

Du lieu au territoire, de l'évènement à l'histoire

Dominique Hervé et Jean-Christophe Castella

Introduction

Modéliser la gestion des ressources naturelles, c'est représenter une gestion dynamique de ressources spatialisées, et donc réfléchir sur l'espace et le temps, d'où le titre de cette session : « Du lieu au territoire, de l'évènement à l'histoire ». Nous ne prétendons pas apporter un regard de géographe ou d'historien sur ces objets : lieu, territoire, évènement, histoire, mais nous retenons ce qui va être déterminant pour la modélisation, le passage du contextuel au général et du granulaire au continu.

Les auteurs de ce rapport sont agronomes et cette discipline les a rendu 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, puisque cette discipline traite de production agricole et de gestion de l'environnement, jusqu'au temps long de l'évaluation des effets cumulatifs. Les concepts de rotation appliqué aux systèmes de culture, d'assolement au système de production, jusqu'au territoire villageois, d'allotement au système d'élevage, la combinaison de méthodes d'analyse diachronique et synchronique, la dynamique des systèmes de production, situent précisément l'agronome à l'interface entre milieu et acteurs, entre nature et société.

Selon le type de ressource, les dynamiques peuvent être représentées comme des flux entre réservoirs, des déplacements d'individus d'une population donnée dans des plans (2D) ou dans des volumes (3D), 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. Dans un objectif de développement durable, le rythme de prélèvement des ressources ne doit pas dépasser leur capacité de renouvellement ; l'espace et le temps sont donc étroitement associés dans la gestion des ressources. Les positionnements du thématique et du modélisateur le long de ces deux gradients conditionnent fortement les choix d'outils de représentation et les 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 donne beaucoup d'importance au choix du modèle en fonction des questions posées. 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. Ainsi la représentation à la fois dynamique et spatiale peut poser des problèmes techniques et conceptuels que des modélisateurs et thématiques ont cherché à aborder conjointement au cours des sessions AME.

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. Nous analysons dans une seconde partie pourquoi la

prise en compte des acteurs est essentielle au passage du lieu au territoire et de l'évènement à l'histoire. Enfin, nous proposons des pistes de recherche pour combiner espace et temps à l'interface entre nature et société.

I - Les granularités de long des échelles d'espace et de temps

Les granularités de l'espace et du temps sont choisies selon les objectifs que l'on se donne et les capacités de mesure et d'observation.

Choix de granularité spatiale

Si l'espace est structurant, comment en tenir compte ou le représenter explicitement ? Dans les modèles présentés au cours des sessions AME, l'espace est plus ou moins intégré, discret, continu ou absent. De plus la prise en compte de l'espace introduit la notion d'échelle et les problèmes du passage d'une échelle à l'autre.

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. Un point peut être spatialisé sans être localisé, c'est-à-dire 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 sont donnés dans la session 6 de l'AME sur le projet Tropandes. Par exemple pour évaluer la production de biomasse de la jachère, Martineau & Saugier 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).

Un autre exemple de non spatialisation est donné par les modèles à compartiments utilisés pour suivre les flux de matière organique ou d'azote dans le sol. Dans le couplage des modèles à compartiments de l'agro-système « jachère – pomme de terre » (Pansu, AME 6), les flux de matière organique en entrée et d'azote en sortie 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, et la parcelle, son état initial et le bilan azoté qui peut être calculé, à cette échelle, en fin de cycle jachère – pomme de terre (Hervé, AME 6).

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

Dans le domaine marin, l'évaluation des populations de proies-prédateurs et des détritus produits, proposée par Mullon (AME 16), n'est pas non plus spatialisée. Par contre, une spatialisation s'impose dans l'étude des zones marines protégées (Doyen, AME 16), même si elle est grossière. Concernant les retenues d'eau et réseaux d'irrigation, les modèles hydrologiques ne sont pas nécessairement

spatialisés lorsqu'ils se limitent aux flux (Le Goulven, Barreteau AME 2). La spatialisation s'impose lorsque l'espace représente un enjeu multiple : Franchesquin (AME 7) explicite les affectations d'espaces de la Camargue à des usagers bien identifiés ; Duvail (AME 7) s'appuie sur un SIG et un modèle numérique de terrain sur le delta du Sénégal côté mauritanien pour suivre les zones inondées.

Dans le cas de la recherche d'unités spatiales qui englobent à la fois des ressources et des acteurs ou des activités, la spatialisation non seulement s'impose mais elle est alors au cœur de la problématique. Cette difficulté de l'adéquation entre espaces, ressources et acteurs est une question soulevée dans plusieurs sessions (Biarnes et al., AME 18 ; Benoît, AME 20 ; Loireau, AME 21).

- Ainsi Biarnes et al. ont analysé la pollution par herbicides dans un vignoble. Ils ont identifié un bassin versant élémentaire de l'ordre du km², dont le grain est plus fin que celui 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, le risque de pollution diffuse par herbicide est fonction de la circulation de l'eau (polluant en suspension dans l'eau) et il est très difficile de déterminer des responsabilités individuelles de viticulteurs.

- Dans le réseau Roselt de lutte contre la désertification en Afrique, 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 spatialisées (écosystème, état des ressources) et des données socio-économiques (prélèvement de ressources pour plusieurs usages, agricole, pastoral, forestier etc.).

Espace discret ou continu, confrontation des deux approches

Une cellule d'un automate cellulaire représente une fraction élémentaire d'un plan, à laquelle on affecte une propriété, comme celle de contenir une graine ou un arbre ou encore une surface élémentaire avec une densité donnée d'arbres (Carrière, AME 1). 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 est alors également discrète, exprimée en nombre de cellules. C'est le principe de la grille qui est utilisée dans la plupart des systèmes multi-agents présentés au cours de l'AME.

Dans le cas d'une représentation continue de l'espace, le voisinage peut être représenté par un disque de rayon R. L'hétérogénéité de biomasse peut être représentée par une densité, par exemple la densité de biomasse variable dans un couvert forestier (Treuil et al., AME 17). Des changements d'état continus (le temps est continu et l'espace n'est pas pris en compte), conduisent à des équations différentielles ordinaires. Dès que l'on intègre l'espace, on passe à des équations différentielles partielles. A Madagascar, Treuil et Hervé (AME 17) ont tenté les deux approches, continues et discrètes, sur la même problématique de la déforestation par abattis-brûlis, en construisant en parallèle un système multi-agent sur un espace discrétisé et un modèle mathématique sur un espace continu.

La question posée par Carrière (AME 1) de comment se régénère une forêt tropicale humide à partir d'arbres isolés dans des champs défrichés, introduit clairement une dimension spatiale. Elle peut se traiter de deux manières différentes. La pluie de graines est fonction de la distance à l'arbre émetteur ; elle peut être représentée par un modèle spatial discret de type automate cellulaire, dans lequel la cellule est la graine (option peu praticable au vue des données à recueillir) ou l'arbre (avec un modèle de population) ou encore la plus petite aire boisée (avec un modèle spatial). Des modèles de diffusion sont plus aisés à représenter dans des formalismes continus que dans des formalismes discrets. Un parallèle peut être fait avec le domaine marin pour lequel une combinaison d'approche continue et discrète est envisagée en écologie marine (Ramat, AME 17).

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 individuel d'usage d'une parcelle au changement d'usage d'une zone de production constaté plus globalement? Il apparaît utile de définir des espaces intermédiaires, que nous appellerons « zones de production » entre l'échelle de la parcelle ou du parcellaire d'exploitation et celle du territoire villageois. Chaque village peut alors être représenté comme une combinaison particulière de zones de production. Des villages peuvent être regroupés en systèmes agraires homogènes jusqu'au niveau de la commune qui constitue souvent le premier échelon administratif. La procédure d'agrégation s'appuie sur des typologies et des regroupements d'unités du même type (zones de production, village) ; 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. La limite supérieure de l'agrégation constitue un espace géré, dans lequel s'appliquent des décisions individuelle et collective. Au-delà, les décisions publiques d'aménagement du territoire s'appliquent à des unités administratives plus englobantes du département ou de la province. L'expérience au Vietnam de Castella (AME 15) illustre comment le modèle peut être utilisé pour généraliser et changer d'échelle : à partir de règles décisionnelles identifiées au niveau de la famille-exploitation, la généralisation au village, puis à plusieurs villages et jusqu'à la province s'appuie sur une utilisation combinée d'outils de simulation : jeu de rôles et modèle multi-agents couplés à un système d'information géographique.

Choix de granularité temporelle

Plusieurs temporalités à prendre en compte

Tous les systèmes abordés au cours de l'AME sont dynamiques, ils font appel à une horloge explicite ou non. 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, avec le temps des décisions (tactique, stratégique, patrimoniale), de la négociation (langage, communication, itération jusqu'au conflit ou au consensus), et le temps de l'action, qui peut être en décalage par rapport à celui de la décision. Au bout de cette chaîne, on est donc amené à prendre en compte 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 terme de : date (temps situé), durée (temps écoulé entre deux dates), temps arrêté (temps écoulé jusqu'à une date), temps passé, mémoire, temps cumulé, synchronie et diachronie. Ce dernier point est sans doute le plus délicat : par des analyses d'échantillons de sol, l'agronome cherche à comparer à un temps t , mais sur des lieux différents, des états de sol de dates différentes ; dans des typologies, il compare des états du système de production présents au même moment mais pouvant représenter des stades passés de l'évolution des structures de production ; dans tout échange entre plusieurs acteurs, omniprésent dans la gestion des ressources renouvelables, on a le choix de le traiter dans la simultanéité (synchronie) ou dans la succession (diachronie).

La recherche sur les transitions d'état des parcelles (Madagascar, AME 17 ou Vietnam, AME 11) montre que l'histoire de la parcelle explique son état présent et que cette histoire est la conséquence des états d'occupation du sol passés, chacun ayant sa propre durée (haricot : 3 mois, manioc : 3 ans, bananeraie : 10 ans, boisement de pins : 30 ans, forêt mature : 50 ans), avec des changements d'état

rapides : le feu, le labour, ou lents : jachères herbacées ou recrûs forestiers. La question est de savoir quelle temporalité prendre en compte pour décrire une histoire culturale : 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 ?

Temps discret et temps continu

Un important clivage entre les modèles présentés se situe entre le temps discret « $t, t+1$ » et le temps continu « dt » des systèmes dynamiques, représenté dans les 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. Une des principales limites à une approche dynamique est l'anisotropie, l'hétérogénéité du milieu. On ne sait étudier la dynamique que de phénomènes homogènes ou de phénomènes hétérogènes mais sur des plages homogènes.

De nombreuses recherches portent sur la combinaison ou le couplage de représentations du temps continues et discrètes. Guérin & Helias (AME 3) étudient l'épandage d'effluents d'élevage à La Réunion. Guérin propose un système dynamique hybride, qui évolue dans le temps et qui combine des variables continues et des variables discrètes. Helias (AME 3) propose une méthode originale, les automates temporisés, pour combiner dates et durées.

C'est cette possibilité qui 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 culture : 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 se fait par des graphes reliant des événements entre eux, chronologiquement (en suivant une séquence). On rejoint l'idée antérieure de transition d'états, mais on passe là d'une séquence d'états à une séquence d'événements.

Cette combinaison du continu et du discret est essentielle pour la gestion des ressources renouvelables car elle relie une dynamique écologique (multiplication d'une population ou croissance, des processus généralement continus) et une dynamique d'exploitation (prélèvement dans une population, c'est-à-dire un événement généralement discret). On la perçoit dans les tensions entre forestiers (forêts de pins) et éleveurs (pâturage ovin), chacun raisonnant selon sa propre perception du temps (Etienne, AME 14).

Temps des simulations (Coquillard et Hill, 1997 : 133-142).

Les simulations purement discrètes permettent de faire évoluer le système réel au cours du temps de manière discrète. On peut avoir des simulations discrètes déterministes et des simulations discrètes stochastiques. Les techniques de simulation discrète permettent de développer des modèles en s'abstenant d'utiliser des formalismes mathématiques lourds. A chaque pas de temps on décrit le fonctionnement du système sous forme d'un algorithme exécutable sur un ordinateur.

La notion d'« événement discret » permet ainsi à 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 problème de modélisation est différent selon que l'on cherche à représenter des événements simultanés ou séquentiels. 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, il est intéressant d'opter pour une gestion du temps dirigée par les événements (Mullon, AME 16). 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).

Temps prospectif

La question de la validation se pose dès que l'on cherche à prédire des évolutions futures. Par ailleurs, les sciences sociales et l'anthropologie nient au modèle la capacité de prévoir l'avenir. 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. Plusieurs exemples de construction participative de scénarios sur 10-50 ans ont été présentés au cours des sessions AME (Castella AME 11, Etienne AME 14, Lardon AME 21).

Temps long, celui de l'histoire

Les temps de l'environnement qui nous sont familiers, en tant qu'agronomes, sont le temps répétitif (enchaînement de décisions d'acteurs, itinéraire technique appliqué par un agriculteur sur sa parcelle), le temps cyclique (rotations culturales, saisonnalité des activités, cycles de reproduction de l'exploitation), le cycle de vie de la famille ou de l'exploitation. Comment passe-t-on du temps rond (cyclique) au temps long (linéaire) ? Un agriculteur verra dans sa vie active un nombre limité de cycles de rotation « cultures – jachère longue pâturée » de 13 ans, par exemple (Hervé, AME 6). C'est au-delà de sa durée de vie ou de celle de son exploitation que nous situons le temps long, au-delà de 50 ans donc ou à partir du siècle. Que signifie ce temps long dans la gestion des ressources renouvelables ? Reconstitution de la fertilité, d'un stock de carbone dans le sol, régénération d'une forêt secondaire après culture sur brûlis. Du temps long, nous 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. Mais l'étude des archives renseigne sur des pas de temps encore plus longs, de l'ordre du siècle.

Notre appréhension du temps long 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 ou des géographes étudient les phénomènes de recomposition des systèmes agraires (Castella, AME 11). Lorsqu'on touche au temps long et qu'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 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.

II - Articuler l'espace et le temps à l'interface entre natures et sociétés

L'introduction des acteurs humains

Est-ce que le lieu se réduit à sa position géographique et son nom sur une carte ? L'agrégation de plusieurs lieux peut former un paysage mais pas un territoire. A la différence du paysage qui s'offre aux regards de l'observateur, le territoire est un espace approprié par des acteurs et borné. Pour parler de territoire, il faut donc nécessairement introduire le facteur humain.

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 certains processus.

L'homme qui gère l'espace et des ressources sur cet espace, modifie cet espace par une série d'aménagements. On peut donc traiter cet espace comme marqueur et 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).

Dès que plusieurs personnes interagissent, on peut représenter ces échanges dans un système multi-agents en traitant les temporalités perçues différemment par chacun. C'est ce que proposent Fanyo et al. (1998) en définissant une horloge différente pour chaque agent. La pluralité des temps des acteurs peut se traiter dans les SMA, mais le modèle devient vite assez lourd.

Le fait d'introduire le facteur humain nous amène donc à intégrer les dimensions spatiales et temporelles selon un troisième axe, celui des activités humaines ou des acteurs, individualisés comme tels.

On découvre un nouveau gradient de granularité : une activité, plusieurs activités, un acteur, un type d'acteur (tous identiques), plusieurs acteurs (tous différents), des acteurs qui décident individuellement, des acteurs qui décident différemment selon leur groupe d'appartenance, plusieurs groupes d'acteurs en interaction. Le choix de granularité dépendra en grande partie de la prise en compte des interactions : décision individuelle avec ou sans interactions, conduisant à des programmes informatiques différents selon que le comportement des agents informatiques sera réactif, cognitif, autonome-décisionnel, interactif. On s'inspire là de l'éthologie animale et des travaux sur des ensembles de robots mais on est loin de prétendre représenter des bouts de sociétés. Peut-on d'ailleurs isoler l'individu de la société ? Introduire avec l'acteur, la décision, c'est introduire un niveau de complexité plus élevé dont on n'a pas toujours besoin. La difficulté consiste à justifier la métaphore sociale utilisée plus ou moins implicitement. Introduire des agents représentant les acteurs dans un modèle demande donc à être justifié en fonction d'un objectif explicite.

Les sessions de l'AME illustrent quatre modalités d'introduction des acteurs :

1) Acteurs cognitifs prenant des décisions, en interaction (dialogue, liens sociaux, échanges), donc au sein d'une société.

Les acteurs modifient un territoire pour préserver la ressource en eau (Benoit, AME 18), et se répartissent des rôles dans le partage de l'eau (Abrami, AME 2) ou des ressources sylvo-pastorales (Etienne AME 14).

2) Acteurs réactifs, sans prétendre représenter les interactions sociales (fronts pionniers, Bommel & Muller AME 15).

Les systèmes multi-agents se prêtent bien à la prise en compte des acteurs selon ces modalités 1 et 2.

3) 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).

4) Acteurs pris en compte simplement par l'impact de leurs activités : Favier (forêt-savane, AME 17).

Dans les cas 3 et 4, les acteurs ne sont pas explicitement représentés.

On constate que les acteurs ne sont pas toujours représentés ou le sont de manière variable et souvent très 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).

Les démarches de modélisation présentées se situent résolument à l'interface entre nature et société et ne visent pas à présenter la société en tant que telle (Friedberg, AME 22). On peut cependant se questionner sur la place des sciences sociales dans ces démarches (Couty, 1996).

Les conséquences de ces choix de représentation sont importantes pour articuler l'espace et le temps, mais sont rarement contrôlées.

Transfert d'échelles et validation

Les choix de spatialisation doivent être rendus explicites : à partir de quand doit-on spatialiser et en fonction de quel objectif ? A partir de quand doit-on localiser les éléments de l'espace, et en fonction de quel objectif ? Que gagne-t-on et que perd-on avec chacune de ces options ? De plus, ces deux étapes n'exigent pas la même quantité de données. Si l'on fait le choix de spatialiser, on définira à quelles échelles et selon quel type de représentation spatiale, continu (distance) ou discret (cellule), en 2D ou 3D suivant la ressource considérée. Une fois le modèle spatialisé, on pourra généraliser en changeant d'échelle. La spatialisation constitue alors une condition de la généralisation. Mais le modèle reste-t-il valide pour 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 ?

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 pourra valider ces modèles de processus par les motifs (*patterns*) que l'on espère retrouver au niveau englobant. Ainsi l'impact de décisions individuelles d'usage des terres peut apparaître dans des éléments relativement stables du paysage, qu'il s'agisse de chorèmes (Le Ber, AME 20) ou de paysage construit et transformé (Gaucherel, AME 17). Gaucherel (AME 17) montre comment construire un paysage virtuel en 3D 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 le modèle Samba (Castella, AME 11), la carte d'occupation du sol est établie à partir de règles de décision des exploitations, puis validée à l'échelle du village à l'aide d'images satellites. La spatialisation est dans ce cas aussi un outil de validation.

Les deux cas antérieurs font référence à l'espace et non au territoire. Dans le modèle Forest (Treuil, AME 17), le territoire est approché indirectement par la pression d'exploitation : dynamique aboutis-

sant à une saturation de l'espace, et soit à des départs d'exploitants, soit à des arrivées de migrants. Chez Francheskine (AME 7) le territoire est l'objet d'enjeux multiples pour plusieurs types d'exploitants ; chez Duval (AME 7), un même territoire assume plusieurs fonctions environnementales, mais dans aucun de ces deux cas il n'est fait référence à des lieux précis, constitutifs de ce territoire. Dans les projets négociés de territoire entre plusieurs acteurs (Lardon, AME 21), la référence à des lieux est possible et facilitée par l'utilisation de supports cartographiques.

Articulations entre l'espace et le temps

La prise en compte du temps obéit, selon les sessions, à deux grands courants : (1) la représentation de systèmes dynamiques pour des situations homogènes et sans prise en compte explicite des acteurs, (2) l'analyse des trajectoires et des transitions. C'est bien le continuum entre événement et histoire qui a été exploré. Les interactions entre l'espace et le temps sont traitées dans deux sessions, sur la modélisation de la dynamique de la jachère dans les Andes et de l'occupation du sol à Madagascar.

Dans la session AME 6 une tentative de modélisation de la jachère dans les Andes utilise un système multi-agent pour représenter le fonctionnement d'une exploitation et d'un village.

Le modèle Pumani de fonctionnement d'une exploitation agro-pastorale bolivienne pendant un an est centré sur le déroulement du temps ; il n'était pas spatialisé même s'il gérait des contraintes spatiales. Le modèle Simandes de fonctionnement d'une communauté villageoise durant la durée de la rotation communale 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. Une approche plus granulaire, très exigeante en données (fiches d'état civil et localisation des maisonnées), passait par l'établissement de la généalogie des familles localisées par la position de leurs maisonnées ; elle n'a conduit à aucune modélisation informatique.

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 ? stable ? 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 est fixe et c'est l'espace qui varie.

La dynamique de l'occupation du sol est abordée à Madagascar sur le thème de la conservation de la forêt (Treuil AME 17). On cherche à expliquer la dynamique de la déforestation par le peuplement en forêt depuis les bas-fonds aménageables en rizières dans un corridor forestier du centre Est malgache. Un modèle en réseau (corridor) constitué de nœuds (villages) permet de spatialiser des scénarios de croissance démographique et de réfléchir ainsi à l'évolution des massifs forestiers. On se pose là encore la question de l'équilibre ou non du système et des conditions de sa transition, puisqu'il semble qu'on se rapproche d'un seuil : la saturation des bas-fonds aménageables.

En termes de formalisation, plusieurs types de modélisation spatio-temporelles ont été tentés, à partir de SIG et d'automates cellulaires, de systèmes multi-agents (Treuil et al., 2001) ou de modèles mathématiques (Franc, 2001). Les modélisations mathématiques s'appliquent aux combinaisons d'espace, temps et variable, discrets ou continus. Les équations aux dérivées partielles s'appliquent

lorsque les 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.

III - Conclusions

Il apparaît clairement que, selon l'objectif du modèle, la question posée et les données disponibles, plusieurs modèles sont possibles intégrant espace et temps à l'interface entre natures et sociétés. Du fait même de cette diversité, il est indispensable d'explicitier les choix de modélisation effectués. A cette condition, le modèle et sa construction constituent un outil de recherche au service de la ou des disciplines thématiques associées. La question reste de savoir quand et à quelles conditions peut-on combiner des représentations spatiales et des dynamiques des ressources avec des activités des acteurs ? Il semble que les acteurs puissent modifier plus facilement l'espace (aménagement, usage du sol, construction d'un paysage), que le temps, c'est-à-dire la vitesse des processus (frein, contrôle). La question du développement durable pousse à réconcilier les temps des acteurs et des sociétés et ceux de l'environnement qui ne sont pas forcément compatibles et à réintroduire le temps long dans l'analyse des dynamiques. On assiste par ailleurs à un rapprochement des démarches de modélisation discrètes et continues, qui ouvre des espaces de collaboration entre informaticiens et mathématiciens, et qui devrait être riche d'enseignements dans les années à venir.

Références bibliographiques

- Barrué-Pastor M., Bertrand G., 2000. Les temps de l'environnement. Paysage et environnement, Presses Universitaires du Mirail, CNRS, 544 p.
- Coquillard P., Hill D., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Recherche en Ecologie, Masson, 273 p.
- Couty, P., 1996. Similitudes, simulacres et absences, in Couty, P., Les apparences intelligibles. Une expérience d'économiste en Afrique, Paris, éditions ARGUMENTS : 217-244.
- 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, 2001. Formalisation mathématique des interactions spatiales. In Lena Sanders (dir.) : « Modèles en analyse spatiale », Paris, Hermes Science, Chap. 9 : 283-300.
- Treuil J.P., Mullon C., Perrier E., Piron M., 2001. Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées. In Lena Sanders (dir.) : « Modèles en analyse spatiale », Paris, Hermes Science, Chap. 7 : 220-252.
- Zeigler B.P., 1984. Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation, London, Academic Press.

Hervé Dominique, Castella Jean-Christophe.

Du lieu au territoire, de l'évènement à l'histoire.

In Modélisation à l'interface entre natures et sociétés :
journées 2005 de l'Association Natures Sciences
Sociétés-Dialogues : Colloque international.

Montpellier (FRA) : NSS : IRD, 2005, p. 44-53