

## Chapitre 4

### Espaces, temps, acteurs : regards d'agronomes\*

93

La gestion des ressources naturelles renouvelables a deux composantes essentielles qu'il s'agit de faire dialoguer, car on ne peut plus les traiter indépendamment : la dynamique des ressources naturelles et la gestion de ces ressources, c'est-à-dire leur exploitation durable. En représentant, pour la modéliser, une gestion dynamique de ressources spatialisées, nous sommes conduits à réfléchir sur les interactions entre l'espace, le temps et l'action. O. Barreteau et J.-P. Treuil traitent dans cet ouvrage de l'action des acteurs sur les ressources et les écosystèmes. En réponse au titre de cette session, « Du lieu au territoire, de l'événement à l'histoire », notre réflexion porte donc sur les interactions spatio-temporelles dans l'action relative à la gestion des ressources renouvelables. Nous ne prétendons pas apporter un regard de géographe ou d'historien sur ces objets : lieu, territoire, événement, histoire, mais nous retenons dans les sessions de l'Atelier modélisation environnement (cf. Annexe II, AME 1 à 22) ce qui va être déterminant pour la modélisation, le niveau de finesse de l'analyse dans chaque cas présenté, à la fois dans l'espace et dans le temps. La question est de savoir si, pour comprendre un mécanisme, il faut individualiser ses composantes élémentaires, ses « grains ». On parlera pour cette raison de « niveau de granularité ». Deux cheminements sont possibles, celui qui consiste à passer du contextuel au général et du granulaire au continu, et l'autre, qui passe du général au particulier, en partant donc d'une représentation agrégée.

Les auteurs de ce rapport sont agronomes, et cette discipline les a rendus particulièrement sensibles aux interactions entre l'espace et le temps dans les processus de production agricole. L'agronomie illustre les tensions existantes entre espace, temps et action, lorsque cette discipline traite de production agricole et de gestion des ressources renouvelables. L'espace pris en compte va du champ cultivé au territoire villageois, et le temps, de la journée de l'organisation du travail agricole au temps long de l'évaluation des effets cumulatifs des pratiques sur le milieu. Les concepts de rotation appliqués au système de culture, d'allotement au système d'élevage, d'assolement au système de production jusqu'au territoire villageois, l'étude des pratiques des agriculteurs, la combinaison de méthodes d'analyse diachronique et synchronique, l'étude de la dynamique des systèmes de production

\* Rédigé par Dominique Hervé et Jean-Christophe Castella.

situent précisément cette agronomie à l'interface entre milieux et acteurs, entre natures et sociétés. Cependant la posture est bien celle qui va des ressources aux prélèvements et aux formes d'exploitation de ces ressources, et donc des ressources vers les gestionnaires que sont les collecteurs extractivistes, agriculteurs, éleveurs, forestiers, etc.

### **Approches des ressources, de la gestion**

Les sessions de l'AME ont abordé une grande variété de ressources renouvelables. Les dynamiques de ces ressources peuvent être représentées, selon le type de ressource, par des flux de matière entre des réservoirs, des déplacements d'individus d'une population donnée dans un plan (2D) ou dans un volume (3D), des dynamiques de population ou des processus de naissance-croissance-mortalité. Nous n'avons pas abordé la gestion de biens communs non situés, comme l'air que nous respirons, par exemple. Les ressources que nous étudions sont donc bien localisées dans l'espace. Dans un objectif de développement durable, le rythme de prélèvement de ces ressources ne doit pas dépasser leur capacité de renouvellement ; le temps est donc également convoqué, les temps devrait-on dire puisqu'il faut distinguer le temps biologique et le temps de l'usage ou l'exploitation.

La gestion des ressources par les acteurs intègre l'accès, l'usage et l'exploitation de ces ressources. Elle se différencie donc d'une fonction de prélèvement qui ne fait référence, par un point de vue centré sur la ressource, qu'à un flux et non de manière explicite aux acteurs. Le point de vue adopté en parlant de gestion est celui d'une exploitation partagée entre plusieurs acteurs. On mesure la distance qui reste à parcourir entre ce point de vue et celui qui serait centré sur la société.

### **Approches de la modélisation**

Les positionnements des thématiciens (spécialistes d'une discipline scientifique) et des modélisateurs (spécialistes des sciences de l'information), le long des deux gradients spatiaux et temporels, conditionnent fortement les choix d'outils de représentation et de méthodes de simulation. Le temps, l'espace et les variables de contrôle choisies peuvent être représentés de manière discrète ou continue. Toutes les combinaisons sont rendues possibles par l'usage d'outils mathématiques et informatiques ; nous l'illustrerons plus loin. C'est ce qui souligne l'importance de choisir le modèle en fonction des questions posées.

Cependant les domaines de validité de chaque outil de modélisation ne sont pas équivalents. Si des modèles mathématiques (équations différentielles, autres formalismes) permettent d'explorer les dynamiques, ils ne sont pas en général spatialement explicites, alors que des modèles spatiaux (cartes, SIG, chorèmes) peuvent se révéler peu adaptés pour rendre compte de dynamiques continues. Les principales limites à une approche dynamique sont l'anisotropie et l'hétérogénéité du milieu. On ne sait étudier la dynamique que de phénomènes homogènes ou de phénomènes hétérogènes considérés sur des plages homogènes. Ainsi la

représentation à la fois dynamique et spatiale des ressources peut poser des problèmes techniques et conceptuels.

Dans une première partie, les granularités sont repérées le long des deux axes de l'espace et du temps afin de montrer d'une part que tous les choix de granularité sont possibles et d'autre part que ces choix se posent en des termes différents selon le type de ressource naturelle et le niveau de complexité de la gestion que l'on veut représenter. Dans une seconde partie, nous montrons sur des exemples agronomiques tirés des sessions de l'AME comment la prise en compte des acteurs est essentielle au passage du lieu au territoire et de l'événement à l'histoire. Enfin, nous proposons des pistes de recherche pour combiner espace et temps à l'interface entre nature et société.

## LES GRANULARITÉS LE LONG DES ÉCHELLES D'ESPACE ET DE TEMPS

Les granularités de l'espace et du temps sont choisies selon les objectifs que l'on fixe au modèle et selon les capacités de mesure et d'observation. Ces choix de granularité conditionnent les choix d'outils de représentation et de méthodes de simulation.

### Choix de granularité spatiale

La prise en compte de l'espace introduit la notion d'échelle et les questions de changement d'échelle. Si l'espace est structurant, comment en tenir compte ou comment le représenter explicitement, et à quelle échelle? Dans les modèles présentés au cours des sessions AME, l'espace est plus ou moins pris en compte, de manière discrète ou continue, représenté explicitement ou non.

#### Représentation spatialisée, localisée

Un lieu est par définition localisé mais, dans un modèle, une référence explicite à l'espace n'est pas obligatoire. Le modèle peut prendre en compte des contraintes spatiales sans être spatialisé. Il nous faut là encore revenir à l'objectif du modèle et expliciter ou justifier toute démarche de spatialisation afin de ne pas la laisser implicite. Par ailleurs, un point peut être spatialisé sans être localisé. Il n'est localisé que s'il est repéré par ses coordonnées, soit dans un plan  $(x, y)$ , soit dans un espace à trois dimensions  $(x, y, z)$ .

Plusieurs exemples de non-spatialisation ont été donnés dans l'exposé du projet Tropandes sur la dynamique de la jachère dans les Andes (AME 6). Pour évaluer la production de biomasse au cours de la jachère, Y. Martineau et B. Saugier (2003, 2006) se sont limités à analyser l'interception du rayonnement solaire suivant des strates végétales verticales (surfaces foliaires classées suivant des intervalles de hauteur le long des tiges), qui prend en compte indirectement la densité des tiges, mais pas leur position à la surface du sol (coordonnées  $x, y$ ). Dans le même projet, M. Pansu (AME 6) utilise des modèles à compartiments de l'agrosystème « jachère-pomme de terre » pour suivre les flux de matière organique entrant dans le sol et les flux d'azote qui en sortent. Ces flux ne sont pas spatialisés; ils sont mesurés ou

évalués entre les compartiments du sol. La nécessité de spatialisation n'apparaît qu'en introduisant l'exploitation agricole, son assolement, le système de culture et la parcelle, son état initial et le bilan azoté qui peut être calculé, à ce niveau, en fin de cycle jachère-pomme de terre (Hervé, AME 6).

Dans une session consacrée au domaine marin (AME 16), C. Mullon propose d'évaluer des populations de proies-prédateurs et les détritiques produits par ces populations de poissons, avec un modèle en compartiments dans lequel ces populations ne sont pas spatialisées. Par contre, une spatialisation s'impose dans l'étude des zones marines protégées, mais J.-L. Doyen (AME 16) les formalise sans les localiser en distinguant simplement l'aire protégée (AP) et le reste du domaine (1-AP).

De manière plus générale, dans des modèles à compartiments, les flux ne sont ni spatialisés ni localisés. Le système est décrit avec des équations différentielles; lorsque le système est à l'équilibre, la somme des flux entrant dans un compartiment doit être égale à la somme des flux sortant, le bilan net de chaque compartiment est donc nul (Coquillard et Hill, 1997).

Concernant les retenues d'eau et réseaux d'irrigation, les modèles hydrologiques ne sont pas nécessairement spatialisés lorsqu'ils se limitent aux flux (par exemple, Le Goulven et Barreteau, AME 2). La spatialisation s'impose lorsque l'espace hydraulique représente un enjeu multiple (AME 7): N. Franchesquin explicite les affectations d'espaces de la Camargue à des usagers bien identifiés (pêcheurs, défenseurs de la nature, riziculteurs); S. Duvaill s'appuie sur un SIG et un modèle numérique de terrain sur le delta du fleuve Sénégal côté mauritanien pour suivre les zones inondées et leurs usages par les troupeaux bovins, les cueilleuses de roseau (*Sporobolus robustus*) et les oiseaux piscivores. De la même façon Y. Poncet, C. Mullon et M. Kuper (2002) avaient analysé les usages temporaires d'espaces du delta intérieur du fleuve Niger au Mali, selon leur niveau d'inondation, à l'aide d'un modèle multi-agents.

Dans le cas de la recherche d'unités spatiales qui englobent à la fois des ressources et des acteurs ou activités, c'est-à-dire des usages multiples, la spatialisation s'impose car elle est alors au cœur de la problématique. Il peut apparaître dans cet exercice de spatialisation des difficultés d'adéquation entre espaces, ressources et acteurs (Biarnes *et al.*, AME 18; Benoît, AME 20; Loireau *et al.*, AME 21). C'est le problème que rencontrent également A. Johannon et V. Souchère (AME 18) lorsqu'ils modélisent le ruissellement érosif dans un bassin versant agricole et l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur la concentration de ce ruissellement. Le phénomène érosif déborde en général un seul parcellaire d'exploitation et les parcellaires sont souvent à cheval sur plusieurs bassins versants. Mais les deux illustrations qui suivent montrent qu'il est possible de trouver des entités spatiales qui ont un sens à la fois pour l'environnement physique et pour les sociétés humaines.

Lorsque A. Biarnes, F. Colin et P. Rio (AME 18) analysent la pollution diffuse par herbicides dans un vignoble, ils identifient un bassin versant élémentaire de l'ordre du km<sup>2</sup>, à l'intérieur des limites de la commune, pour pouvoir intégrer l'hydrologie (distribution d'unités hydrologiques), l'agronomie (distribution des

pratiques) et l'économie (mécanismes d'échange des droits à polluer). Cette taille de bassin versant élémentaire permet également de réunir un nombre suffisant d'acteurs pour négocier. Dans ce cas où le risque de pollution diffuse par herbicides est fonction de la circulation de l'eau (polluant en suspension dans l'eau), il est très difficile de déterminer des responsabilités individuelles parmi les viticulteurs (selon le principe du pollueur-payeur) si bien que l'on préfère définir des règles collectives « préventives » qui s'appliquent à tous les viticulteurs du bassin versant. Le bassin versant est une unité d'analyse adéquate pour une gestion agroécologique des risques de pollution mais sans doute pas pour une gestion socio-économique de cette pollution (retraitement des déchets).

Dans le réseau Rooselt de lutte contre la désertification en Afrique, M. Loireau *et al.* (AME 21) cherchent à mettre en relation des unités de recensement démographique et des unités spatiales pertinentes par rapport à des ressources fourragères pâturées ou des ressources ligneuses destinées au bois de feu. L'objectif est alors d'intégrer des données biophysiques (état des ressources et de l'écosystème) et des données socio-économiques (prélèvement de ressources pour plusieurs usages, agricole, pastoral, forestier, etc.) à travers une approche spatiale (ressources localisées).

#### Espace discret ou continu, confrontation des deux approches

Quand la spatialisation est considérée comme nécessaire, la question se pose de savoir comment représenter l'espace. Une première approche possible est celle de l'automate cellulaire. Une cellule d'un automate cellulaire représente une fraction élémentaire d'un plan (spatial discret), à laquelle on affecte une propriété, dépendante de l'état des cellules voisines. Cette cellule n'est pas repérée par des coordonnées mais elle est positionnée par rapport à ses voisines. Les relations de voisinage sont discrètes et dépendent de la forme géométrique de la cellule de base (3 à 8 côtés). La distance exprimée en nombre de cellules est alors également discrète. C'est le principe de la grille qui est utilisée dans la plupart des systèmes multi-agents et qui rend visible une représentation spatiale implicite; on ne se pose plus alors la question de savoir si une autre représentation est possible.

Dans ce champ spatial discret, l'écologue donne par exemple à une cellule la propriété de contenir une graine ou un arbre, ou encore une surface élémentaire avec une densité donnée d'arbres (Carrière, AME 1). La question posée par S. Carrière de savoir comment se régénère une forêt tropicale humide à partir d'arbres isolés dans des champs défrichés illustre clairement ces options de l'analyse spatiale. La pluie de graines, fonction de la distance à l'arbre émetteur, peut être représentée par un modèle spatial discret de type automate cellulaire, dans lequel la cellule est la graine (option peu praticable au vu de la quantité de données à recueillir) ou l'arbre (avec un modèle de population), ou encore la plus petite aire boisée (avec un modèle spatial). Le choix d'un automate cellulaire discrétise le processus de diffusion des graines. Cependant, des modèles de diffusion sont plus aisés à représenter dans des formalismes continus que dans des formalismes discrets.

Dans le cas d'une représentation continue de l'espace, le voisinage peut être représenté par un disque de rayon  $R$  et l'hétérogénéité de biomasse par une densité,

par exemple la densité de biomasse variable dans un couvert forestier (Treuil, AME 17). Le passage du discret au continu et la prise en compte de l'espace se traitent en mathématique : les équations différentielles ordinaires sont utilisées pour traiter de changements d'état continus (le temps est continu et l'espace n'est pas pris en compte) alors que des équations différentielles partielles permettent d'intégrer l'espace. À Madagascar, J.-P. Treuil et D. Hervé (AME 17) ont montré que les deux approches étaient possibles, continues et discrètes, sur la même problématique de la déforestation par abattis-brûlis, en construisant en parallèle un système multi-agents sur un espace discrétisé et un modèle mathématique sur un espace continu.

### Agrégation d'entités spatiales et changement d'échelle

Les recherches sur la jachère dans les Andes (Hervé, AME 6 et AME 13) illustrent les relations entre agrégation d'entités spatiales et changement d'échelle. Dans les travaux sur la dynamique de l'usage des terres, on descend rarement jusqu'au niveau de la parcelle comme unité spatiale élémentaire. Comment passe-t-on du changement d'usage d'une parcelle (changement individuel réalisé par un agriculteur) au changement d'usage constaté plus globalement sur l'ensemble d'un territoire villageois ? Pour répondre à cette question, il apparaît utile de définir des « espaces intermédiaires » entre l'échelle de la parcelle, celle du parcellaire d'exploitation et celle du territoire villageois, espaces que nous appelons terroir, dans son acceptation agronomique, ou zone de production (Hervé, 1984), ou unité agro-physionomique (Deffontaines et Thion, 2001). Chaque territoire villageois peut alors être représenté comme une combinaison particulière de zones de production. Une typologie de ces villages, considérés comme des systèmes agraires homogènes, est alors possible jusqu'au niveau de la commune, le plus petit niveau administratif (Jouve et Tallec, 1994). Une telle démarche discrète permet de s'arrêter au niveau d'agrégation choisi et de distinguer des étapes dans le processus de changement d'échelle. Nous plaçons la limite supérieure de l'agrégation au niveau d'un espace géré localement, dans lequel s'appliquent des décisions individuelles et collectives. Au-delà s'ouvre un autre domaine, celui de l'aménagement du territoire : la décision publique s'applique selon une démarche descendante depuis les politiques nationales jusqu'aux unités administratives plus englobantes que sont le département ou la province.

L'expérience au Viêt-Nam de J.-C. Castilla (2004, AME 15) illustre comment la combinaison de démarches ascendantes et descendantes de diagnostic territorial peut apporter des éléments d'aide à la décision et des arguments de négociation pour des acteurs situés à différents niveaux hiérarchiques (Castilla *et al.*, 2007). À partir de règles décisionnelles identifiées au niveau de la famille-exploitation, le changement d'échelle du village à plusieurs villages et jusqu'à la province s'appuie sur une utilisation combinée d'outils de simulation : jeu de rôle et modèle multi-agents couplés à un système d'information géographique. La généralisation résulte de la réplcation d'un modèle sur tous les villages d'une région plutôt que d'un transfert d'échelle proprement dit. Si les dynamiques intra-villageoises de gestion des ressources sont explicitement prises en compte, les interactions entre villages ou les facteurs de changement qui interviennent aux niveaux supérieurs au village

(phénomènes de migration, nouvelles opportunités de marchés, développement d'infrastructures régionales, etc.) sont difficilement pris en compte par des démarches ascendantes. Des méthodes descendantes de modélisation des dynamiques d'usage des terres ont été combinées aux précédentes pour offrir aux décideurs politiques des outils qui répondent mieux à leurs besoins de planification et d'aménagement. Ils se sont alors prêtés plus volontiers aux exercices de simulation participative et à l'élaboration collective de scénarios exploratoires. L'utilisation conjointe des deux approches a facilité les allers-retours entre échelles en fonction des questions posées par les acteurs du développement local et régional.

### Choix de granularité temporelle

#### Plusieurs temporalités à prendre en compte

Tous les systèmes abordés au cours des sessions AME sont dynamiques, ils font appel à une horloge temporelle explicite ou à une succession d'événements. Dans la réalité, les temps sont multiples et continus, et il convient de les distinguer des temps virtuels et discrets de l'ordinateur et de la simulation.

Plusieurs temps sont à mettre en relation : le temps des dynamiques naturelles des ressources (naissance-croissance-mort, possibilité et vitesse de renouvellement à la suite d'un prélèvement, résilience) avec le temps des décisions (tactique, stratégique, patrimoniale), de la négociation (langage, communication, itération de l'échange de question et réponse jusqu'au conflit ou au consensus), et le temps de l'action (projet, réalisation, contrôle), qui vient après celui de la décision ou en décalage par rapport à ce dernier. Mais il existe aussi des temps collectifs, les temps des phénomènes sociaux.

Par un même pas de temps (durée de la plus petite unité de temps acceptable par tous) ou une même unité de temps ( $t$ , reconnue identique par tous), on peut heureusement relier linéairement des temporalités différentes. Mais le temps ne se résume pas à la seule variable  $t$ , abordée de façon discrète ou continue ; la variété des temporalités se décline aussi en termes de date et durée : date (temps situé), durée (temps écoulé entre deux dates), temps arrêté (temps écoulé jusqu'à une date), temps cumulé (comme l'âge), temps passé, temps mémorisé, mémoire ; et en termes de périodicité, ce qui est très important par rapport aux phénomènes que nous étudions, autant écologiques, biologiques qu'humains (fréquence et rythme, périodicité, cyclicité). Finalement la perception du temps n'est pas non plus unique et le temps des uns peut être différent du temps des autres. Par exemple, la perception par les forestiers du temps de croissance d'un peuplement de pins est bien différente de celle des éleveurs qui conduisent leurs troupeaux ovins sur le même causse où se côtoient pâturages et forêts (Étienne, AME 14). Comment rendre compte dans le modèle de ces tensions entre des perceptions différentes du temps ? E. Fianyo, J.-P. Treuil, E. Perrier et Y. Demazeau (1998) ont proposé de définir dans un modèle multi-agents une horloge différente pour chaque agent, mais cette distinction a considérablement alourdi le modèle.

Les relations entre synchronie et diachronie constituent sans doute le point le plus délicat, en tous les cas pour l'agronome. Nous en donnons trois illustrations :

- l'agronome qui étudie l'évolution de la fertilité des sols cherche, par des analyses d'échantillons, à comparer à un temps  $t$ , mais sur des lieux différents, des états du sol comparables mais ayant des dates de réalisation différentes sur une même trajectoire. L'hétérogénéité des lieux de collecte empêche en général de conclure sur les comparaisons ; ce qui nous ramène aux analyses diachroniques très rares à pouvoir être conduites sur une période de temps suffisamment longue ;
- par des typologies de systèmes de production, l'agronome cherche à comparer des états du système de production présents au même moment mais pouvant représenter des évolutions différenciées de stades passés de structures de production, repérables éventuellement sur des trajectoires d'évolution des exploitations ;
- les échanges entre plusieurs acteurs, omniprésents dans la gestion des ressources renouvelables, peuvent être traités dans la simultanéité (synchronie) ou dans la succession (diachronie), mais la question de l'ordre dans lequel ont lieu les prises de parole n'est peut-être pas anodine (Paz, 1997 et AME 13).

La recherche sur les transitions d'états des parcelles cultivées sur abattis-brûlis (Madagascar, AME 17 ; Viêt-Nam, AME 11) montre par exemple que l'histoire de la parcelle défrichée explique son état présent et que cette histoire est une succession d'états d'occupation du sol passés, chacun ayant sa propre durée (haricot : 3 mois, manioc : 2 ans, jachère arbustive : 5 ans, bananeraie : 10 ans, boisement de pins : 30 ans, forêt mature : 50 ans), soumis à des facteurs de changements d'état rapides comme le feu, le labour, la défriche, ou lents comme les dynamiques écologiques aboutissant aux jachères herbacées ou aux recrûs forestiers. La question est alors de savoir quelle temporalité prendre en compte pour décrire simplement (1) l'effet d'une histoire culturelle sur l'état d'une parcelle : l'état juste antérieur ( $A_{n-1}$ ), le nombre ou la durée des cycles culture-jachère, un effet cumulatif depuis le moment de la première défriche ; c'est le point de vue de l'agronome, et (2) l'impact de l'état de la parcelle mise en jachère sur les successions végétales post-culturelles ; c'est le point de vue de l'écologue. Les connaissances théoriques dans chaque discipline conduisent à préciser les mécanismes et processus que l'on cherche à modéliser, les hypothèses que l'on cherche à tester, et permettent donc de choisir la combinaison pertinente d'états passés (événements) et de durée de ces états (pas de temps) qui expliquera l'état actuel d'une parcelle.

### Temps long

Les temps de l'environnement qui nous sont familiers, en tant qu'agronomes, sont le temps répétitif (fréquence et enchaînement de décisions d'acteurs, itinéraire technique appliqué par un agriculteur sur sa parcelle), le temps cyclique (rotations culturales, saisonnalité des activités, cycle de vie de la famille, cycle de reproduction de l'exploitation). Comment passe-t-on du temps rond (cyclique) au temps long (linéaire) ?

C'est au-delà de la durée de vie de l'exploitant ou de celle de son exploitation que l'agronome situe le temps long, au-delà de 50 ans. Que signifie ce temps long

dans la gestion des ressources renouvelables? Le temps de reconstitution de la matière organique (stockage du carbone dans le sol) ou de régénération d'une forêt secondaire après culture sur brûlis? Du temps long, nous en avons une représentation limitée par les données spatiales disponibles (photos aériennes entre au moins deux dates, espacées donc de 10 à 50 ans au plus) ou par la fréquence des recensements de population (tous les 20 ans au mieux). Seuls les archives, les récits d'explorateurs et les recherches archéologiques peuvent nous renseigner sur des pas de temps encore plus longs, de l'ordre du siècle.

L'appréhension du temps long par l'agronome n'est pas de nature événementielle; elle repose sur la notion de trajectoire. Par l'histoire de vie de la famille, de l'exploitation agricole et de l'occupation du sol qui évolue dans le temps et qui combine des variables continues et des variables discrètes, on reconstitue des trajectoires d'évolution des exploitations familiales et de l'occupation du sol. Dans l'étude des transitions agraires, des agronomes comme J.-C. Castella (AME 11) étudient aux côtés de géographes les phénomènes de recomposition des systèmes agraires. Lorsqu'on aborde le temps long et que l'on se rapproche ainsi d'une dimension historique se pose à nouveau la question de la combinaison entre approche discrète et continue. L'histoire relatée comme une succession d'événements marquants n'est-elle pas faite d'évolutions et de ruptures, de crises et de transitions d'un système à un autre? Les approches rétrospectives cherchent à reconstituer la logique de ces mutations. En tous les cas, il semble difficile, sinon impossible, de les anticiper. Ces approches n'ont pas été abordées dans les sessions AME car elles n'ont, semble-t-il, pas donné lieu jusqu'à présent à des expériences de modélisation. Ces dernières sont en effet confrontées à la définition de règles de changement de règles qui limitent la représentation de phénomènes historiques. Peut-être est-ce là la marque d'un déficit théorique sur les mécanismes des dynamiques et des transitions agraires? (Jouve, communication personnelle). Par ailleurs, au sein des sciences sociales, l'anthropologie en particulier nie au modèle la capacité de prévoir l'avenir (AME 22) alors que l'économie et l'économétrie plus particulièrement réalisent des exercices de prospective, qui prennent la forme de simulations et de scénarios, sans pour autant prétendre à des prédictions déterministes.

La compréhension des successions d'états ou d'événements passés permet-elle de prédire des évolutions futures? Un modèle, pour être prédictif, doit d'abord être validé. En l'absence de validation, doit-on pour autant s'interdire d'envisager des scénarios prospectifs? Les systèmes multi-agents permettent justement d'explorer des futurs possibles sans être prédictifs. Plusieurs exemples de construction participative de scénarios à partir de jeux de rôle ont été présentés: J.-C. Castella (AME 11), M. Etienne (AME 14), S. Lardon (AME 21), mais ils ne présentent pas de valeur prédictive. Par contre ils deviennent des supports privilégiés d'aide à la décision et à la négociation environnementale en situation d'incertitude.

#### Temps discret et temps continu

Un important clivage entre les modèles présentés dépend du choix d'une certaine représentation du temps, entre le temps discret «  $t, t + 1$  » et le temps continu «  $dt$  »

des systèmes dynamiques, représenté par des équations différentielles. Les systèmes à états peuvent être à états discrets ou continus. Les automates cellulaires traitent l'espace et le temps comme des variables discrètes. Des équations différentielles traduisent des changements d'états typiquement continus. De nombreuses recherches portent sur la combinaison ou le couplage de représentations du temps continues et discrètes. Cette combinaison du continu et du discret est essentielle pour la gestion des ressources renouvelables car elle permet de relier une dynamique écologique (la multiplication d'une population ou la croissance d'un être vivant sont des processus généralement continus) et une dynamique d'exploitation (le prélèvement dans une population est un événement généralement discret).

Pour étudier l'épandage d'effluents d'élevage à La Réunion, F. Guérin et A. Helias (AME 3) proposent de combiner des variables discrètes et continues, F. Guérin par un système dynamique hybride, qui évolue dans le temps, et A. Helias par des automates temporisés qui combinent dates et durées, ce qui semble particulièrement adapté pour représenter des systèmes de culture. Cette approche est utilisée pour représenter comment une opération culturale, qui a elle-même une durée (celle du chantier de sa réalisation), fait passer une parcelle d'un état (cultivé) à un autre état (jachère) : la fin de l'opération culturale « récolte » envoie un signal indiquant que la surface correspondante est libre pour l'épandage de lisier ou l'installation de la culture suivante. C'est le même raisonnement pour une succession de cultures : des états cultivés qui durent et des changements d'états plus brefs même s'ils ont leur propre durée (récolte, semis). La combinaison des temps continu et discret peut se faire par des graphes reliant des événements entre eux, chronologiquement (en suivant une séquence). On rejoint l'idée antérieure de transition d'états, mais en passant d'une séquence d'états à une séquence d'événements.

### Temps des simulations

Les simulations purement discrètes, déterministes ou stochastiques, permettent de faire évoluer le système réel au cours du temps de manière discrète (Coquillard et Hill, 1997). Les techniques de simulation discrète permettent de développer des modèles en s'abstenant d'utiliser des formalismes mathématiques lourds. À chaque pas de temps le fonctionnement du système est décrit sous forme d'un algorithme exécutable sur un ordinateur.

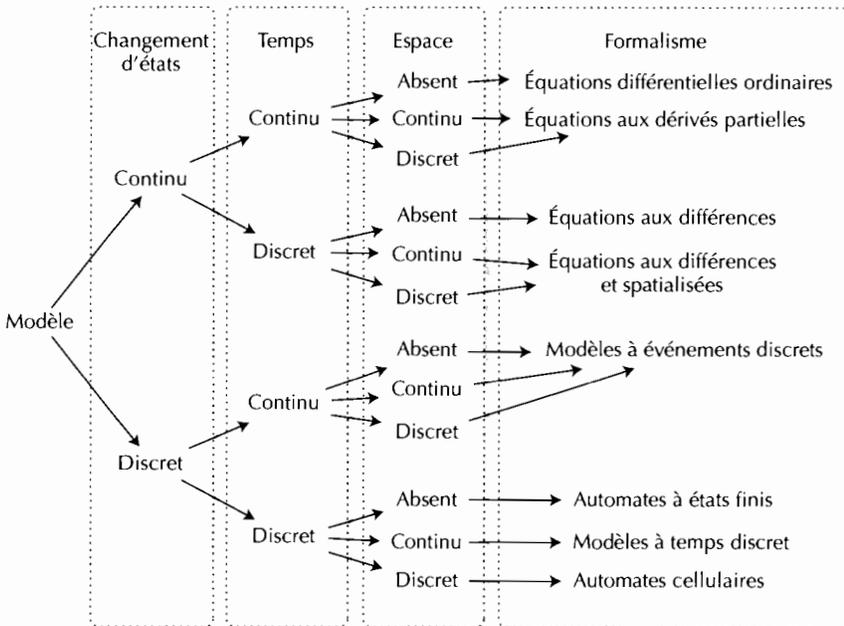
La notion d'« événement discret » permet ainsi à B. P. Zeigler (1984) d'unifier des formalismes discrets et continus. Des changements d'états sont observés entre des entrées X (liste des événements possibles) et des sorties Y (liste des événements générés par le modèle). Dans la fonction de sortie du système, le graphe de changement d'état est déclenché par des événements. Dans une simulation à événements discrets, les variables suivies au cours du temps sont discrètes. On décrit les algorithmes d'occurrence d'événements ainsi que la nature des changements des variables d'état associées aux événements en respectant deux principes de construction : le futur ne peut influencer le passé, et le futur du système peut être déterminé à partir de son état présent et de son passé.

Le temps de la simulation est un temps virtuel. Soit la simulation est dirigée par une horloge (durée discrétisée en un certain nombre de pas de temps identiques), soit elle est dirigée par des événements dont les échelles de temps sont suffisamment proches. Si le rapport entre l'échelle de temps des occurrences d'événements et le pas de temps sélectionné est très variable, C. Mullon (AME 16) montre qu'il est préférable d'opter pour une gestion du temps dirigée par les événements. Le temps virtuel progresse alors d'une date d'occurrence d'événements à une autre. Il faut gérer un échéancier, avec pour chaque événement: la date d'occurrence, le type d'événement, l'activité de simulation associée (algorithme informatique).

On voit bien que le problème de modélisation est différent selon que l'on cherche à représenter des événements simultanés ou séquentiels.

**Articuler espace et temps**

En termes de formalisation, plusieurs types de modélisation spatio-temporelle ont été tentés, à partir de SIG et d'automates cellulaires ou de systèmes multi-agents (Treuil *et al.*, 2001). A. Franc (2001) illustre comment des modélisations mathématiques s'adaptent aux combinaisons d'espace et de temps et de variables discrètes ou continues. Les équations aux dérivées partielles s'appliquent lorsque ces trois unités sont continues. Lorsque l'espace est discret, on utilise des équations différentielles couplées. Lorsque seule la variable est continue, ce sont des fonctions couplées en réseau. Lorsque les trois unités sont discrètes, on utilise un réseau d'automates cellulaires pour représenter des acteurs se déplaçant dans l'espace à chaque pas de temps.



**Figure 1. Classification des formalismes de modélisation mathématique et de simulation informatique dans des systèmes dynamiques (Ramat, 2003).**

E. Ramat (2003) présente une synthèse des combinaisons possibles d'approches continues et discrètes pour représenter l'espace, le temps et des changements d'états, laquelle a le mérite de montrer comment cette combinaison du continu et du discret « commande » les formalismes de modèles mathématiques ou de simulations informatiques pour des systèmes dynamiques (*figure 1*). E. Ramat n'en reste pas à un arbre de décision pour choisir entre des modèles, puisqu'il propose aussi une multimodélisation combinant ou couplant des modèles éventuellement hétérogènes, principalement en écologie marine (2004, AME 17). Cependant P. Couty (1996) nous invite à la prudence :

Dans toute entreprise de modélisation, les matériaux employés – espace abstrait, temps logique – ne pourront pas être autre chose que des succédanés appauvris de leurs contreparties empiriques : espace concret, temps vécu.

Il convient donc de rester vigilant sur la place des modèles dans l'analyse de l'articulation de l'espace et du temps à l'interface entre natures et sociétés pour ne pas surinterpréter les résultats des simulations par rapport à une réalité qui échappe bien souvent à l'observation.

## ARTICULER L'ESPACE ET LE TEMPS À L'INTERFACE ENTRE NATURES ET SOCIÉTÉS

### Entre agents et acteurs

Nous avons jusqu'à présent évoqué les dimensions spatiales et temporelles de la gestion des ressources ; comment passer du lieu au territoire et de l'événement à l'histoire sans introduire explicitement les activités humaines et les dynamiques sociales ?

En termes de modélisation, quelles implications représente la prise en compte des acteurs ? Il faut d'abord être conscient du biais introduit par le terme d'« acteur », celui de traiter l'être humain avec un présupposé d'action, comme un individu agissant. Mais la prise en compte de l'acteur peut se faire à plusieurs niveaux, soit par l'activité, soit par l'effet des activités, soit enfin par la décision individuelle qui constitue un niveau de complexité plus élevé dont on n'a pas toujours besoin. C'est cependant l'approche que privilégient les agronomes dans l'analyse du fonctionnement des systèmes de production ou le diagnostic des systèmes de culture car elle introduit l'aide à la décision (E. Malézieux, G. Trébuil et M. Jaeger, 2001).

La métaphore sociale à laquelle on a recours plus ou moins implicitement est l'équivalence entre un individu, un acteur et un agent informatique. Introduire dans un modèle des agents représentant les acteurs demande donc à être justifié en fonction d'un objectif explicite. Le plus souvent il s'agit de la gestion intentionnelle ou non d'une ressource localisée, à laquelle sont associées des règles d'accès et d'usage. Il est intéressant de noter que de plus en plus de chercheurs se sont rapprochés de ce point de vue en partant justement des « acteurs » avant de détailler les « ressources », mais sans avoir recours aux concepts propres aux sciences sociales leur permettant de replacer cet individu « acteur individuel » dans son contexte social.

Un autre biais est l'individualisme méthodologique que l'on retrouve pointé ici et qui est classique dans les approches de l'exploitation familiale telles qu'ont pu les développer des agronomes.

Si le lieu est avant tout une position géographique et un nom sur une carte, l'agrégation de plusieurs lieux, dans des conditions bien particulières, peut former un paysage mais pas un territoire. Le territoire n'est pas qu'une somme de lieux. À la différence du paysage qui s'offre aux regards de l'observateur, le territoire est un espace borné, approprié par des acteurs. Par exemple, l'espace de vie d'un renard est un territoire car il est marqué (odorat) et défendu par rapport aux individus de la même espèce ou d'autres espèces. Le territoire serait donc un espace dont l'organisation et les limites sont déterminées au moins par une activité, donc un acteur.

L'homme gère son temps et modifie les dynamiques écologiques, mais il ne peut pas modifier le temps qui passe, ni revenir dans un état passé, le temps n'étant pas réversible. Par contre, il peut par ses choix accélérer ou modifier la vitesse de certains processus. L'homme qui gère l'espace, et des ressources dans cet espace, le modifie par une série d'aménagements. On peut donc traiter cet espace à la fois comme marqueur et comme résultat d'actions qu'il n'est peut-être pas nécessaire de désagréger. C'est bien ainsi que sont construits les modèles d'usage des terres (cartes, SMA, modèles statistiques). Le fait d'introduire le facteur humain nous amène à intégrer les dimensions spatiales et temporelles selon un troisième axe, mais le choix reste à faire de représenter soit des activités humaines, soit des acteurs individualisés.

On découvre en effet un nouveau gradient de granularité qui peut se décliner selon le niveau d'organisation retenu en : une activité, plusieurs activités, un acteur, un type d'acteurs (tous identiques), plusieurs acteurs (tous différents) qui décident individuellement (processus de décision individuelle), des acteurs qui décident différemment selon leur groupe d'appartenance (décision de groupe), des acteurs différents qui décident ensemble avec un certain degré de concertation (décision collective), plusieurs groupes d'acteurs en interaction (négociation entre les porte-parole de chaque groupe). La liste n'est sans doute pas exhaustive. Le choix de granularité dépend en grande partie de la manière de prendre en compte les interactions : décision individuelle avec ou sans échanges, conduisant à des programmes informatiques différents selon que l'on choisit un comportement des agents informatiques réactif, cognitif, autonome-décisionnel ou interactif. On s'inspire pour cela de l'éthologie animale (fourmis par exemple) et des travaux sur des ensembles de robots (Drogoul, Corbara et Fresneau, 1995). Comme le souligne C. Friedberg (AME 22), on est loin de prétendre ainsi représenter des bouts de sociétés ; peut-on d'ailleurs isoler l'individu de la société ou représenter la société comme un agrégat d'individus ?

Les sessions de l'AME illustrent quatre modalités de prise en compte des acteurs dans les modèles :

– acteurs cognitifs prenant des décisions, en interaction (dialogue, liens sociaux, échanges), donc au sein d'une société. Comme l'illustre M. Benoît (AME 20), les acteurs modifient un territoire pour préserver la ressource en eau et comme l'illustrent G. Abrami (AME 2) et M. Étienne (AME 14), ils se répartissent des rôles dans le partage de l'eau ou des ressources sylvo-pastorales ;

– acteurs réactifs, sans prétendre représenter les interactions sociales. C'est le cas des fronts pionniers amazoniens présenté par P. Bommel et J.-P. Muller (AME 15) et dans lequel on en reste à un seul type d'acteurs (tous sont considérés comme se comportant de manière identique).

Les systèmes multi-agents se prêtent bien à la prise en compte des acteurs selon ces deux premières modalités ;

– acteurs représentés indirectement par leurs activités et la pression d'exploitation qu'ils exercent sur les ressources (Loireau, AME 21 ; Joannon, AME 18 ; Laloë, AME 9 ; Mullon, AME 16).

– acteurs pris en compte simplement par l'impact de leurs activités ; on mesure l'impact de l'activité sans distinguer les individus ni l'activité elle-même. C'est le cas des relations forêt-savane étudiées par Favier (AME 17).

Dans ces deux derniers cas, les acteurs ne sont pas explicitement représentés.

On constate que les acteurs ne sont pas toujours représentés ou peuvent l'être de manière partielle dans la gestion des ressources et des écosystèmes marins (Laloë, AME 9), la gestion des systèmes irrigués (Le Goulven, AME 2) ou la gestion des composantes de la fertilité du sol (AME 6). Il est apparu que les démarches de modélisation présentées se situent résolument à l'interface entre nature et société et ne visent pas à représenter la société en tant que telle (Friedberg, AME 22). On peut cependant se questionner sur la place des sciences sociales dans ces démarches de modélisation portant sur l'accès, l'usage et la gestion des ressources naturelles renouvelables. Sont-elles associées, et à quel moment ou jusqu'à quelle étape, au processus de modélisation ? Nous reviendrons aux réflexions de P. Couty (1996) pour proposer que ce débat se poursuive :

[...] l'activité scientifique de représentation et de modélisation ne prend pas et ne peut pas prendre, en raison de sa nature même, l'orientation globalisante que paraît exiger une maîtrise croissante des grands équilibres homme-nature.

### **Entre paysage et territoire**

Deux raisons sont généralement invoquées pour proposer une représentation spatialisée des phénomènes étudiés : la spatialisation pour généraliser et la spatialisation pour valider.

Les choix de spatialisation doivent être rendus explicites : à partir de quand doit-on spatialiser, et en fonction de quel objectif ? À partir de quand doit-on localiser, et en fonction de quel objectif ? Que gagne-t-on et que perd-on dans chaque cas ? De plus, ces deux étapes n'exigent pas la même quantité de données. Si l'on fait le choix de spatialiser, on doit définir à quelles échelles, dans un espace continu (distance) ou discret (cellule), en 2D ou 3D suivant la ressource considérée. Une fois le modèle spatialisé, on peut généraliser en changeant d'échelle. Mais le modèle reste-t-il valide sur une aire de référence plus grande ? Un même modèle peut-il couvrir plusieurs échelles ? Le passage d'une granularité (résolution) à une autre ne modifie-t-il pas la structure du modèle ? En répondant à ces questions, on situe la spatialisation comme un outil de généralisation.

Une autre raison invoquée pour proposer une représentation spatialisée des phénomènes étudiés est la validation. Lorsque des processus locaux ont des impacts globaux et lorsque des règles établies au niveau de l'individu ont des répercussions au niveau d'entités paysagères, on peut valider ces modèles de processus par les motifs (*patterns*) que l'on espère retrouver au niveau englobant (Grimm *et al.*, 1996). Ainsi l'impact de décisions individuelles d'usage des terres peut apparaître dans des éléments relativement stables du paysage : c'est ce que montrent les représentations par chorèmes (Le Ber, AME 20) ou les paysages construits et transformés (Gaucherel, AME 17). C. Gaucherel montre comment construire un paysage virtuel en 3D selon des critères structurels prédéfinis et quels sont les moyens de modifier des unités spatiales, comme des parcelles agricoles, à la fois dans leur contenu (usage du sol) et dans leur forme et leurs limites (changement géométrique). Cette avancée méthodologique est à souligner pour ses possibles applications dans le suivi conjoint de dynamiques foncières et de dynamiques de production. Dans l'approche SAMBA (Castella, AME 11), la carte d'occupation du sol établie à partir de règles de décision des agriculteurs intégrées dans un algorithme informatique est validée à l'échelle du village en comparant des images satellites de dates différentes. La spatialisation peut être dans ce cas aussi un outil de validation.

Les deux cas antérieurs font référence au paysage que l'on analysera avec plusieurs niveaux de résolution car chaque acteur possède son propre point de vue du paysage dont il voit certains objets et pas d'autres selon son activité et ses objectifs. Les modélisations informatiques de type multi-agents sont mises en avant pour leur capacité à prendre en compte cette diversité de points de vue. Le territoire peut aussi être représenté explicitement. Dans le modèle FOREST (Treuil, AME 17), le territoire est approché indirectement par la pression d'exploitation : la dynamique aboutit à une saturation de l'espace, soit à des départs d'exploitants, soit à des arrivées de migrants. Pour N. Franchesquin (AME 7) le territoire est l'objet d'enjeux multiples pour plusieurs types d'exploitants ; chez S. Duval (AME 7), un même territoire assume plusieurs fonctions environnementales. Par contre S. Lardon (AME 21) fait référence à des lieux précis, constitutifs du territoire, grâce à des supports cartographiques, dans les projets négociés de territoire entre plusieurs acteurs.

### Entre événement et histoire

La prise en compte du temps obéit, selon les sessions AME, à deux grands courants : la représentation de systèmes dynamiques pour des situations homogènes et sans prise en compte explicite des acteurs et l'analyse de trajectoires et de transitions pour représenter des situations hétérogènes, en détaillant le statut de chaque acteur. C'est bien le continuum entre événement et histoire qui a été ainsi exploré. Deux cas illustrent de manière plus spécifique les interactions entre l'espace et le temps dans des contextes agricoles, la modélisation de la dynamique de la jachère dans les Andes (Hervé, AME 6) et la modélisation de l'utilisation du sol au Nord Viêt-Nam (Castella, AME 11).

Dans la session AME 6, une tentative de modélisation de la jachère dans les Andes utilise un système multi-agents pour représenter le fonctionnement d'une exploitation et d'un village (cas du village de Pumani). Le modèle PUMANI de fonctionnement d'une exploitation agropastorale bolivienne pendant un an est centré sur le déroulement du temps ; il n'était pas spatialisé, même s'il gérait des contraintes spatiales (Hervé, Genin et Migueis, 2002). Le modèle de fonctionnement d'une communauté villageoise sur la durée de la rotation communale (SIMANDES) était par contre spatialisé puisque l'histoire de la saturation de l'espace villageois était reconstituée par la succession des soles de culture et de jachère (Hervé *et al.*, 2003). Une approche plus exigeante en données n'a conduit à aucune modélisation informatique ; elle passait par l'établissement de la généalogie des familles (d'après des fiches d'état civil) localisées par la position de leurs maisons.

La question initiale était de savoir si une réduction de moitié de la durée de la jachère, telle qu'elle semblait se dessiner, allait conduire à un changement d'état du système agraire. Le système était-il en équilibre ? Assistait-on en direct à une transition, avec la réalisation d'un événement nouveau, le labour une même année de deux secteurs dont l'usage devait normalement se succéder dans le temps ? Seuls certains systèmes de production pouvaient s'adapter au doublement de la surface cultivable résultant de la fusion de deux soles à labourer. La durée de la jachère était fixée et stable depuis plusieurs générations. Il s'est avéré qu'en fait la contrainte temporelle de la durée de la jachère était contournée par des dynamiques spatiales ; le temps de la rotation est fixé et ne change pas car il est une référence symbolique et rituelle, et c'est l'espace qui devient une variable d'ajustement.

Au nord du Viêt-Nam, les réformes économiques engagées à la fin des années 1990 ont profondément modifié les rapports sociaux de production. Le processus de transformation d'une agriculture planifiée gérée par des coopératives à une petite agriculture familiale n'était pas écrit à l'avance. Il a été marqué par de nombreux tâtonnements, initiatives locales entérinées ou non par le pouvoir régional, expérimentations sur le mode « essais-erreurs » pour l'application des réformes foncières qui se sont succédé à un rythme soutenu. En l'absence de référentiel technique historiquement construit, les agriculteurs ont dû composer avec de nouveaux modes de production dans une situation de grande incertitude sur l'avenir. Les approches traditionnelles de modélisation étaient mal adaptées à des contextes en mutation rapide où les règles d'accès et d'usage des ressources sont en phase de recomposition. Pour accompagner les populations locales dans les transformations inévitables de leurs systèmes de production, J.-C. Castilla *et al.* (AME 11) ont développé une méthode de simulation participative fondée sur l'utilisation combinée d'un jeu de rôle, un modèle multi-agents et un système d'information géographique. L'exploration de scénarios d'évolution des modes de gestion des ressources naturelles et de leurs effets sur l'environnement a guidé les acteurs locaux dans leurs décisions et a été utilisée par les chercheurs comme un outil de diagnostic sur des dynamiques de changement rapide difficilement accessibles par d'autres méthodes.

Dans chacun de ces cas, l'approche de modélisation est spécifique, d'une part du contexte et pas seulement de la discipline, et d'autre part de la question posée, dont

la formulation se trouve elle-même plus ou moins aboutie. Il apparaît clairement que, selon l'objectif du projet de modélisation, la question posée et les données disponibles, plusieurs constructions de modèles sont possibles, intégrant espace, temps et acteurs à l'interface entre natures et sociétés. Du fait même de cette diversité, il est indispensable d'explicitier l'hypothèse résultant d'une construction théorique de l'objet à modéliser. Cet effort théorique préalable n'est pas toujours fait. Il en résulte un objectif flou et une difficulté de justifier les choix de modélisation effectués.

## CONCLUSIONS

Les chercheurs doivent faire l'effort d'explicitier ce qu'ils attendent de la modélisation afin d'être capable de mesurer *a posteriori* la distance entre l'état des connaissances avant et après la modélisation, et afin d'évaluer ce que la modélisation leur a apporté. Dans le cas des recherches finalisées, cet examen pourrait s'élargir aux retombées de la modélisation sur l'action et sur le « développement » ainsi engendrés. En l'absence d'une telle évaluation « convaincante », beaucoup de thématiciens ne reconnaissent dans la modélisation à l'interface entre natures et sociétés qu'un seul type d'utilité sociale, l'échange de points de vue et éventuellement une amorce de négociation.

Chaque outil a ses conditions d'application et ses domaines de validité. Étant donné les sensibilités et perceptions différentes des disciplines vis-à-vis de la modélisation (qui sont en train d'évoluer), une contrainte forte dans le choix des outils est de savoir *comment* implémenter le modèle choisi et *avec qui*. Cet aspect a été évoqué (AME 12, AME 22), mais il n'a pas été développé ici. Une fois clarifié l'objectif, non seulement le modèle mais également son processus de construction pourraient être évalués, pour savoir s'il est bien devenu un outil de recherche au service de la ou des disciplines thématiques impliquées dans son développement.

Nous avons repéré dans les sessions une différence de posture fondamentale entre, d'une part, une combinaison de dynamiques de ressources et de représentations spatiales avec des activités des acteurs et, d'autre part, une prise en compte des acteurs dès le début de l'analyse et l'étude de l'impact de leurs actions sur les ressources. La position et le statut des acteurs dans ces représentations et les débats qu'elles suscitent peuvent expliquer le chemin qui reste à parcourir pour traiter de l'interface entre natures et sociétés. Le débat reste largement ouvert pour savoir si ces démarches permettent de représenter des individus en société et si de telles représentations sont indispensables pour mieux comprendre les interactions entre natures et sociétés.

On se trouve sans doute mieux armé pour apprécier l'influence des acteurs sur l'espace (aménagement, usage du sol, construction d'un paysage), que sur le temps, c'est-à-dire sur la vitesse des processus (frein, accélération, contrôle). Cependant la question du développement durable nous interroge de manière insistante sur le temps long et sur les dynamiques de changement en nous incitant à réconcilier les temps des acteurs et des sociétés et ceux de l'environnement qui ne sont pas forcément compatibles.

Sur le plan de la modélisation, on assiste à deux types de rapprochements qui devraient être riches d'enseignements dans les années à venir : un rapprochement des démarches de modélisation discrètes et continues, qui ouvre des espaces de collaboration entre informaticiens et mathématiciens ; un rapprochement des sciences de l'information avec des disciplines thématiques, qui pourrait conduire à l'élaboration de nouveaux outils pour aborder des entités mixtes qui aient un sens autant pour les sciences physiques, biologiques et techniques que pour les sciences humaines et sociales.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRUÉ-PASTOR M., BERTRAND G., 2000. *Les temps de l'environnement. Paysage et environnement*, Toulouse, Presses Universitaires du Mirail-CNRS, 544 p.
- CASTELLA J.-C., TRAN NGOC TRUNG, BOISSAU S., 2005. Participatory simulation of land use changes in the Northern Mountains of Vietnam. The combined use of an agent-based model, a role playing game, and a geographic information system, *Ecology and Society*, vol. 10, n° 1, p. 27.
- CASTELLA J.C., KAM S. P., DANG DINH QUANG, VERBURG P.H., CHU THAI HOANH, 2007. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of Land Use/Cover Change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam, *Land Use Policy*, vol. 24, n° 3, p. 531-545.
- CHABOUD C., MULLON C., LALOË F., 2000. Introduction. Science, décisions et stratégies d'aménagement, in Y. GILLON, C. CHABOUD, J. BOUTRAIS, C. MULLON (éds), *Du bon usage des ressources renouvelables*, Latitudes 23, IRD, Paris, p. 285-291.
- COQUILLARD P., HILL D., 1997. *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Recherche en Écologie, Masson, 273 p.
- COUTY P., 1996. Environnement et développement : les limites de la science économique? In COUTY P., *Les apparences intelligibles. Une expérience d'économiste en Afrique*, Paris, *αp* éditions Arguments, p. 171-182.
- DEFFONTAINES J.-P., THINON P., 2001. Des entités spatiales significatives pour l'activité agricole et pour les enjeux environnementaux et paysagers : contribution à une agronomie du territoire, Inra, Paris, *Cahiers de l'environnement*, n° 44.
- DROGOU A., CORBARA B., FRESNEAU D., 1995. Manta: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ant Societies, in GILBERT N. et CONTE R. (éds), *Artificial Societies. The computer simulation of social life*, Londres, UCL Press.
- FIANYO E., TREUIL J.-P., PERRIER E., DEMAZEAU Y., 1998. *Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes: the representation of time. MABS'98. Multi agent systems and agent based simulation*, 4-6/07/98, Paris, Cité des Sciences, La Villette, Springer Verlag, Lecture Notes on Artificial Intelligence, 10 p.
- FRANC A., 2001. Formalisation mathématique des interactions spatiales, in Lena SANDERS (éd.), *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Hermes Science, chap. 9, p. 283-300.
- GRIMM V., FRANK K., JELTSCH F., BRANDL R., UCHMARSKI J., WISSEL C., 1996. Pattern-oriented modeling in population ecology, *The Science of the Total Environment*, n° 183, p. 151-166.
- HERVÉ D., 1984. « Zonas de producción y sistemas de cultivo en la cuenca alta del Cañete », in MALPARTIDA E., POUPON H. (éds), *Sistemas agrarios en el Perú*, 5-7/10/87, Lima, 1988, Unalm-Orstom, p. 329-347.

- HERVÉ D., GENIN D., MIGUEIS J., 2002. Modelling approach for analysis of agropastoral activity at the one-farm level, *Agricultural Systems*, 2002, vol. 71, n° 3, p. 187-206.
- HERVÉ D., PAZ B., MIGUEIS J., TREUIL J.-P., 2003. Introduction de la modélisation dans une recherche interdisciplinaire: état et gestion de la jachère dans les Andes, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 11, n° 3, p. 243-254.
- JOUBE P., TALLEC M., 1994. Une méthode d'étude des systèmes agraires par l'analyse de la diversité et de la dynamique des agrosystèmes villageois, *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n° 39, p. 43-59.
- MALÉZIEUX E., TRÉBUIL G., JAEGER M. (eds.), 2001. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Repères, Cirad-Inra, 447 p.
- MARTINEAU Y., SAUGIER B., 2006. Comportement contre-intuitif d'un modèle mécaniste de succession végétale, *C. R. Acad. Sciences, Biologies*, n° 329, p. 21-30.
- PAZ BETANCOURT B., 1997. *Un modèle multi-agents pour simuler les accords de réciprocité dans les Andes boliviennes*, thèse doctorale, université Claude Bernard Lyon 1, 206 p.
- PONCET Y., MULLON C., KUPER M., 2002. Organisation spatiale d'un écosystème exploité, description des choix spatiaux dans la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali, *L'Espace géographique*, t. 31, n° 2, p. 118-130.
- KUPER M., MULLON C., PONCET Y., BENGA E., 2002. Integrated modelling of the Niger river inland delta in Mali, *Ecological modelling*, n° 164, p. 83-98.
- RAMAT E., 2003. Contributions à la modélisation et la simulation des systèmes complexes, HDR, LIL, ULCO, décembre.
- TREUIL J.-P., MULLON C., PERRIER E., PIRON M., 2001. Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées, in Lena SANDERS (éd.), *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Hermes Science, chap. 7, p. 220-252.
- ZEIGLER B. P., 1984. *Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation*, London, Academic Press.

Castella Jean-Christophe, Hervé Dominique (2009)

Espaces, temps, acteurs : regards d'agronomes

In : Hervé Dominique (ed.), Laloë Francis (ed.), Jollivet M. (préf.). *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*. Versailles (FRA) ; Paris : Quae ; NSS, p. 93-111. (Indisciplines). AME : Atelier Modélisation Environnement

ISBN 978-2-7592-0314-7

ISSN 1772-4120