

DYNAMIQUE DES PEUPELEMENTS DE FORÊT DENSE HUMIDE : DIALOGUE ENTRE ÉCOLOGUES, EXPÉRIMENTATEURS ET MODÉLISATEURS

François HOULLIER* et Claude MILLIER**

INTRODUCTION

L'ensemble des discussions qui ont eu lieu lors des réunions de Kourou et de Lyon, puis à l'occasion de quelques autres contacts informels, se sont schématiquement structurées autour du croisement de trois points de vue :

— celui des biologistes intéressés par des problèmes d'*écologie théorique et appliquée* concernant la structure, la dynamique, le fonctionnement et la gestion des forêts denses humides ;

— celui des expérimentateurs qui posent des questions liées à la *métrologie*, à l'*observation*, à l'*expérimentation*, et à la complémentarité entre les divers dispositifs de terrain existants ;

— celui des biométriciens, des mathématiciens et des informaticiens qui ont proposé diverses pistes de *modélisation* qui permettraient de s'appuyer sur les données existantes (ou potentielles) afin de représenter la dynamique des peuplements forestiers (naturels ou exploités).

À l'intersection de ces points de vue, les problèmes de choix des *échelles d'espace et de temps* pertinentes — et les problèmes corollaires d'agrégation de variables, de passage entre niveaux d'organisation et de changements d'échelle — ont constitué une trame méthodologique permanente. Nous retrouvons donc ici un thème majeur de l'écologie et des recherches sur l'environnement. La méthode de travail retenue a consisté : (i) à distinguer quelques combinaisons d'échelles spatiales et temporelles pertinentes pour aborder des questions scientifiques et/ou des problèmes technico-économiques ; puis (ii) à dégager, à partir et autour des compétences présentes, des projets de modélisation à court et moyen termes (le champ des modèles de la dynamique des peuplements forestiers n'a donc sans doute pas été intégralement parcouru).

Quatre niveaux d'organisation ont ainsi été dégagés, auxquels correspondent des échelles spatiales et temporelles qui se recouvrent partiellement (Tableau I). Comme on pouvait s'y attendre, ces différentes échelles s'organisent grossièrement selon une diagonale dans un graphe espace x temps.

* ENGREF, 14, rue Girardet, F-54042 Nancy Cedex.

** ENGREF, 19, rue du Maine, F-75732 Paris Cedex 15.

Tableau I

Niveaux d'organisation, échelles d'espace et de temps et questions correspondantes.

Niveau	Champ (ha)	Pas (ha)	Portée (an)	Pas (an)	Questions sur la structure et la diversité	Questions sur la dynamique forestière
Amazonie	5 10 ⁸	?	10 ³ -10 ⁶	?	• Apparition et maintien de la biodiversité.	• Évolution simultanée du climat et de la forêt
Unité d'aménagement	10 ⁴	10-10 ²	10 ² -10 ³	20-50	• Maintien des espèces rares	• Rendement soutenu
Parcelle	10-100	1	10-500	5-20	• Coexistence de nombreuses espèces • Mosaïques sylvigénétiques	• Hétérogénéité locale et stabilité globale • Vitesse de reconstitution après exploitation • Relations sol-végétation • Relations faune-flore • Sylvigénèse et dynamique locale : chablis, trouée, substitution, croissance individuelle, concurrence.
Élément de la mosaïque, trouée	< 1	< 10 ⁻²	5-50	1-5	• Succession • Architecture des arbres • Structure de la canopée	• Réaction à l'éclaircie.

— Bien qu'importants, les deux niveaux les plus agrégés, celui du continent et celui qui va de la *forêt aménagée* par l'Office National des Forêts à la *région biogéographique*, ont été plus évoqués que réellement discutés. Le second renvoie à la problématique des changements globaux, le premier à celle du rendement soutenu.

— Les discussions ont plus porté sur les deux niveaux les plus fins, celui de la parcelle et celui de la *trouée* (pour le biologiste) ou de la *placette* (pour l'expérimentateur). C'est entre ces deux niveaux que les relations hiérarchiques sont les plus explicites (de l'arbre à la parcelle ou au peuplement) et que se pose la question de la dualité entre *hétérogénéité locale et stabilité globale*.

Cette question amène à s'intéresser à la représentation spatiale des phénomènes qui, comme on le détaillera plus loin, peut prendre trois formes principales :

— la description de la mosaïque forestière (délimitation d'unités spatiales homogènes) qui conduit assez naturellement à des modèles d'*automates cellulaires* ;

— la cartographie des arbres en deux dimensions qui débouche sur des *systèmes multi-agents* ;

— la description du volume occupé par les individus qui motive l'étude du *développement architectural*.

La correspondance entre mode de représentation spatiale et classe de modèles n'est pas stricte. On peut, par exemple, simuler l'occupation de l'espace aérien par les houppiers avec un automate cellulaire (Auger et Pascal, comm. pers.).

Comme cette brève introduction l'indique, les discussions ont beaucoup porté sur les peuplements forestiers (les arbres). Toutefois, elles ont aussi abordé le thème des interactions plantes-animaux sous le double aspect de l'influence de la végétation sur le comportement et l'organisation des populations animales et de l'effet de ces populations sur la dynamique et la structure de la végétation. En revanche, d'autres aspects importants du fonctionnement de ces écosystèmes n'ont été qu'effleurés : par exemple les relations entre le sol et la végétation.

ÉCOLOGIE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

La dualité entre la stabilité globale (réelle, supposée ou souhaitée) de ces écosystèmes, à l'échelle de quelques dizaines d'hectares et d'une centaine d'années, et leur hétérogénéité locale amène à s'interroger sur les mécanismes de maintien de la diversité spécifique, sur le fonctionnement en mosaïque de populations souvent représentées par des effectifs faibles, sur le comportement agrégatif de certaines espèces, sur l'existence de groupes fonctionnels ainsi que sur l'impact comparé des phénomènes « naturels » et des actions anthropiques.

Ces questions ne sont pas totalement spécifiques des forêts denses humides, mais elles s'y posent avec une grande acuité. La liste des thèmes évoqués comprend ainsi :

— La représentation de la *mosaïque forestière* (variations dans l'espace et dans le temps de la structure verticale et de la composition spécifique du peuplement) et la description de son fonctionnement. Ce thème motive des études visant, d'une part, à caractériser l'état d'un peuplement (typologie, délimitation des unités homogènes sur le terrain, analyse statistique de l'agencement de ces unités) et, d'autre part, à analyser et décrire les mécanismes qui déterminent l'évolution de cet état. Il pose donc un problème de *dynamique spatiale* et ce problème est complexe du fait du grand nombre de variables et de l'absence d'un mode de représentation canonique de l'état d'un peuplement forestier. Ce thème renvoie aussi au thème général des *populations fragmentées*.

— Les modalités de la *sylvigénèse* et l'étude du renouvellement des peuplements après des perturbations naturelles (mort sur pied, chablis) ou anthropiques (exploitation). Trois modes de sylvigénèse sont généralement cités : la substitution (occupation par des arbres préexistants de l'espace libéré par des arbres morts sur pied), la succession locale au sein de trouées occasionnées par des chablis localisés, la succession progressive par propagation de vagues de chablis. Il semble que selon les conditions topographiques (ex. pentes), climatiques (ex. vents), selon aussi la composition spécifique (ex. architecture des grands arbres) et le mode de dissémination des graines ce soit l'un ou l'autre de ces modes de sylvigénèse qui soit prépondérant (Riéra, comm. pers.). Dans tous les cas, l'étude de la sylvigénèse renvoie à des problèmes *d'occupation, de libération et de colonisation de l'espace aérien*.

— La recherche de *groupes fonctionnels*. La mise en évidence de groupes d'espèces remplissant des fonctions voisines (vis-à-vis de la dynamique forestière naturelle et/ou perturbée) répond à un double besoin : (i) l'identification même de ces fonctions et des stratégies des espèces ; (ii) la nécessité de simplifier la description des peuplements, d'agréger les espèces en fonction de leur rôle et de leur comportement, pour parvenir à une description minimale des peuplements. La principale difficulté est sans doute celle de la sensibilité de la définition de ces groupes aux fonctions étudiées par les écologues et aux conditions écologiques (sol, climat) et anthropiques (peuplements exploités ou non).

— Les *interactions entre les populations animales et végétales*. Les animaux ont une influence sur la composition et la structure spatiale de la forêt : par exemple, la prédation et la dissémination des graines sont une cause de l'agrégativité de certaines espèces. En retour, la structure des peuplements a, évidemment, une influence sur le comportement des animaux (dortoirs, alimentation).

— La gestion et l'exploitation des peuplements motive l'étude de la réaction des arbres et des peuplements aux actions sylvicoles, étude qui pose la question de

la *compétition* pour les diverses ressources du milieu (eau, lumière, éléments minéraux). Les difficultés viennent (i) de la diversité des espèces et de leur comportement, (ii) de la variété des formes que peut prendre cette réaction (augmentation de la vitesse de croissance des arbres, mortalité induite par la déstabilisation du peuplement, augmentation de la régénération) et (iii) de l'hétérogénéité du milieu. Il est ainsi malaisé de distinguer le rôle respectif des ressources et d'estimer la portée des phénomènes de compétition.

Les problèmes de choix des niveaux d'organisation pertinents et des changements d'échelles sont ici rendus plus aigus par la forte diversité spécifique et l'hétérogénéité structurale des peuplements (ex. agrégation des espèces en groupes fonctionnels, recherche de la dimension moyenne de l'unité élémentaire de la mosaïque).

DISPOSITIFS DE TERRAIN ET MÉTROLOGIE

La Guyane recèle actuellement un assez grand nombre de dispositifs de terrain plus ou moins dédiés à un thème particulier (Tableau II). Le besoin de réaliser des études comparées (entre sites, entre espèces) a été évoqué à plusieurs reprises. C'est notamment l'une des conditions de la généralisation éventuelle des observations et des modèles qui en découleront. Il est donc nécessaire de faire appel à d'autres dispositifs : en Amérique du Sud (Manaus...) et sur d'autres continents (Afrique, Asie) où la composition et la diversité spécifiques, la structure, la productivité et le fonctionnement des forêts denses humides sont différents. Riéra et Pascal (comm. pers.) suggèrent ainsi que les différences de fonctionnement sylvigénétique observés en Guyane (où le chabbis est prépondérant) et dans les forêts à Dipterocarpaceae du sud de l'Inde (où la substitution est

Tableau II

Principaux dispositifs d'observation et d'expérimentation forestières en Guyane.

<i>Dispositif</i>	<i>Opérateurs principaux</i>	<i>Thèmes de recherche*</i>
<i>ECEREX et piste de Saint-Elie</i>	CIRAD, ORSTOM, Muséum	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrologie (bassins versants) • Succession après exploitation • Dynamique des peuplements naturels
<i>Camp des Nouragues</i>	CNRS, Muséum	<ul style="list-style-type: none"> • Relations plantes-animaux • Dynamique des peuplements naturels et sylvigénèse
<i>Paracou</i>	CIRAD, INRA, ENGREF	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamique comparée des peuplements naturels et exploités • Diversité génétique • Dynamique des humus • Ecophysiologie
<i>Placeaux du BAFOG</i>	ENGREF, ONF	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamique des peuplements après exploitation

* La liste des thèmes de recherche abordés dans chaque dispositif n'est pas exhaustive.

plus fréquente) proviennent de différences architecturales (étalement des houppiers plus important en Guyane), morphologiques (feuilles plus grandes en Inde), de mode de dissémination des espèces pionnières (plutôt zoochore en Guyane, plutôt anémochore en Inde), qui sont elles-mêmes imputables à la composition floristique.

L'étude de la dynamique des peuplements nécessiterait par ailleurs de faire des progrès *métrologiques*. Par exemple, on manque d'informations précises sur la croissance en hauteur des arbres et sur le développement latéral des houppiers alors que la structuration verticale des peuplements et l'occupation de l'espace (tridimensionnel) sont reconnus comme essentiels.

Enfin, la relative faiblesse des connaissances sur les stations forestières et sur les caractéristiques des sols est un handicap dans l'identification des causes de l'hétérogénéité constatée des peuplements forestiers : comment faire la part entre la variabilité des processus démographiques et les variations locales des conditions stationnelles ?

DES CLASSES DE MODÈLES ADAPTÉES

L'intérêt pour la modélisation, qui recouvre diverses méthodes et techniques, provient de divers facteurs :

— nous connaissons la puissance des méthodes de modélisation mathématique, statistique et informatique dans d'autres contextes (ex. forêts homogènes, dynamique des populations animales) et nous devinons qu'elles pourraient s'appliquer pour analyser et représenter le fonctionnement et la dynamique des forêts denses humides — bien qu'elles n'aient été encore que peu appliquées dans ce contexte ;

— ces méthodes peuvent notamment servir à assembler des connaissances écologiques et botaniques, quantitatives et qualitatives, et à étudier par simulation l'existence et la nature de propriétés globales déduites de ces connaissances ;

— certaines d'entre elles possèdent des capacités de représentation formelle et visuelle susceptibles de favoriser le dialogue au sein de la communauté scientifique — entre expérimentateurs et théoriciens, entre écologues et modélisateurs —, comme avec les décideurs, les gestionnaires et les populations concernées.

Plusieurs classes de modèles ont ainsi été présentées et discutées. Les compétences présentes n'ont pas permis d'aborder les problèmes posés à une échelle régionale. Les questions posées à l'échelle continentale sont traitées dans le cadre du programme ECOFIT et sont justiciables d'un assemblage de méthodes diverses — méthodes statistiques, modèles dynamiques, systèmes-experts — qui permettent d'opérer des raccords entre les informations obtenues avec plus ou moins de détail, pour différentes périodes et en différents lieux. Comme cela a été indiqué plus haut, ce sont les niveaux de la parcelle et de la trouée qui ont été privilégiés :

— Les modèles basés sur des *systèmes d'équations différentielles ordinaires* (ou d'équations aux différences) permettent de représenter globalement les flux de matière et d'énergie ainsi que les processus démographiques de la dynamique des populations. Ces modèles, « classiques » et assez simples, fournissent des indica-

tions sur la sensibilité relative de la structure dimensionnelle des peuplements à divers facteurs. Ils permettent de rendre compte de l'évolution globale de peuplements naturels ou gérés.

Ils posent cependant les problèmes de l'agrégation des espèces en un petit nombre de groupes fonctionnels ayant des paramètres démographiques identiques, de la régulation de la dynamique moyenne par la densité du peuplement et de la représentation des phénomènes aléatoires (ex. mortalité). Dans leur forme actuelle, les points les plus délicats sont : la représentation des interactions spatiales et de la diversité spécifique, les relations plantes-animaux.

— *Les automates cellulaires* sont basés sur la représentation de l'espace en cellules, plus ou moins abstraites, interconnectées. On peut en fait envisager deux types d'automates cellulaires : ceux où l'unité modélisée est l'individu (ex. arbre), il y a là recouvrement avec les systèmes multi-agents ; ceux où l'unité modélisée est un morceau d'espace (ex. discrétisation de l'espace en quadrats). La dynamique temporelle de chaque cellule dépend de son état initial et de l'état des cellules voisines. Les automates permettent donc d'analyser des phénomènes spatio-temporels. Les échelles spatiales auxquelles ils peuvent être appliqués vont du bouquet d'arbres (ex. interaction entre houppiers et occupation de l'espace) à plusieurs centaines d'hectares (ex. dynamique de populations fragmentées).

Les automates cellulaires sont à la fois des objets mathématiques (l'analyse de leurs propriétés mathématiques n'est possible que lorsque le nombre d'états possibles pour chaque cellule n'est pas trop élevé) et des outils informatiques de simulation. Ils constituent donc une classe de modèles privilégiés pour analyser les problèmes d'agrégation de variables et de changements d'échelles.

Trois activités complémentaires peuvent être envisagées : (i) application à la représentation de la sylvigénèse par substitution. L'occupation de l'espace par les houppiers d'arbres voisins de même hauteur ressemble à un champ de « bulles de savon » (Pascal, comm. pers.) et pourrait être modélisée au moyen d'un automate où chaque cellule du plan aurait la dimension d'un petit élément de houppier et pourrait être soit vide, soit occupée (Franc (comm. pers.) a d'ailleurs déjà commencé d'explorer cette voie avec des « amas d'Eden ») ; (ii) conception d'un modèle de trouées (« gap model ») par la prise en compte de l'espace dans les modèles démographiques en temps discret ; (iii) étude des propriétés mathématiques des automates (ex. existe-t-il un état d'équilibre stable ?) et des problèmes de changements d'échelles et d'agrégation de variables (phénomènes lents et rapides, globaux et locaux). Ces activités requièrent, outre la participation d'écologues, un investissement en informatique (ex. représentation tridimensionnelle des arbres) et en mathématiques.

— *Les systèmes multi-agents (SMA)* sont des outils de simulation informatique fondés sur une représentation des individus (arbres, animaux), éventuellement regroupés en classes, et de leurs interrelations temporelles et spatiales. Les propriétés mathématiques des SMA sont difficiles à étudier formellement (peu d'équipes s'y consacrent), mais il est possible de les rechercher par simulation : par exemple, quelles sont les propriétés globales (ex. caractéristiques générales de la mosaïque forestière) qui « émergent » à partir des comportements individuels (ex. équation de croissance individuelle, probabilité de mortalité, etc) ?

D'une certaine façon, on peut considérer que des SMA appliqués à la forêt seraient la forme moderne des modèles d'arbres dépendants des distances

développés dans les années 70. Les moyens informatiques actuels permettent cependant d'aborder des problèmes à des échelles allant de l'hectare à la centaine d'hectares, de l'année au siècle.

Un des intérêts majeurs des SMA est qu'ils fournissent sans doute le meilleur cadre pour formaliser et assembler les connaissances acquises par les spécialistes des diverses disciplines (ex. croissance et mortalité des arbres en fonction de leur voisinage, comportement des animaux, relations plantes-animaux, effet d'un traitement sylvicole local, variation des conditions stationnelles).

— Nous avons aussi évoqué l'intérêt de la *modélisation quantitative de l'architecture des arbres* (approche du CIRAD-GERDAT à Montpellier) pour aborder des problèmes locaux et globaux. Au niveau local : formalisation et quantification des connaissances botaniques et morphologiques, analyse des mécanismes de la sylvigénèse (1) (ex. simulation de l'évolution de la dynamique d'un petit groupe d'arbres dans une trouée). Au niveau de la parcelle : possibilité de figurer l'évolution de paysages, la simulation de la dynamique des peuplements étant obtenue avec des modèles plus simples, par exemple un SMA. On peut d'ailleurs considérer que la modélisation de l'architecture des arbres aboutit à un SMA. Un intérêt des modèles d'architecture réside dans leur capacité à représenter visuellement le développement des arbres en trois dimensions.

La discussion a fait apparaître que :

— Les automates cellulaires et les SMA (dont les modèles architecturaux) peuvent fournir un support original pour des projets à moyen et long termes (3-10 ans) de modélisation de la dynamique forestière locale et à méso-échelle.

— Ces deux techniques ne sont pas exclusives de techniques de modélisation plus « classiques » qui seront d'ailleurs nécessaires pour représenter le comportement de certains sous-systèmes ou de certains processus.

— Elles permettent d'articuler les dimensions spatiale et temporelle, c'est-à-dire, ici, de simuler la dynamique forestière en tenant compte des interactions spatiales et/ou entre individus.

— En schématisant (abusivement ?), le clivage entre les « tenants » des deux approches porte sur leur philosophie de la modélisation et sur leur spécialité. Les tenants des systèmes multi-agents mettent l'accent sur *l'intégration des connaissances* et le « réalisme » de la représentation : ce sont plutôt des naturalistes et/ou des informaticiens. Les tenants des automates cellulaires insistent sur *la recherche de modèles minimaux*, plus abstraits, mais dont les propriétés mathématiques peuvent être étudiées : ce sont plutôt des biométriciens et/ou des mathématiciens.

DES PROJETS À COURT ET MOYEN TERMES

Les discussions ont finalement permis d'ébaucher quelques projets de modélisation à court et moyen termes.

— Réalisation d'une maquette de SMA en se limitant à une représentation 2D : cette maquette fonctionnera à l'échelle locale (1 à quelques ha), elle sera

(1) L'école architecturale qualitative de Oldeman et Hallé est née en forêt dense humide afin de décrire la structure des peuplements et les phénomènes de la sylvigénèse. Ce serait un juste retour des choses que l'approche quantitative qui en a découlé soit maintenant appliquée à cette même forêt.

d'abord basée sur les connaissances disponibles (croissance et régénération des arbres), elle devra permettre de préciser certains problèmes concernant l'articulation des divers processus démographiques, notamment la régénération (problème du très grand nombre d'individus) et les interactions plantes-animaux (problème des influences à « grande » distance).

— Un projet de SMA plus ambitieux, incluant les processus de croissance, mortalité, régénération, des interactions plantes-animaux, des représentations 3D et portant sur plusieurs dizaines d'hectares, pourra ensuite être envisagé. Les finalités d'un tel système seraient : (i) la simulation et la représentation graphique du fonctionnement global d'un peuplement ; (ii) la recherche, par simulation, de propriétés globales déduites de la connaissance, plus ou moins bien quantifiée, des comportements individuels ; (iii) la réalisation d'un outil généraliste permettant l'intégration progressive de connaissances dans un cadre adapté aux naturalistes.

— Réalisation d'un automate cellulaire permettant de représenter les mécanismes locaux de la sylvigénèse par chablis et par substitution.

— A plus long terme, on peut envisager d'articuler, au sein d'un automate cellulaire, des modèles classiques de la dynamique des populations (opérant au niveau d'une unité spatiale élémentaire) en introduisant des interactions spatiales (par des couplages entre unités voisines) : (i) régulation de la croissance et de la mortalité naturelle par la densité du peuplement ; (ii) propagation aléatoire des chablis d'une unité vers les unités voisines ; (iii) dissémination à distance des graines.

Les finalités d'un tel automate seraient : (i) la simulation et la représentation 2D du fonctionnement de la mosaïque forestière dans un peuplement étendu (quelques centaines d'hectares si l'on adopte des unités de quelque ares) ; (ii) l'étude par simulation de propriétés globales telles la vitesse moyenne de renouvellement ou la taille des trouées ; (iii) une meilleure compréhension de la dualité entre l'hétérogénéité locale des peuplements et la persistance d'une mosaïque (stabilité).

— Réalisation d'une maquette de modèle architectural (sur 2 à 3 ans) représentant l'évolution d'un bouquet d'arbres s'installant dans une trouée (2). Il serait alors nécessaire d'acquérir des connaissances quantitatives sur l'architecture de quelques espèces (par exemple, des pionnières) et sur leur comportement en fonction de la concurrence aérienne (contact, quantité de lumière reçue).

Ces projets devront s'appuyer sur les connaissances des écologues, susciter en retour des questions à ces mêmes écologues et leur suggérer de nouvelles observations. Ils devront aussi pouvoir être confrontés à des données de terrain, notamment aux données déjà disponibles (cf. plus haut). À cet égard, et bien que ce thème ait été assez peu développé lors des réunions de Kourou et de Lyon, il serait nécessaire d'engager des actions permettant d'améliorer la nature et la précision des informations acquises en forêt.

L'ensemble, c'est-à-dire les projets de modélisation complétés par des actions sur la métrologie, pourrait ainsi constituer la base d'un projet pluriannuel sur la dynamique des forêts denses humides.

(2) Les méthodes récemment développées au CIRAD (notamment dans le cadre d'une AIP avec l'INRA) permettent en effet de simuler la croissance simultanée d'un petit groupe d'arbres ainsi que leurs interactions aériennes (contact entre les houppiers, interception de la lumière).

RÉSUMÉ

Le dialogue s'est organisé autour du croisement de trois points de vue : celui de l'écologue intéressé par des problèmes d'écologie théorique et appliquée (structure, dynamique, fonctionnement et gestion des forêts denses humides) ; celui de l'expérimentateur concerné par la métrologie, l'organisation des observations et des expériences, et l'utilisation optimale des sites existants ; celui du biomathématicien qui propose des méthodes nouvelles (mathématiques, statistiques, informatiques) de modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. À l'intersection de ces points de vue, les problèmes de choix des échelles d'espace et de temps pertinentes ont constitué une trame méthodologique permanente.

La discussion a permis de dégager des pistes à court et moyen terme autour de deux groupes d'outils : les systèmes multi-agents, proposés par les informaticiens et dont la flexibilité permet d'envisager une intégration progressive des connaissances écologiques ; les automates cellulaires, suggérés par les mathématiciens et qui correspondent à une approche plus théorique, abstraite et phénoménologique. L'adaptation et la mise en œuvre des méthodes architecturales quantitatives ont enfin été évoquées dans la perspective d'une représentation tridimensionnelle de la morphologie des arbres et de leurs interactions spatiales.

Mots-clés : Forêt dense, dynamique des peuplements, modélisation, échelles, structure spatiale, système multi-agent, automate cellulaire, architecture des arbres.

SUMMARY

The dialogue took place at the intersection of three complementary points of view : the ecologist's standpoint which emphasizes theoretical and applied ecology (structure of the forest mosaic, dynamics, functioning, management of dense rain forests) ; the biometrician's point of view which focuses on metrology, on the planning of observations and experimentations and on the optimal use of existing data ; the standpoint of biomathematician who develops new computer, statistical and mathematical methods for modelling forest dynamics. The problems related to the choice of relevant spatial and temporal scales were at the very core of the discussion and built a permanent methodological framework.

Short and medium-term perspectives were drawn from the emergence of two categories of new tools : (i) multi-agent systems, this approach based on object-oriented programming languages was proposed by computer scientists with the aim of progressively integrating the knowledge of the naturalists ; (ii) cellular automata, they were proposed by mathematicians and correspond to a more phenomenological and theoretical approach intended to identify the basic principles that generate the sustained diversity and heterogeneity of the rain forests. Quantitative architectural models, which can be viewed as a sub-category of multi-agents systems, were also discussed as a powerful tool for describing tree morphology and investigating spatial tree-to-tree interactions.

Key words : Rain forest, forest dynamics, modelling, scales, spatial structure, multi-agent system, cellular automaton, tree architecture.