équation différentielle S.M.A. automate cellulaire
liste des arbres (exemple 3)	localisation en 3D	modèle de croissance individuelle modèle physiologique	équation différentielle S.M.A. automate cellulaire
quelques individus (exemple 6)	description en 3D	modèle architectural	lois de probabilités automate cellulaire

* Ces modèles peuvent rendre compte de la dynamique dans certains sites ou stations mais ils ne sont pas spatialisés dans le sens où il n'y a pas d'interactions entre différents sites.

QUELQUES PERSPECTIVES

COURBAUD (C.N.R.S., 1996) indique les grandes tendances actuelles en modélisation :

- passage vers des *niveaux d'organisation de plus en plus fins* et donc renforcement des problèmes d'agrégation avec les niveaux moins fins mais plus opérationnels pour le gestionnaire,
- *spatialisation* de plus en plus poussée pour rendre compte à la fois des interactions à distance entre acteurs et de la répartition des facteurs écologiques,
- prise en compte de *l'écophysiologie*,
- prise en compte de phénomènes encore peu étudiés tels que la relation avec la *qualité du bois*.

Ces perspectives nouvelles entraînent une nécessaire révision dans l'acquisition de données et dans les moyens de traitement informatique.

□ La métrologie

L'évolution des capacités de calcul grâce au développement informatique permet de spatialiser l'informa-

tion, souvent dans le plan, de plus en plus dans l'espace physique. Une proportion importante de travaux prennent en compte la répartition des données dans l'espace.

Des outils nouveaux apparaissent. Certains, comme les S.I.G. (Systèmes d'Information Géographique), permettent de modéliser les structures spatiales. D'autres, comme les techniques de marqueurs génétiques, autorisent la caractérisation de la structure génétique d'une population et l'interprétation de son histoire (notamment démographique) en fonction des forces évolutives auxquelles elle est soumise (mutation, sélection, migration et dérive) et des caractéristiques biologiques des espèces qui la composent (mode de reproduction et de dispersion en particulier).

Un véritable arsenal d'outils aident également à remonter dans le temps. Citons l'analyse des pollens, des phytolithes et des charbons de bois, la dendrochronologie, la datation au C14, la composition isotopique des matières organiques du sol... Le symposium ORSTOM/C.N.R.S. (ORSTOM-C.N.R.S., 1996) a permis de faire le point sur ces techniques, largement mises à profit pour

l'analyse de la dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux dans le cadre du programme ECOFIT.

Citons enfin des travaux en cours destinés à mieux caractériser la structure verticale des peuplements : mesure de la hauteur comme indicateur de fertilité stationnelle (FERRY, travaux en cours) et mesure des volumes vides (BIRNBAUM, travaux en cours).

□ **Les outils de modélisation**

Les perspectives qui se dégagent à l'issue des réflexions menées dans le cadre du groupe Modélisation de la Forêt Tropicale Humide sont résumées par HOULLIER et MILLIER (1995). Il apparaît tout d'abord que les modèles de type « automates cellulaires » et « système multi-agents » permettent de rendre compte explicitement de la spatialisation de la dynamique forestière. Ces modèles, qui sont des outils informatiques parfois complétés par une approche théorique, prennent en compte des sous-modèles (de croissance, de mortalité par exemple) faisant appel aux techniques mathématiques plus classiques. De par la spatialisation des phénomènes, ils devraient permettre de réaliser les changements d'échelles de temps et d'espace qui sont le but final de la modélisation et donc de passer du local au global et du rapide au lent (en termes forestiers, par exemple, citons le passage du phénomène aléatoire de type chablis à l'équilibre stable d'un peuplement). Ces outils présentent en outre un atout très pratique qui est leur grande souplesse, que ce soit pour l'intégration de nouvelles variables, comme les règles sociales de déci-

sion en particulier, ou pour la visualisation des phénomènes.



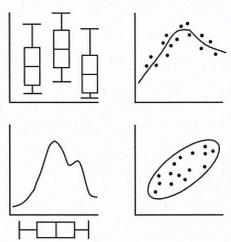
En conclusion, bien que les moyens techniques dont nous disposons montrent leurs limites, notamment dès qu'il s'agit de modéliser le comportement de quelques dizaines d'individus, la voie est ouverte pour prendre en compte les réalités du monde vivant et du monde abiotique qui l'entoure et le fait vivre. LEGAY et BARBAULT (1995) sont ainsi en mesure de mettre l'accent sur deux caractéristiques majeures des écosystèmes qui ont dorénavant leur place dans les approches par modélisation, à savoir que :

- tout individu est unique par son patrimoine génétique, son histoire...
- les événements qui affectent sa dynamique sont d'origine essentiellement locale.

Les techniques de modélisation qui sont en mesure d'explorer et d'exploiter ces éléments fondamentaux sont promises à un développement certain, d'autant plus qu'elles pourront intégrer dans leurs paramètres l'acteur fondamental, c'est-à-dire l'homme.

Les modèles « simples », du type peuplement, restent cependant d'actualité aux yeux des gestionnaires pour lesquels l'échelle de perception reste souvent la parcelle et la durée de la rotation.

La Mission Biométrie du  organise un séminaire



Application des méthodes non paramétriques

Les 9, 10 et 11 septembre 1996
au CIRAD à Montpellier

Renseignements et inscriptions

L. HOUDE - CIRAD-Forêt
BP 5035 - 34032 MONTPELLIER CEDEX

Tél. : 67 59 37 25
Fax : 67 59 37 55

Exemple n° 1 : MODÈLE DÉMOGRAPHIQUE EN TEMPS DISCRET NON SPATIALISÉ

Modèle matriciel déterministe appliqué à la dynamique d'une forêt hétérogène (BUONGIORNO *et al.*, 1995 ; FAVRICHON, 1995)

Le but de ce type de modèle est de rendre compte de l'évolution de la structure en classes de taille d'une population ou d'un peuplement. On considère un peuplement « moyen », c'est-à-dire sur une surface assez grande pour que la notion d'état d'équilibre – effectif constant dans le temps – ait un sens. Ce modèle peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle ou sous une forme discrète (matrice de passage) que nous présenterons ci-après. Il est basé sur le *processus de Markov en temps discret*. L'état du peuplement au temps t est décrit par le vecteur N_t des effectifs d'arbres dans un certain nombre de classes (classes de diamètre par exemple ou classes d'espèces). Chaque arbre peut, au temps $t + 1$ suivant, soit mourir, soit rester vivant dans sa classe, soit rester vivant et changer de classe. On associe à chacune de ces éventualités une probabilité dite « de transition » p_{ij} . Ces probabilités sont rassemblées dans une matrice de transition notée P , qui caractérise la dynamique de la population. Les probabilités de passage sont estimées par la proportion d'arbres qui meurent, qui restent dans leur classe ou qui changent de classe entre les temps t et $t + 1$.

Le modèle général s'écrit :

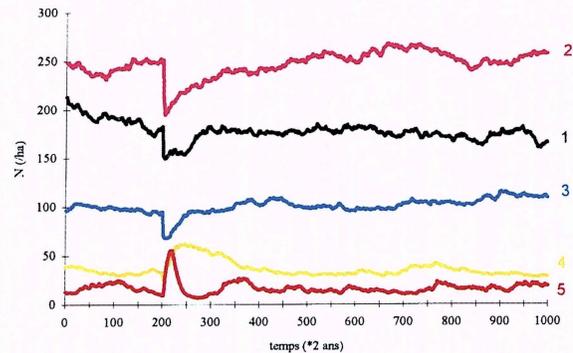
$$N_{t+1} = P(t) N_t + R(t)$$

où N_t (N_{t+1}) est le vecteur des effectifs d'arbres au temps t ($t + 1$),

$P(t)$ est la matrice de transition entre t et $t + 1$,

$R(t)$ est le vecteur de recrutement entre t et $t + 1$.

Dans le cas où P et R sont indépendants du temps (hypothèse de permanence), le modèle conduit à un état d'équilibre qui indique la tendance d'évolution du peuplement. Mais cette hy-



Evolution simulée des effectifs par groupes d'espèces en fonction du temps avec exploitation à $t = 200$ (FAVRICHON, 1995).

Changes in the number of trees by species group with logging at $t = 200$ (FAVRICHON, 1995).

pothèse est rarement valable, en particulier lorsqu'on s'intéresse au long terme ou à un peuplement perturbé. On considère alors que les probabilités de transition sont dépendantes de l'état du peuplement au temps t . On établit, par exemple, une relation entre les probabilités de changer de classe de diamètre et la densité moyenne du peuplement ou entre le nombre d'arbres recrutés et cette même densité. On parle alors de modèle *densité-dépendant* ou de modèle régulé. Il conduit en général à un état stable après une période d'oscillations amorties. La prise en compte d'une densité-dépendance permet de simuler l'impact de traitements sylvicoles et d'étudier la réaction du peuplement en termes de structure diamétrique ou même de composition floristique lorsque des groupes d'espèces différents sont individualisés.

Exemple n° 2 : MODÈLE DE RÉACTION-DIFFUSION OU MODÈLE DE DYNAMIQUE DE POPULATIONS SPATIALISÉES

Modèle démographique d'évolution de deux ou plusieurs populations localisées dans l'espace (LEBRETON *in* : C.N.R.S., 1996)

Nous suivrons ici LEBRETON qui présente le principe de base d'un tel modèle sous sa forme discrète en temps et en espace, c'est-à-dire avec une écriture matricielle. On consi-

dère une espèce animale présentant deux populations sur deux sites distincts géographiquement. La variation de l'effectif d'une population en un site donné présente une part liée à la dynamique de la population en ce site (terme de croissance ou réaction) et une part liée au déplacement d'individus de cette population vers un autre site (terme de migration ou diffusion). Un modèle à deux sites s'écrit donc sous la forme du produit de deux matrices de transi-

tion : la première décrit la migration, la seconde décrit la dynamique propre de la population dans chacun des sites et on peut alors introduire une hétérogénéité entre les deux sites avec $a > 1$ et $b < 1$

$$N_{t-1} = \begin{pmatrix} p & 1-p \\ 1-q & q \end{pmatrix}_t \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix}_t N_t$$

où N_t est le vecteur à deux dimensions des effectifs dans chacun des sites.

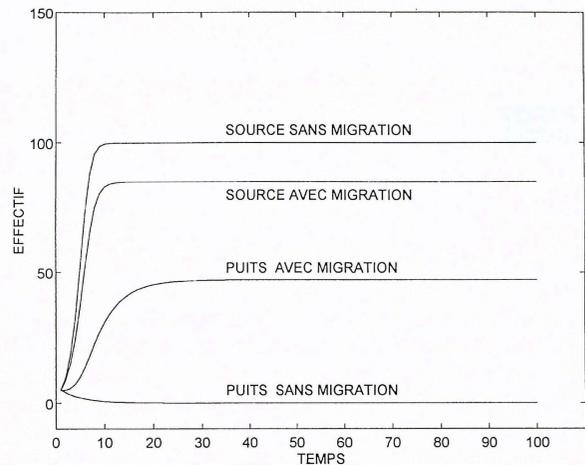
Ce type de modèle est également appelé modèle source-puits. Il peut être étendu selon plusieurs directions :

- la croissance des populations est dépendante de la densité locale,
- les populations sont décrites par des structures d'âge ou de taille et non pas seulement par l'effectif total,
- n sites sont pris en compte, avec souvent des simplifications en ne considérant que les déplacements possibles dans les sites proches les uns des autres.

L'un des résultats montre que la connexion entre populations a un effet stabilisateur sur la dynamique des populations.

Cas particulier : modèle de la génétique des populations forestières

Ce type de modèle est utilisé pour l'étude de la dynamique d'une métapopulation. Citons les travaux de MACHON (1995) qui étudie l'impact d'un certain nombre de processus évolutifs (dérive, mutation, migration, sélection, démographie) sur la différenciation et la diversité de populations d'orme et de châtaignier en Europe. La comparaison des populations est basée sur le calcul de distances génétiques comme par exemple les *F*-sta-



Effet stabilisant de la migration dans un modèle source-puits : la migration de la source vers le puits permet à la population puits de persister (LEBRETON in : C.N.R.S., 1996).

Stabilizing effect of migration in a source-sink model : the migration of the source towards the sink helps the sink population to survive (LEBRETON in : C.N.R.S., 1996).

tistiques. Les modèles représentent la dynamique des populations subdivisées dans l'espace ainsi que les flux de migration entre elles. Deux grands types de modèles existent : les modèles en îles dans lesquels la réception de migrants dans une population est choisie de façon aléatoire parmi tous les individus de l'ensemble, les modèles en « stepping-stone » dans lesquels le taux de migration est lié à la distance géographique entre les colonies distribuées soit sur une ligne, soit sur un plan.

Exemple n° 3 : MODÈLE ARBRE DÉPENDANT DES DISTANCES

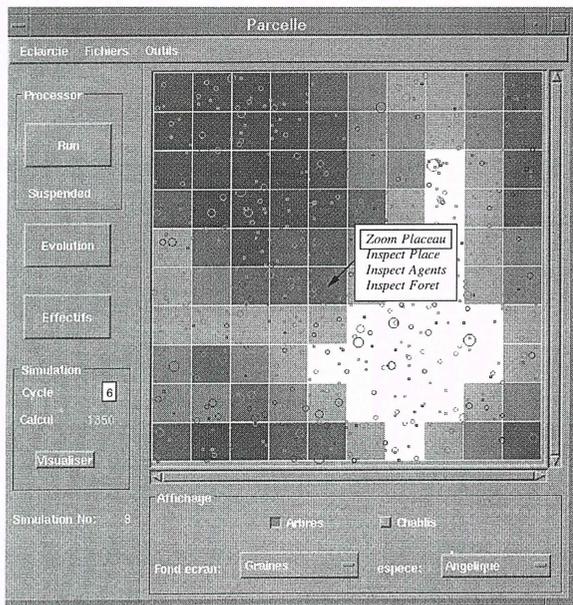
SELVA, modèle individuel spatialement explicite de la dynamique forestière en Guyane française (GOURLET-FLEURY, HOULLIER, 1996)

Ce type de modèle a pour objectif d'étudier de la dynamique forestière à partir de l'analyse du comportement des arbres, pris individuellement et situés dans l'espace de manière à pouvoir rendre compte d'un certain nombre d'interactions. Il permet de simuler des règles de sylviculture fine, ciblées sur l'arbre d'avenir.

Il met en œuvre une série de sous-modèles décrivant la croissance, la mortalité et le recrutement (ou la régénération lorsque le modèle est très complet). Le sous-modèle de crois-

sance est souvent basé sur un couple de fonctions POT (croissance potentielle en l'absence de compétition) * RED (réduction de cette croissance par des facteurs externes ou internes). Les indices de compétition, selon la manière dont on les exprime, visent à rendre compte d'une compétition plutôt locale pour la lumière ou bien d'une compétition globale pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux à plus grande distance. Le calcul des indices peut faire appel à une expression plus ou moins complexe de la densité moyenne sur une parcelle (modèle arbre « indépendant des distances ») ou de la densité autour de chaque individu (modèle arbre « dépendant des distances ») avec ou sans prise en compte de la hauteur.

Dans le cas de SELVA, l'accroissement potentiel en diamètre (composante « POT ») est modélisé par une fonction du dia-



Copie d'écran montrant une partie de l'interface utilisateur du simulateur SELVA (GOURLET-FLEURY).
Copy of a screen showing part of the user interface of the SELVA simulator (GOURLET-FLEURY).

mètre et de l'espèce, les paramètres étant ajustés sur les « meilleurs » individus du peuplement (présentant les accroissements les plus importants). Les indices de compétition retenus font intervenir le nombre d'arbres de diamètre supérieur ou égal à celui de l'individu considéré dans un rayon de 30 m, ainsi que la variation de ce nombre pendant la période de croissance précédente. Par ailleurs, différents types de mortalité sont décrits (mortalité sur pied, par chablis primaire, secondaire ou multiple) ainsi que la loi de recrutement de nouveaux individus de plus de 10 cm de diamètre. Les sous-modèles sont écrits en langage orienté-objet SmallTalk 80 tirant partie des caractéristiques multi-agents du système, ce qui confère à l'ensemble une grande souplesse d'évolution ; leur assemblage constitue le simulateur de dynamique forestière.

MORAVIE (1995) développe, pour sa part, un travail basé sur une hypothèse originale de dynamique de la forêt tropicale humide selon laquelle la structure du peuplement s'organise selon un schéma en bulle autour des émergents (PÉLISSIER, 1995). Les objectifs de l'étude, à la fois explicatifs et prospectifs, ainsi que la multiplicité des éléments à prendre en compte ont conduit là aussi à retenir un modèle individuel dépendant des distances.

REMARQUES :

• Modèle physiologique ou « process-model »

Ce type de modèle diffère du précédent, non pas par la précision de la description des individus, mais par le type de processus décrit. Des travaux sont en cours dans ce do-

maine en forêt tempérée par DELEUZE (1996) qui établit un modèle de type réaction-diffusion pour simuler l'allocation du carbone dans les tiges d'épicéa commun. Ils ne décrivent pas de façon empirique la croissance individuelle mais ils cherchent à modéliser les phénomènes physiologiques entrant en jeu dans la croissance individuelle : photosynthèse, respiration, allocation du carbone. Cette approche permet de construire des modèles théoriques plus robustes, c'est-à-dire utilisables dans des conditions très variées car ils sont basés sur les processus et non sur des ajustements empiriques du résultat des processus.

• Modèle génétique au niveau arbre

DOLIGEZ (1996) a construit un modèle d'isolement par la distance (modèle de population continue, dans laquelle chaque individu se croise au hasard avec l'un de ses voisins), pour mieux comprendre l'organisation de la diversité génétique intraspécifique chez les arbres de forêt tropicale et simuler les effets d'interventions sylvicoles sur cette diversité. Ce modèle en temps discret prend en compte, pour chaque individu reproducteur, sa position et son génotype, et définit les modalités de sa survie et de sa reproduction, entre cycles successifs.

Il décrit l'effet de différentes variables (agrégativité, taux d'allofécondation, densité, distances de dissémination et de pollinisation...) et de leurs interactions sur la structuration génétique de la population à l'état stable. Il prédit un effet de l'exploitation forestière sur la diversité génétique intra-population plus ou moins fort selon les caractéristiques des espèces.

Les données réelles obtenues sur une espèce arborée guyanaise (*Carapa procera*) ne remettent pas en cause les hypothèses du modèle, dont les résultats seront également confrontés à des données sur plusieurs autres espèces.

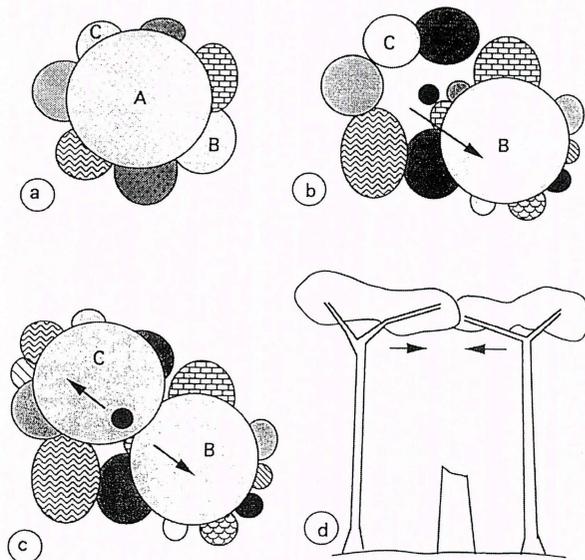


Schéma de fonctionnement (MORAVIE, 1995).
Operational diagram (MORAVIE, 1995).

Exemple n° 4 : SYSTÈME MULTI-AGENTS

Modèle de gestion de la pêche dans le delta central du Niger (BOUSQUET, 1994)

L'objectif du travail est d'étudier « l'apport de la modélisation pour tisser des liens entre différents points de vues disciplinaires sur une même réalité complexe ». Il s'agit en particulier de représenter la complexité du monde observé et les différents points de vue sur ce monde.

Dans la gestion de l'environnement, les S.M.A. permettent la modélisation des interactions dynamiques écologiques / dynamiques sociales. Ce point de vue repose sur l'hypothèse que l'environnement est quelque chose de construit, individuellement et collectivement. Il s'agit donc, par simulations, de comprendre le lien entre les différents fonctions écologiques et les représentations sociales ainsi que d'explorer la viabilité de ces interactions. Le simulateur est construit autour de trois entités principales qui sont la base partagée, le lot de connaissances et la structure de contrôle.

- La **base partagée** rassemble l'ensemble des connaissances disponibles sur le milieu et contient donc des classes d'objets regroupés en *niveaux* relatifs par exemple à l'espace, au climat, au temps écoulé, aux populations de poissons, aux pêcheurs... avec tous les contrôles internes propres à chacun de ces agents (par exemple les lois de croissance ou de mortalité des populations de poissons).

Cette base contient, de plus, deux objets particuliers : le *résumé* qui traduit l'état général de la base et les *événements* qui sont générés lors de la modification d'un objet de la base.

- Le **lot de connaissances** est composé d'un ensemble de règles qui sont une classe d'objets particuliers appelés « spécialistes ».
- La **structure de contrôle** est chargée de gérer l'activité des spécialistes à travers deux composantes : la *stratégie* et les *tâches*.

BOUSQUET donne le schéma de fonctionnement du système :

« En fonction du résumé de l'état de la base partagée, la stratégie active une tâche. Celle-ci, en fonction des événements qu'elle a reçus depuis la dernière fois qu'elle a été activée, active un spécialiste. Ce spécialiste connaît un niveau, transforme les objets qui sont dans ce niveau suivant ses règles. Ces transformations peuvent constituer un événement ou s'intégrer dans le résumé de la stratégie. Une fois que toutes les tâches activées ont elles-mêmes activé les spécialistes, la main revient à la stratégie, et ainsi de suite... ».

L'utilisation du modèle consiste essentiellement à réaliser des simulations de la dynamique des populations de poissons sans ou avec pêcheurs et de voir en particulier quelle est l'influence des processus de décision de ces derniers. Ce modèle est en effet un modèle exploratoire ou modèle d'accompagnement : on observe l'évolution d'une communauté d'agents selon différentes hypothèses.

Exemple n° 5 : AUTOMATES CELLULAIRES

Automate de peuplement (CROC, 1994)

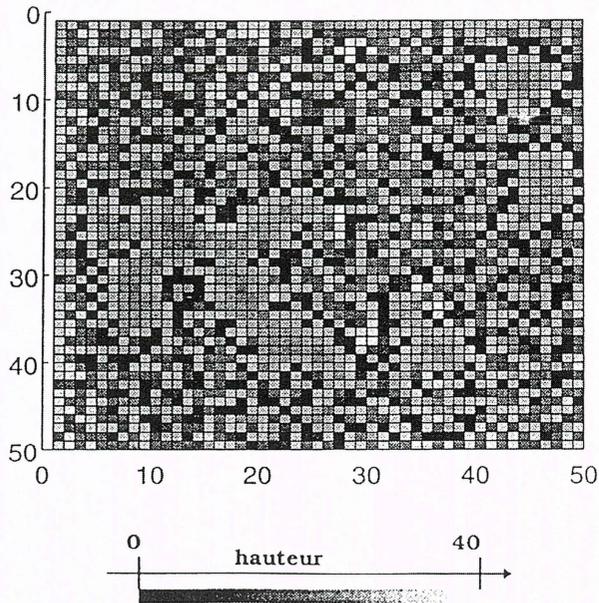
C'est un modèle démographique spatialisé avec un terme de diffusion (modèle de « réaction-diffusion »). L'espace est découpé en cellules unitaires carrées. Chaque cellule de l'automate modélise un micro-peuplement. Ce micro-peuplement est caractérisé au temps t par un vecteur représentant le nombre d'individus d'une dimension et d'une espèce données (par exemple deux espèces et deux classes de dimension – jeune ou vieux –). Le terme de diffusion du modèle tient compte de la possibilité pour une cellule d'envoyer des graines d'une espèce sur une cellule voisine. Cette diffusion est proportionnelle à l'état des quatre cellules voisines. A chaque itération, le modèle calcule la surface terrière de chacune des espèces sur les cellules ainsi que, pour une cellule et une espèce données, la concurrence exercée sur celle-ci.

Dans le cas de matrices de réaction à coefficients régulés

par la surface terrière, le comportement du modèle est étudié par simulation. Ainsi, dans le cas où l'espèce 1 est moins concurrencée par elle-même que par l'espèce 2, on observe que l'espèce qui prédomine initialement sur une cellule l'emporte sur cette cellule et reste l'espèce dominante. Dans le cas où les arbres d'une espèce souffrent plus de la concurrence de leurs congénères que des arbres de l'autre espèce (ce qui pourrait être le cas par exemple dans un peuplement de sapin-épicéa), il peut apparaître des phénomènes oscillatoires avec alternance des deux espèces dans l'espace ou même des phénomènes d'apparence chaotique.

Ce modèle permet de rendre compte du renouvellement de la forêt, de sa stabilité et de la structure en mosaïque.

Parallèlement, ELMOZNINO (travaux en cours) développe et étudie de façon théorique un modèle « minimaliste », destiné à tester le comportement d'un modèle basé sur trois règles seulement. Une parcelle, représentée par un carré, peut prendre, en effet, différents états selon son voisinage :



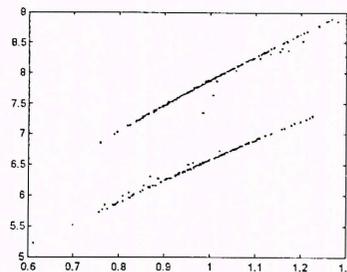
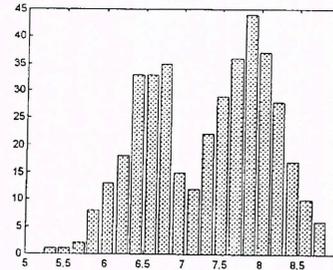
Aspect de la forêt après 150 itérations (CROC, 1994).
The way the forest looks after 150 iterations (CROC, 1994).

Une cellule vide ou occupée par des juvéniles ou produisant des graines qui vont pouvoir ensemençer les cellules voisines.

Ces règles simples conduisent à des configurations spatiales très diverses, certaines présentant des figures régulières, avec des comportements périodiques.

Automate d'arbre (GOREAUD, 1995)

Un modèle d'automates cellulaires a également été testé par GOREAUD (1995) pour simuler des dynamiques de croissance individuelle avec des règles de compétition simples et rendre



Histogramme des tailles et graphe taille = f (génétique) (GOREAUD, 1995).

Histogram of sizes and size = f (genetic) graph (GOREAUD, 1995).

compte ainsi de la structure du peuplement. Chaque cellule représente un seul arbre défini au temps t par sa hauteur H , un indice de fertilité C et un paramètre génétique G . La croissance dépend alors de la compétition exercée par les cellules voisines. A chaque itération, le modèle calcule la hauteur sur chaque cellule et, pour une cellule donnée, il calcule un indice de compétition basé sur la hauteur des cellules voisines. Si l'indice de compétition est supérieur à un certain seuil, l'arbre ne pousse pas ; sinon l'arbre pousse de dH , fonction de H , C et G . Des simulations permettent de tenter de répondre à la question : comment va se comporter un peuplement donné en fonction des règles définies au départ pour l'évolution de chaque automate ? Le modèle met par exemple en évidence l'apparition de strates d'arbres dominants/dominés.

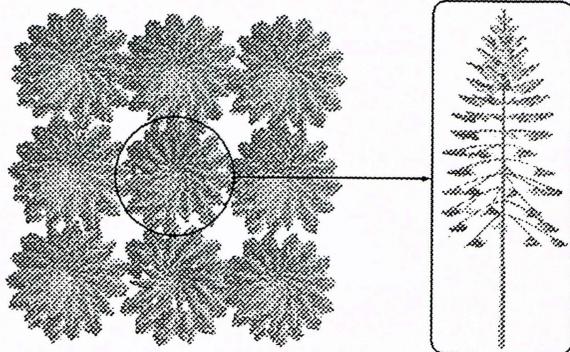
Exemple n° 6 : MODÈLE ARCHITECTURAL

Modèle d'architecture, de croissance en grosseur et de qualité du bois (de REFFYE, HOULLIER, BLAISE, FOURCAUD, 1995)

Le but affiché par AMAP est de « développer une approche expérimentale de la modélisation et de la simulation de l'architecture

des plantes dans un but d'application agronomique » (De REFFYE et al., 1995 ; C.N.R.S., 1996).

Les entrées élémentaires du modèle sont *qualitatives* (description très détaillée des unités de base de construction des plantes et description des stratégies globales de phénologie, croissance...) et *quantitatives* (modélisation des processus d'apparition et de croissance de ces éléments par des lois de probabilités).



Vue en plan d'une plantation d'épicéa de 25 ans éclaircie à 3 arbres sur 4 à 10 ans et vue de profil de l'arbre central.
Close-up view of a 25-year-old epicea plantation thinned to three trees out of four, at 10 years, and a profile view of the central tree.

Ce modèle permet donc d'organiser de l'information très détaillée autour de la structure topologique de la plante et, à terme, il devrait permettre la réalisation « d'essais virtuels ».

L'objectif est en particulier de proposer « un cadre dans lequel il soit possible de représenter les relations entre l'architecture de l'arbre (croissance primaire), la croissance en grosseur du tronc et des branches (croissance secondaire) et la mécanique de l'arbre ».

La démarche repose sur quatre étapes :

1. Construction du modèle par une description fine de l'architecture (modèle en trois dimensions) et des lois de ré-

partition des assimilats sur un cas théorique simple, ce qui nécessite d'énormes connaissances en architecture et en physiologie.

2. Etude de la concurrence entre arbres : discrétisation de l'espace en parallélogrammes élémentaires ou voxel (ce qui revient à construire un automate cellulaire en trois dimensions) pour traduire : la compétition par contact (définition des lois de croissance des apex en fonction de l'état des vortex voisins – vide ou plein –), la compétition pour la lumière (vitesse de croissance et orientation de la croissance sont pondérées par le calcul de la lumière incidente en tous points de l'espace discrétisé).

3. Passage à la structure du tronc : l'effet de l'évolution de la géométrie du houppier sur la répartition du bois de réaction est étudié. Elle repose sur une discrétisation du tronc en trois dimensions et l'application de la méthode des éléments finis pour calculer la position des nœuds de façon à avoir un équilibre de la structure. A partir de la topologie et de la géométrie de la structure créée par le modèle précédent, le modèle calcule, à chaque pas de temps, le déplacement de chaque nœud du maillage de façon à avoir l'état d'équilibre de la poutre.

4. Passage à l'étude d'un peuplement. Le problème essentiel à résoudre est alors de « trouver un compromis entre les modèles détaillés qui consomment beaucoup de calcul et les modèles économiques opérationnels dans une optique d'aide à la décision ». Ce « retour en arrière », c'est-à-dire la simplification de la description de la plante sans altérer la qualité des prédictions, est à l'étude et permettra de simuler des plantes en interactions et donc de petites portions de peuplement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUSQUET F., 1994.

Des milieux, des poissons et des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le delta central du Niger. Thèse de doctorat, Université Lyon 1. Collection T.D.M. ORSTOM, n° 119, 175 p.

BUONGIORNO J., PEYRON J.-L., HOULLIER F., BRUCIAMACCHI M., 1995.

Growth and management of mixed-species, uneven-aged forests in the French Jura : implications for economic returns and tree diversity. *For. Sci.*, 41 (3), p. 397-429.

C.N.R.S., 1996.

Actes des Journées du Programme Environnement, Vie et Société du C.N.R.S., janvier 1996, Paris.

CROC E., 1994.

Dynamique d'un peuplement forestier hétérogène. Modèle de réaction-diffusion. Modèle de Turing. Rapport d'option, Ecole Polytechnique, Paris, 26 p.

DE REFFYE P., HOULLIER F., BLAISE F., FOURCAUD T., 1995.

Essai sur les relations entre l'architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs. Extrait des actes du Colloque de l'A.I.P. Architecture INRA-CIRAD, à paraître série « Colloques INRA », 162 p.

DELEUZE C., 1996.

Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration de connaissances écophysologiques dans les modèles de production ligneuse. Thèse de doctorat, Université Lyon I.

- DOLIGEZ A., 1996.
Evolution de la diversité génétique intra-population et de sa structure : étude d'un modèle de simulation spatialisé en vue de la gestion des ressources génétiques forestières tropicales. Thèse de doctorat, INA-P.G., Paris, 182 p. + annexes.
- 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.
- FRANC A., 1995.
Simulation de la dynamique des peuplements forestiers hétérogènes : quelques pistes à l'aide de modèles simples. Rev. For. Fr. XLVII, n° spécial 1995, p. 183-191.
- GIORDAN A., 1996.
Voici venue l'ère de la physiologie. La Recherche, n° 284, février 1996, p. 80-86.
- GOREAUD F., 1995.
Etude et modélisation des peuplements hétérogènes : rôle des interactions dans la structure du peuplement. Rapport de D.E.A., ENGREF, Université Paris VI, 30 p.
- GOURLET-FLEURY S., HOULLIER F., 1996.
Development of a diameter growth prediction model in a tropical moist forest of French Guiana, à paraître.
- HOULLIER F., 1995.
A propos des modèles de la dynamique des peuplements hétérogènes : structures, processus démographiques et mécanismes de régulation. Rev. Ecol. (Terre et Vie) n° 50 (3), p. 273-282.
- HOULLIER, F., BOUCHON, J., BIROT, Y., 1991.
Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. Revue Forestière Française, XLIII (2), p. 87-108.
- HOULLIER, F., MILLIER, C., 1995.
Dynamique des peuplements en forêt dense humide : dialogue entre écologues, expérimentateurs et modélisateurs. Rev. Ecol. (Terre et Vie) n° 50 (3), p. 303-311.
- LA RECHERCHE, 1991.
La Science du désordre. La Recherche, n° 232, p. 539-698.
- LEGAY J.-M., BARBAULT R., 1995.
La révolution technologique en écologie. Ed. Masson, 259 p.
- MACHON N., 1995.
Etude de la variabilité génétique des arbres forestiers. Exemples du châtaignier et de l'orme. Thèse de doctorat. Université Paris-Sud, Orsay, 60 p. + annexes.
- MORAVIE, M.-A., 1995.
Modèle de dynamique de peuplements plurispécifiques inéquiennes (application à un peuplement forestier tropical humide de l'Inde). Rapport de DEA, Université Lyon I, Lyon, 31 p. + annexes.
- ORSTOM-C.N.R.S.
Résumé des communications du symposium ECOFIT sur la dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux. Ed. ORSTOM/C.N.R.S., 335 p.
- PASCAL J.-P., 1995.
Quelques exemples de problèmes posés à l'analyste et au modélisateur par la complexité de la forêt tropicale humide. Rev. Ecol. (Terre et Vie) n° 50 (3), p. 237-249.
- PAVE, A., 1994.
Modélisation en biologie et écologie. Ed. Aléas, 559 p.
- PELISSIER R., 1995.
Relations entre l'hétérogénéité spatiale et la dynamique de renouvellement d'une forêt dense humide sempervirente (Forêt d'Uppangala, Ghâts Occidentaux de l'Inde). Thèse de doctorat, Université Lyon I, 236 p.
- PUIG H., 1995.
Eléments pour une réflexion sur la modélisation de la forêt tropicale humide : a-t-on les connaissances requises ? Rev. Ecol. (Terre et Vie) n° 50 (3), p. 199-208.
- ROCHAS, M., 1996.
La prévision météorologique. La Recherche, n° 284, février 1996, p. 99-99.
- VANCLAY J. K., 1995.
Growth models for tropical forests : a synthesis of models and methods. For. Sci. n° 41 (1), p. 7-42.

► Eric LOFFEIER
Vincent FAVRICHON
CIRAD-Forêt / Baillarquet
B.P. 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX

Remerciements : Les auteurs remercient particulièrement MM. François HOULLIER, Henri-Félix MAITRE et Marc DUBOIS pour leurs conseils et suggestions, ainsi que les auteurs qui ont bien voulu les autoriser à publier leurs illustrations.

GLOSSAIRE

AGRÉGATION DE VARIABLES : consiste à réduire la dimension d'un système différentiel.

AMAP : unité de modélisation des plantes du CIRAD-GERDAT.

APPLICATION LINÉAIRE : une application f de l'espace vectoriel V dans l'espace vectoriel V' est linéaire si $f(u + v) = f(u) + f(v)$ et si $f(ku) = kf(u)$.

AUTOMATE CELLULAIRE : un réseau d'automates cellulaires est un ensemble de cellules en interaction. Chacune de ces cellules est appelée « automate » et fonctionne comme un système dynamique : elle est caractérisée par ses variables d'état et elle est soumise à des entrées et produit des sorties.

CHAOS : caractérise des phénomènes dans lesquels de très petites différences dans les causes sont capables de provoquer de grandes différences dans les effets.

EQUATION DIFFÉRENTIELLE : chaos, équation servant à traduire les lois qui régissent la variation d'une grandeur en fonction d'une ou plusieurs variables. Quand la fonction est à plusieurs variables on parle d'équation aux dérivées partielles. Un système différentiel du premier ordre est un ensemble d'équations différentielles, où les fonctions inconnues sont couplées.

F-STATISTIQUES : statistiques représentant la probabilité de tirer deux gamètes portant le même allèle dans deux populations différentes.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : encore appelée modèle à base de connaissances ou système expert, il s'agit d'un type de modèle ayant pour objectif de reproduire le raisonnement humain. Il existe différents types de représentation des connaissances dont l'un est basé sur la représentation centrée-objet.

LOI : proposition générale énonçant des rapports nécessaires et constants entre des phénomènes physiques ou entre les constituants d'un ensemble.

MATRICE : tableau de nombres à p lignes et n colonnes, souvent utilisé pour la résolution d'un système d'équations linéaires.

MÉTAPOPULATION : ensemble de populations isolées sur le plan reproductif.

MÉTHODE : marche rationnelle de l'esprit pour arriver à la connaissance ou à la démonstration d'une vérité.

MODELE : structure formalisée, utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations.

MODELE ARCHITECTURAL : modèle permettant de construire des plantes virtuelles à partir des règles botaniques propres à la construction de l'architecture végétale. Ils combinent un modèle morphologique descriptif en trois dimensions et un modèle de type agronomique simulant l'influence des facteurs extérieurs sur le rendement.

MODELE EN STEPPING-STONE : modèle génétique de populations discontinues dans lequel les échanges de gènes se font entre populations voisines.

NOYAU DE VIABILITÉ : c'est l'ensemble des états possibles du système à partir desquels il existe au moins une « trajectoire » qui reste toujours dans l'ensemble des contraintes.

PROCESSUS STOCHASTIQUE OU ALÉATOIRE : une famille de variables aléatoires, prenant ses valeurs dans un ensemble numérique fini, dont l'argument est le temps. Si le temps est dénombrable, le processus est dit « en temps discret ».

PROCESSUS DE MARKOV EN TEMPS DISCRET : processus stochastique consistant en une séquence d'événements auxquels sont associées des probabilités conditionnelles. L'état futur du processus ne dépend que de son état présent ; il est indépendant de ses états passés.

REPRÉSENTATION CENTRÉE-OBJET : l'entité de description est appelée schéma. Il décrit aussi bien une classe d'objets qu'un objet particulier. Il est défini par un nom et la liste de ses attributs. Cet attribut peut représenter une propriété ou un lien avec une autre classe. Un objet particulier, réalisation concrète d'une classe d'objets, est appelé instance du schéma de classe correspondant. Le mécanisme d'héritage permet à un schéma de classe donné d'hériter des éléments de description des schémas plus généraux qui le dominent.

SYSTEME MULTI-AGENTS : c'est un outil informatique qui représente les agents du monde observé et leurs comportements. Elaborer un système multi-agents revient à reproduire un monde artificiel ressemblant au monde observé en ce sens qu'il est composé de différents agents, de façon à y mener diverses expériences. C'est une démarche qui fait partie de l'Intelligence Artificielle.

THÉOREME : proposition scientifique qui peut être démontrée.

THÉORIE : connaissance spéculative, idéale, indépendante des applications. Ensemble de théorèmes et de lois systématiquement organisés... qui vise à établir la vérité d'un système scientifique.

VÉRIFICATION : phase de contrôle de l'adéquation, de la précision et de la robustesse des algorithmes dont le modèle est constitué.

VALIDATION : phase de contrôle où l'on tente de s'assurer que l'ensemble construit représente bien le monde réel.

VÉRITÉ : adéquation entre la réalité et l'homme qui la pense.

LISTE DES LABORATOIRES DE MODÉLISATION

CIRAD-Gerdat AMAP-Unité de Modélisation des Plantes 2477, av. du Val de Montferrand BP 5035 34032 MONTPELLIER CEDEX 1	ENGREF & INRA Centre de Nancy Laboratoire de Recherches en Sciences Forestières Unité Dynamique des Systèmes Forestiers 14, rue Girardet 54042 NANCY CEDEX	Institut National de la Recherche en Informatique et en Automatique 2004, route des Lucioles BP 93 06902 SOPHIA ANTIPOLIS CEDEX
CIRAD-Forêt Programme Forêt Naturelle Campus international de Baillarguet BP 5035 34032 MONTPELLIER CEDEX 1	Université Claude Bernard Lyon 1 URA.-C.N.R.S. 2055 43, bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE CEDEX	C.N.R.S.-U.P.R. 8481 Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive BP 5051 34033 MONTPELLIER CEDEX 1
CIRAD-Gerdat Unité de Recherches GREEN Campus international de Baillarguet BP 5035 34032 MONTPELLIER CEDEX 1	Institut Français de Pondicherry 11, St Louis Street P.B. 33 PONDICHERRY 605001 Inde	Institut National de l'Audiovisuel Paris-Grignon 16, rue Claude Bernard 75005 PARIS
ENGREF 19, av. du Maine 75015 PARIS	Université Paris VI URA.-C.N.R.S. LAFORIA-lbp 75252 PARIS CEDEX 05	C.N.R.S. Programme Environnement, Vie et Sociétés 1, place A. Briand 92195 MEUDON CEDEX

R É S U M É

LA FORÊT VIRTUELLE : ÉTAT DES LIEUX

Prenant prétexte des journées scientifiques du programme Environnement, Vie et Société du CNRS de janvier 1996, cet article se propose de faire un tour d'horizon des techniques mises en œuvre pour modéliser et simuler la dynamique des écosystèmes forestiers hétérogènes et notamment tropicaux.

Une première partie rappelle brièvement quelques bases théoriques, avec une attention particulière portée aux problèmes de changements d'échelle et de validation. La deuxième partie propose une typologie des méthodes utilisées et présente quelques perspectives nouvelles. Six exemples, accompagnés d'un glossaire et d'une liste de laboratoires, illustrent les grandes tendances actuelles.

Mots-clés : Modèle. Modèle de simulation. Ecosystème. Forêt tropicale. Gestion des ressources.

A B S T R A C T

THE VIRTUAL FOREST: AN INVENTORY

Taking as its pretext the scientific meetings in the CNRS Environment, Life and Society programme held in January 1996, this article presents an overview of the techniques applied to the modeling and simulation of the dynamics of heterogenous and, in particular, tropical forest ecosystems.

The first part briefly recapitulates one or two theoretical bases, with a special focus on the problems of changes of scale and validation. The second part puts forward a typology of methods used and describes certain new prospects. Six examples, complete with a glossary and laboratory listing, illustrate the major current tendencies.

Key words : Models. Simulation models. Ecosystems. Tropical forest. Resource management.

R E S U M E N

EL BOSQUE VIRTUAL : INVENTARIO FORESTAL

Con motivo de las jornadas científicas del programa Medio ambiente, Vida y Sociedad del CNRS (Centro nacional de Investigaciones Científicas de Francia), el presente artículo tiene por propósito analizar el estado actual de las técnicas puestas en aplicación para modelizar y simular la dinámica de los ecosistemas forestales heterogéneos y, concretamente, tropicales.

En la primera parte se mencionan brevemente algunas bases teóricas, poniendo particular atención a los problemas de modificaciones de escala y de validación. En la segunda parte se propone una tipología de los métodos puestas en aplicación y se presentan algunas nuevas perspectivas. Mediante seis ejemplos, acompañados de un glosario y de una lista de laboratorios, se ilustran las tendencias preponderantes actuales.

Palabras clave : Modelos. Modelos de simulación. Ecosistema. Bosque tropical. Ordenación de recursos.