

Chapitre 3

Des modèles pour partager des représentations

CHRISTOPHE LE PAGE, GÉRALDINE ABRAMI, OLIVIER BARRETEAU, NICOLAS BECU, PIERRE BOMMEL, AURÉLIE BOTTA, ANNE DRAY, CLAUDE MONTEIL, VÉRONIQUE SOUCHÈRE

La mise en œuvre d'une démarche de modélisation d'accompagnement se fonde sur un réseau composé d'individus et d'artefacts parmi lesquels les modèles occupent une place spéciale. Ce chapitre présente les différents modèles développés dans un processus ComMod à des fins de partage de représentations. Porteurs d'une forme de compréhension de systèmes réels (de référence) au sein desquels s'imbriquent dynamiques sociales et biophysiques, les modèles sont des représentations du fonctionnement de ces systèmes. À partir de ces modèles, sont organisés des exercices de simulation exploratoire en impliquant les acteurs du système de référence. Le premier chapitre a introduit les différentes finalités d'usage des modèles dans un processus de modélisation d'accompagnement :

- rendre visible des points de vue hétérogènes et les mettre en débat ;
- interroger la cohérence de ces points de vue et les conséquences de leur simulation conjointe par rapport au monde réel tel que vécu par les participants ;
- proposer un support pour explorer de manière collective des scénarios par des simulations sur un monde virtuel.

La traduction de multiples points de vue sur un système de référence dans des modèles peut prendre différentes voies. Elle s'appuie sur une conceptualisation du système étudié permettant de décrire la part de réalité perçue comme utile par chacun des acteurs, et aboutit au développement d'artefacts spécifiques, mobilisant des techniques informatiques et des techniques de mise en situation (jeu de rôles). Une brève introduction explicite le choix des systèmes multi-agents comme mode de représentation privilégié du domaine étudié. Différentes lignées de modèles sont présentées (modèles du domaine, modèles conceptuels, modèles de simulation) ainsi que les étapes d'extraction des connaissances et d'abstraction, de formalisation et conceptualisation et enfin d'implémentation. L'usage des modèles de simulation comme support à l'exploration de

scénarios est ensuite présenté avant de clore le chapitre sur une analyse de la singularité, de la complémentarité et de la polyvalence de ces modèles, caractéristiques qui autorisent une grande flexibilité dans la mise en œuvre de la modélisation d'accompagnement.

Choix des systèmes multi-agents pour décrire un domaine d'étude

Cette première section explique le choix des systèmes multi-agents comme principal mode de représentation d'un domaine étudié fondé sur les agents réels du système de référence. Le processus de traduction d'un modèle du domaine en un modèle exécutable (modèle de simulation), qui passe par le stade de modèle conceptuel, est ensuite présenté. Enfin, sont détaillés les éléments permettant de caractériser la diversité des modèles de simulation qui prennent soit la forme d'un simulateur purement informatique, soit celle d'un jeu de rôles mettant en situation des acteurs du domaine autour de supports de jeu concrets, ou bien apparaissent comme une combinaison de ces deux modalités extrêmes.

Modes de représentation de la réalité

Pour nous, un processus de modélisation est un processus d'écriture de connaissances et d'hypothèses hétérogènes qui sont distribuées dans un même artefact afin de les faire fonctionner ensemble. Ce processus est explicite et plus ou moins apte à prendre en charge des interactions non prévues. Adoptant une conception constructiviste des représentations (chapitre 1), nous nous limitons ici à des représentations visant à rendre compte d'un système donné, qui sont des perceptions (points de vue) de ce système souvent désigné comme étant « le monde réel ». Le représenter c'est faire des hypothèses sur ce qui semble le caractériser au mieux selon un objectif visé. Ce processus commence par un découpage en briques, qui sont ensuite assemblées pour mettre en interaction ces hypothèses, puis en proposer une reconstruction. Quelques modes de structuration possibles sont abordés, en détaillant un peu plus les systèmes multi-agents qui sont très fréquemment utilisés dans la démarche de modélisation d'accompagnement. Ces modes de structuration ne sont pas exclusifs et plusieurs travaux en cours cherchent à les utiliser de manière conjointe.

On pourra ainsi s'attacher à représenter des stocks et des flux entre ces stocks. C'est l'approche des systèmes dynamiques. Il s'agit de mettre en avant la régulation de ces flux, les possibilités de contrôle et d'action sur ceux-ci, et les éventuelles boucles de rétroaction. Le système est décrit par un ensemble de variables d'état (les stocks) et des équations décrivant leurs dynamiques (les flux). L'enjeu est d'identifier ce que ces stocks représentent par rapport au système : il s'agit souvent d'énergie, de biomasse, d'eau, d'unités monétaires... Ce mode de représentation n'est pas particulièrement explicite sur les acteurs liés à ces flux ni sur les conditions de leur intervention.

La théorie des jeux fournit un cadre visant à comprendre ces acteurs et à anticiper leurs choix, en identifiant leurs rationalités et leurs règles de décision de manière stratégique. Ce mode de représentation est statique : tous les scénarios d'interaction possibles doivent être prévus. Le système est représenté par un ensemble d'acteurs stratégiques ayant une fonction objectif sur ce système. La dynamique des ressources en lien avec ces interactions est généralement décrite de manière moins précise.

La description sous forme de systèmes multi-agents s'attache à concevoir des mondes virtuels visant explicitement à reconstruire des situations simplifiées mais néanmoins pertinentes vis-à-vis de la question traitée. Il s'agit alors d'identifier les agents essentiels (entités actives) qui jouent un rôle décisif dans la gestion du système, de préciser leurs entités de gestion, leur degré d'autonomie et leurs modalités d'interactions avec l'environnement et les autres agents. Ces entités peuvent aussi bien être des objets, des éléments de paysage, des individus ou des groupes d'individus (exploitation agricole, village, institutions, etc.).

Un système multi-agent s'entend donc ici comme une métaphore de la réalité (sociale, biologique et physique) sous la forme d'un ensemble d'entités autonomes en interaction situées dans un environnement, douées d'un objectif et ayant des représentations de leur environnement (Ferber, 1995). Il est à noter qu'ainsi défini comme mode de représentation, un système multi-agent ne fait pas référence à l'informatique, même de manière implicite. Dans notre champ d'application, les entités prennent des décisions en rapport avec des ressources. Elles interagissent donc à la fois avec le support des ressources et les autres entités décisionnelles avec lesquelles elles sont en relation. De nombreuses expériences ont montré que les systèmes multi-agents sont bien adaptés à la simulation dans le domaine de la gestion des ressources (Bousquet *et al.*, 1999).

De la réalité à sa représentation sous la forme de modèles de simulation

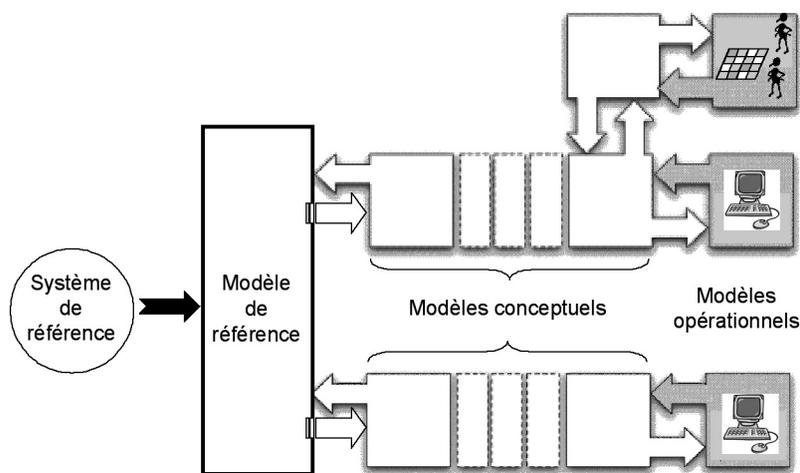
La modélisation d'accompagnement envisage le développement et l'usage des modèles – qui représentent une forme de compréhension d'un système de référence – comme un moyen de partage de représentations simplifiées de ce système. Les modèles sont dans leur immense majorité des modèles dynamiques, c'est-à-dire incluant explicitement des hypothèses et des règles liées à l'évolution dans le temps du système de référence. Le processus de modélisation aboutit à des outils concrets et opérationnels utilisés pour faire de la simulation. Cette dernière est une activité d'exploration qui permet, en donnant corps à des visions prospectives discutées et analysées collectivement, de raffiner les formes de compréhension du système de référence et d'en tirer des connaissances nouvelles. Le fait de donner collectivement à voir aux acteurs l'évolution progressive du système sous l'effet de conditions et de pratiques énoncées stimule en particulier leur capacité à appréhender les mécanismes des processus de décisions (les leurs mais aussi ceux des autres participants). En outre, en incitant à réfléchir sur les mécanismes responsables des données produites par les simulations, cette pratique contribue à rendre explicites certaines des hypothèses qui resteraient dissimulées au niveau d'un modèle conceptuel s'il n'était pas traduit en modèle opérationnel.

La chaîne de traduction du modèle de référence en un ou une famille de modèles opérationnels exécutables a été décrite dans la littérature (par exemple, Fishwick, 1998). Drogoul et ses collègues (2003) proposent une analyse détaillée de cette chaîne de traduction dans le cadre du processus de conception de modèles de simulation fondés sur des agents, en considérant les rôles de thématique, modélisateur et informaticien pour chacun des trois stades qu'ils décrivent. Le thématique définit le modèle du domaine en utilisant la sémantique qu'il associe au système de référence. Comme les spécifications du thématique ne permettent pas une transcription directe en un modèle exécutable, le modélisateur adapte le modèle du domaine en un modèle plus formel dit modèle de conception (ou modèle conceptuel) qui a pour but de clarifier les concepts utilisés, de vérifier la cohérence

et de supprimer les ambiguïtés potentielles. Le modèle conceptuel résulte d'un processus de coconstruction qui unit étroitement le thématicien et le modélisateur. Finalement, le modèle conceptuel pourra être transcrit par l'informaticien en un modèle opérationnel ou modèle de simulation. Cette étape est trop souvent négligée, ce qui compromet la possibilité d'identifier les effets numériques influençant les résultats de la simulation qui ne sont dus qu'aux seules modalités de traduction informatique du modèle conceptuel (voir plus loin « Implémentation : du modèle conceptuel au modèle de simulation »).

Alors que Drogoul et ses collègues argumentent en faveur d'une séparation claire des rôles de thématicien, modélisateur et informaticien – d'une part parce que chaque rôle demande des compétences particulières et d'autre part parce que la nécessité de transmettre des éléments entre porteurs de rôle pousse à les formuler de manière claire –, on constate fréquemment dans la pratique de la modélisation d'accompagnement un cumul des rôles. Ainsi le modélisateur assurera également la réalisation du modèle opérationnel, ou contribuera également à l'élaboration du modèle du domaine en apportant ses connaissances thématiques. L'avantage de ce cumul est une moindre perte dans la communication entre les rôles, une plus grande continuité dans l'interaction avec les thématiciens. Par ailleurs, la modélisation d'accompagnement ouvre de manière originale les rôles de thématicien et de modélisateur aux acteurs des systèmes représentés.

Présenté comme une succession d'étapes (chapitre 1), le processus de modélisation, focalisé sur le passage du modèle du domaine au modèle de simulation, apparaît implicitement linéaire. En marge du processus standard consistant à affiner un modèle conceptuel pendant un certain temps avant de passer à la phase de construction d'un modèle opérationnel (qu'on peut manipuler pour faire des simulations exploratoires) qui en soit une traduction directe et fidèle, la modélisation d'accompagnement s'attache à rendre possible et à faciliter les allers-retours entre le cadre de construction collective d'un modèle conceptuel non figé (une gamme de modèles conceptuels) et la constitution de lignées de modèles opérationnels (figure 3.1).



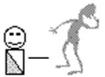
Chaque lignée aboutit à un modèle opérationnel : jeu de rôles ou modèle de simulation informatique.

Figure 3.1. Lignées de modèles initiées à partir d'un même système de référence (inspirée de Treuil *et al.*, 2008).

Des modèles de simulation fondés sur divers types d'agents

De fait, nos modèles conceptuels sont des systèmes multi-agents : ils représentent des entités en interaction. Au cours de la transformation d'un modèle conceptuel fondé sur le mode de représentation multi-agent en un modèle de simulation, on fait le choix implicite de traduire chaque entité conceptuelle décisionnelle en un agent, qui peut être classé selon la nature de ses décisions. Le tableau 3.1 regroupe les différents types d'agents qui ont été utilisés dans des processus ComMod.

Tableau 3.1. Types d'agent selon la répartition entre décision humaine et décision spécifiée informatiquement.

Nature de la décision	Humaine à 100 %		Intermédiaire	Informatique à 100 %
Typologie des agents modélisés	Agent humain : joueur	Agent composite simple	Agent composite hybride	Agent informatique : agent virtuel
				
	Pas d'avatar	Avatar non décisionnel	Avatar partiellement décisionnel	Avatar autonome

Lorsque toutes les décisions d'un agent sont prises par un être humain et qu'il n'y a pas de relais informatique, l'agent est de type agent humain (communément appelé joueur). Lorsque cette même décision est relayée par un avatar (représentant informatique d'un agent humain) sans aucune autonomie décisionnelle, on parlera d'agent composite simple. À l'opposé, lorsque la décision est intégralement prise en charge par l'avatar autonome (tous les processus de décision sont automatiquement réalisés par l'exécution d'instructions informatiques), on utilisera le terme d'agent informatique (ou virtuel). Le cas intermédiaire d'un agent humain relayé par un avatar partiellement décisionnel sera dénommé « agent composite hybride ».

La caractérisation d'un modèle de simulation fondé sur des agents requiert de considérer tous les agents qui le composent. On peut clairement distinguer deux grands types. D'un côté, on trouve les modèles de simulation exclusivement fondés sur des agents humains, communément appelés jeux de rôles. De l'autre, on trouve les modèles de simulation exclusivement basés sur des agents informatiques ou virtuels. Entre ces deux extrêmes, on trouve toute une gamme de situations dans lesquelles certaines décisions sont humaines, d'autres sont spécifiées informatiquement (figure 3.2). Le terme modèle de simulation à base d'agents hybrides (MAHy) regroupe l'ensemble de ces situations intermédiaires.

En marge de la spécification des décisions des agents virtuels, l'informatique est souvent un support efficace pour prendre en charge un certain nombre d'autres fonctions faisant sans ambiguïté partie intégrante du modèle conceptuel représentant le système sociale et écologique étudié. Le support informatique n'est alors qu'une composante du modèle de simulation (un des éléments caractérisant sa structure) et non un modèle informatique en lui-même. Les cinq principales fonctions de l'informatique dans les modèles de simulation fondés sur des agents sont les suivantes : 1) saisie des décisions

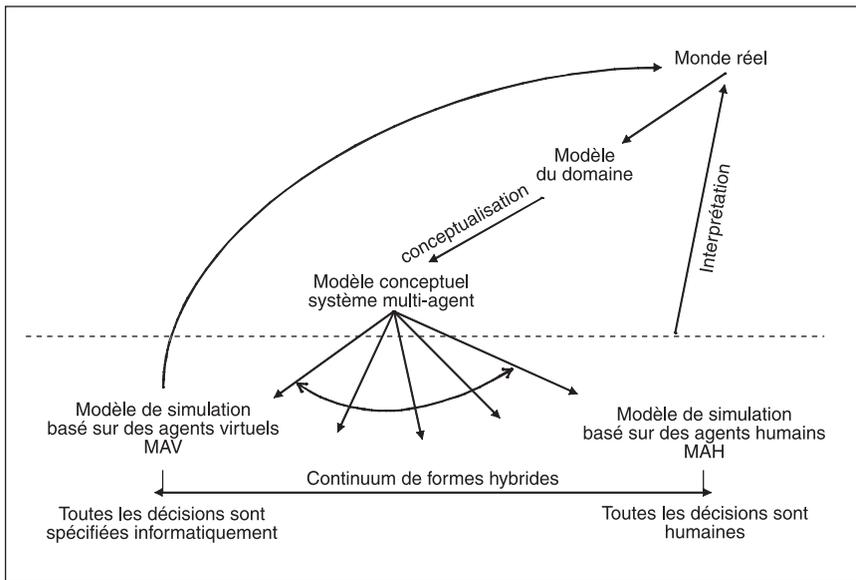


Figure 3.2. De la réalité à l'implémentation de modèles de simulation fondés sur des agents.

des agents humains ; 2) calcul d'indicateurs liés aux performances (actions) des agents ; 3) simulation de la dynamique de la ressource ; 4) visualisation de l'espace (état des ressources, positionnement des agents, éventuels points de vue sur cet espace spécifiques à chaque type d'agent) ; 5) spécification avec un langage informatique des décisions (comportements) d'agents.

Pour désigner les MAH faisant appel à au moins une des quatre premières fonctions informatiques listées ci-dessus, on utilisera le terme MiAH (qui correspond à ce qu'on appelle plus communément un « jeu de rôles informatisé »). On se propose par la suite de réserver le terme générique « jeu de rôles » à tous les modèles de simulation de type MAH, MiAH (pour ces deux catégories, toutes les décisions sont humaines) et MAHy (les décisions sont essentiellement des décisions humaines). À l'inverse, en considérant la dernière fonction relative à la spécification informatique de décisions comme déterminante, on classera les MAHy dans lesquels les décisions sont essentiellement spécifiées informatiquement avec les MAV dans la catégorie « modèle de simulation informatique ».

L'analyse des 63 modèles de simulation de nos cas d'étude montre d'une part que modèles de simulation informatique et jeux de rôles représentent une part équivalente, d'autre part que les jeux de rôles ont très fréquemment une forme de support informatique.

Dans la pratique, le caractère adaptatif d'un processus ComMod produit une grande diversité des modèles de simulation, pas seulement dans leur type mais également dans leur usage et dans leur mode d'association. À titre d'exemple, l'encadré 3.1 (voir page XX) détaille les différentes versions du modèle conçu et utilisé dans le cadre du cas d'étude de Nam Haen, en Thaïlande. Il arrive en effet fréquemment que non pas un seul mais une famille de modèles de simulation (faisant tous référence au même cadre

conceptuel) soient mobilisés. L'évolution des modèles et leur filiation sont schématisées dans la figure 3.1. Dans la dernière section de ce chapitre, nous reviendrons sur la diversité des modes d'imbrication et d'association de différents modèles, qui confère une grande flexibilité à la mise en œuvre des simulations exploratoires. Auparavant, nous allons détailler les processus d'abstraction et de conceptualisation, en présentant les méthodes et outils mobilisés pour chacun.

Extraction de connaissances et abstraction : du système de référence au modèle du domaine

En reprenant la terminologie de la section précédente, la première étape est l'identification des agents réels pertinents, c'est-à-dire la constitution du modèle du domaine. Cette étape consiste à mettre en commun les questions et les points de vue de l'ensemble des thématiques constitué par les chercheurs et acteurs impliqués dans cette étape de la modélisation d'accompagnement. Cette mise en commun implique un apprentissage mutuel sur les points de vue des autres et une évolution des questions.

Formulation d'une question et d'un cadre pour le processus de modélisation

Le travail commence par la formulation d'une question cadrant le point de vue dans lequel vont interagir les thématiques pour l'élaboration du modèle du domaine. Il y a là un cadrage, provenant des phases antérieures de la modélisation d'accompagnement : cycles de modélisation antérieurs, commande provenant d'une partie des acteurs du système, suggestion d'une question initiale par une partie des chercheurs. Le lancement du processus peut consister à recueillir l'impression globale des acteurs concernés invités à participer en utilisant une formulation générale : « que pensez-vous de tel aspect lié à telle ressource (à sa gestion) dans telle portion d'espace », par exemple : « que pensez-vous de l'évolution de la population de thons rouges en Méditerranée ». On peut s'attendre à ce que chaque réponse se réfère à un changement récemment observé (tendance ou événement) et dans le même temps corresponde à un angle de vue spécifique suggérant une forme d'appréciation de ce changement (par exemple : « l'espèce est en danger d'extinction », « les captures ont diminué lors des 5 dernières années »). En effet, pour certaines parties prenantes, cette évolution sera perçue négativement (par exemple les écologistes et les pêcheurs de thons) quand d'autres pourront au contraire la juger positive (par exemple les pêcheurs de sardines). La confrontation des différentes réponses permettra néanmoins de révéler, au-delà de l'expression de différentes sensibilités, un caractère commun (par exemple « l'abondance de la population diminue »). Le modèle s'envisage alors comme un moyen d'explorer les combinaisons de facteurs qui reproduisent cette caractéristique. On peut restreindre le cadre en ciblant précisément dès le départ certains facteurs (par exemple les outils classiques de régulation des pêcheries comme les quotas, les réserves), ce qui permet de justifier la non-prise en compte d'autres facteurs dont on sait pourtant qu'ils ont une influence dans la réalité (par exemple le changement climatique). « Toutes choses égales par ailleurs », ce qui importe est de disposer d'un moyen de comparaison des effets des facteurs choisis pour être spécifiquement explorés.

La première représentation du système de référence, appelée modèle du domaine, constitue un support permettant de recueillir et d'assembler les connaissances des thématiciens engagés dans le processus de modélisation. Faisant l'hypothèse qu'un thématicien exprime spontanément ses connaissances, en partie tacites, de manière désorganisée, il convient de mettre en œuvre des techniques permettant de les révéler, de les spécifier et de les rendre aussi explicites que possible, pour qu'elles puissent être formalisées au cours d'un processus associant un modélisateur. C'est ce qu'on appelle l'explicitation des connaissances, fondée sur les opérations d'extraction et de formalisation.

**Encadré 3.1 – Contexte de l'étude de cas.
La lignée des modèles du cas d'étude Nam Haen (Nord-Thaïlande).**

Dans la province de Nan, au Nord de la Thaïlande, le gouvernement souhaite conserver les ressources forestières dans les hauts de bassin versant en y établissant un Parc national. La délimitation des frontières du Parc provoquent de vives tensions entre les officiers des agences gouvernementales thaïes (Département des Forêts et Parc national) et deux communautés villageoises d'origine Mien qui craignent de se voir interdire l'accès aux terres et aux ressources forestières de cette zone. Les divers points de vue en présence ont été intégrés dans cinq versions d'une même représentation simplifiée du système étudié, dérivées les unes des autres, dont l'usage enchaîné permis de sceller une plate-forme de communication pour explorer et évaluer collectivement des scénarios pour le futur.

Les figures 3.3 et 3.4 présentent le processus et les modèles utilisés.

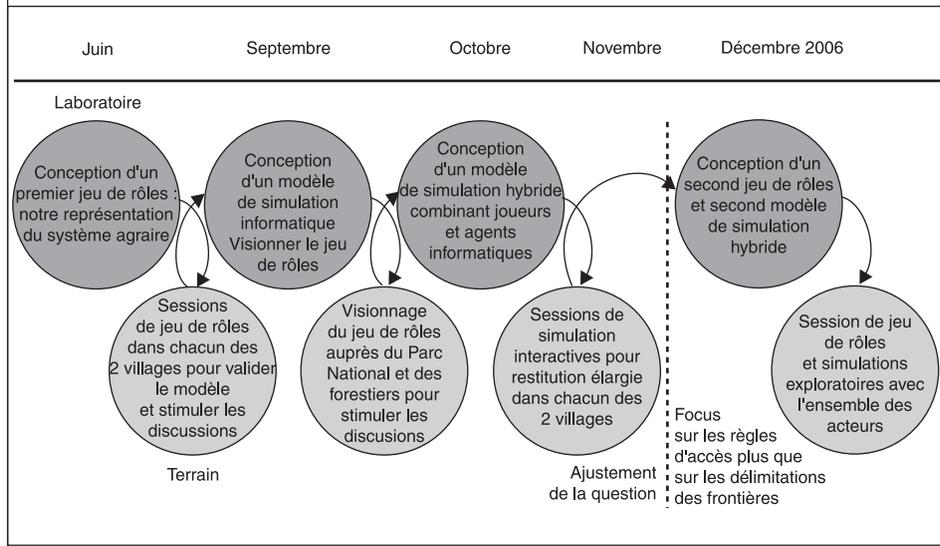
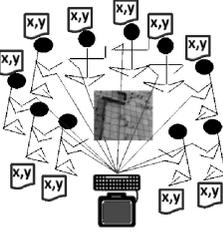
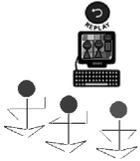
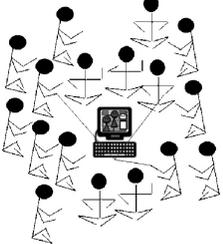
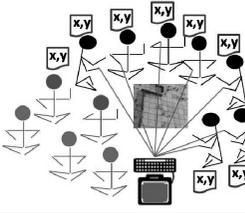
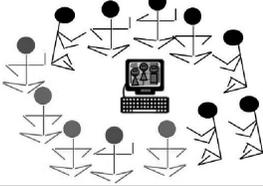


Figure 3.3. Les différentes étapes du processus.

Version (changements par rapport à la précédente version)	Objectif de l'atelier de simulation participative	Structure de l'atelier de simulation participative	Support informatique et ses fonctions*
Premier jeu de rôles (représentation du système agraire par l'équipe de recherche)	Dans chacun des deux villages, faire discuter 12 villageois qui jouent chacun leur propre rôle		Excel 1. oui 2. oui 3. non 4. non 5. non
« Visionnage » du premier JDR (les agents informatiques reproduisent les décisions des joueurs)	Montrer aux agents du Parc les principes et les résultats du jeu de rôles		Cormas 1. non 2. oui 3. oui 4. oui 5. oui
Simulation informatique hybride (simplification du choix des cultures pratiquées)	Dans chacun des 2 villages, élargir les discussions en utilisant le modèle devant une large audience (seuls 3 participants jouent leur propre rôle)		Cormas 1. oui 2. oui 3. oui 4. oui 5. oui
Second jeu de rôles (le plateau de jeu représente un espace élargi à l'ensemble des deux villages)	Associer l'ensemble des acteurs concernés pour définir collectivement les scénarios à explorer		Excel 1. oui 2. oui 3. non 4. non 5. non
Simulation informatique autonome	Explorer les scénarios identifiés avec l'ensemble des acteurs pour discuter de possibles orientations		Cormas 1. non 2. oui 3. oui 4. oui 5. oui

*Fonctions de l'informatique :

1. Saisie et enregistrement des décisions de joueurs
2. Calcul des indicateurs de performances des agents
3. Simulation de la dynamique des ressources
4. Visualisation de l'espace
5. Décisions des agents

Figure 3.4. Les différentes versions des modèles utilisés.

Explicitation des connaissances

Il existe de nombreuses techniques d'explicitation. On citera par exemple le suivi de processus pour lequel une personne, considérée comme experte dans un domaine particulier, est en situation de résolution de problème et explique à voix haute les actions qu'elle entreprend, ou encore l'analyse de transcriptions qui consiste en une analyse lexicale, d'un écrit ou d'une transcription d'entretien, permettant d'identifier et d'organiser l'ensemble des éléments constitutifs de la connaissance d'un domaine.

Appliquées à la modélisation d'accompagnement, les techniques d'explicitation offrent la possibilité d'identifier et de formaliser les connaissances des acteurs des systèmes représentés, leurs modes de raisonnement, leurs règles de décision ou leurs stratégies. Toutefois, ces techniques ont été élaborées pour une utilisation auprès d'experts, dans un environnement contrôlé, bien défini, proche de ce que l'on rencontre dans une expérimentation de laboratoire. Pour pouvoir transposer ces méthodes au contexte particulier de la modélisation d'accompagnement (environnement difficilement délimitable, incertain et fluctuant) nous avons développé nos propres techniques d'explicitation. Trois d'entre elles sont passées en revue.

Les techniques d'explicitation font parfois appel à des formalismes plus ou moins élaborés, et, dans ce cas-là, se réfèrent à des entités conceptuelles préconçues qui servent de « patron » à la formalisation, parfois collaborative, des connaissances. On considérera par la suite que le travail de conceptualisation s'attache à la conception de ces « patrons », alors que le travail d'abstraction et d'explicitation s'attache à leur « instanciation » (en ingénierie des connaissances, c'est la différence entre définir une ontologie et peupler une ontologie). Il n'est bien sûr pas toujours possible de discerner ces deux phases du travail de modélisation. Ainsi, dans un atelier collectif regroupant thématiciens et modélisateurs, où les entités conceptuelles ne sont pas totalement définies, conceptualisation et abstraction seront intimement mêlées, l'abstraction servant directement à tester la conceptualisation qui évolue donc en direct. La plupart du temps, les ateliers sont orientés vers l'une de ces deux options, parfois difficile à différencier comme dans la méthode ARDI – qui relève plutôt de l'explicitation.

Extraction des connaissances à partir d'une transcription d'entretien

Le principe de cette technique est d'effectuer dans un premier temps une série d'entretiens auprès d'acteurs dont on souhaite expliciter les connaissances, puis d'analyser la sémantique des transcriptions d'entretiens afin d'en extraire les objets élémentaires constituant leurs connaissances (individuelles ou collectives), et de reconstituer la logique d'ensemble de cette connaissance (ce que certains appellent le modèle cognitif), souvent sous la forme d'un diagramme mettant en relation des entités. Les deux phases, acquisition des *verbatim* lors d'entretiens et extraction des connaissances à partir de ces transcriptions, sont liées et d'importance équivalente.

Bien que l'acquisition soit délimitée à un sujet donné, par exemple la gestion collective de l'eau dans un périmètre irrigué, les interactions sociales et environnementales abordées sont telles qu'il est bien souvent impossible de prédéfinir avant l'entretien l'étendue du domaine qui sera traité. La technique de l'entretien ouvert, s'appuyant sur un guide d'entretien formé de questions neutres et ouvertes, est de ce fait la plus adéquate. En outre, la représentation d'un acteur et les actions qu'il entreprend sont dépendantes du contexte dans lequel il se trouve au moment où il l'exprime (Suchman,

1987). Pour pouvoir saisir la connaissance empirique d'un acteur, il est donc nécessaire de situer l'entretien dans son contexte d'action. Par exemple, pour identifier la représentation qu'un agriculteur a des systèmes de gestion de l'eau, l'entretien sera mené sur sa parcelle au moment où il est en train d'irriguer. L'entretien peut aussi se dérouler sur plusieurs lieux successivement, au cours d'une visite de terrain par exemple (Abel *et al.*, 1998). Selon cette même logique de prise en compte du contexte, il est recommandé de débiter l'entretien par des sujets relatifs aux activités ou aux événements en cours. Ainsi, si l'on souhaite identifier la représentation qu'un agriculteur a de son interaction avec l'environnement, l'entretien sera mené sur sa parcelle et débutera par des questions relatives à ses pratiques agricoles sur cette parcelle, avant d'aborder les liens qu'il perçoit entre ses pratiques et l'environnement. Enfin, la qualité de l'acquisition dépend de la conduite plus ou moins directive de l'entretien (mode conversationnel ou mode question-réponse) et de la relation de confiance entre enquêteur et enquêté. Les entretiens enregistrés sont ensuite transcrits mot à mot pour la phase d'extraction.

La phase d'extraction consiste à identifier dans la transcription et à enregistrer (en surlignant par exemple) tous les mots ou expressions sémantiques liés aux concepts se rapportant au domaine étudié. L'identification est ensuite répétée pour les autres types de connaissances, à savoir les processus, les règles et les relations. Afin de faciliter ce travail, des logiciels d'analyse lexicographique peuvent être utilisés (Dray *et al.*, 2006). Ces logiciels permettent la codification des expressions sémantiques et l'analyse des réseaux sémantiques, mais l'identification des concepts, règles et relations, ne peut en aucun cas être entièrement automatisée. Les résultats de la phase d'extraction sont dépendants des différents types (ou objets) de connaissances (Newell, 1982), que l'on choisit d'identifier. Différentes structures ou grilles d'extraction établissent la correspondance entre les objets de connaissances et des expressions sémantiques (le tableau 3.2 en est un exemple).

Tableau 3.2. Correspondances entre objets de connaissance et expressions sémantiques (Becu *et al.*, 2003).

Objets de connaissance	Expression sémantique
Concept (objet, personne...)	Équivalent à des noms : forestier, rivière, sol
Processus (opération, activité)	Construire une maison, pêcher la sardine
Attribut et valeur	Attribut : coût, âge ; Valeur : 120 kg, lourd
Règle	« Si..., alors... », « ... jusqu'à... »
Relation	Équivalent à des verbes passifs : « ...fait partie de ... »

Extraction des connaissances par des mises en situation

L'explicitation par mise en situation consiste à demander à un thématicien (qui est bien souvent acteur du système représenté dans le cadre des démarches de modélisation d'accompagnement) d'expliquer à voix haute les actions qu'il entreprendrait par rapport à différentes situations qui lui sont présentées. Cette technique permet d'expliciter les connaissances tacites de la personne en stimulant l'introspection, c'est-à-dire la capacité à rendre conscientes des zones de flou ou de dissonances entre émotions, pensées et actes – rendant ainsi plus cohérentes les représentations de la personne interrogée

(Ferber *et al.*, 2003). Différentes techniques de mise en situation sont utilisables (récit, diaporama, photos, jeu de rôles...).

Ainsi, la technique des *Playable Stories* (Becu *et al.*, 2005) utilise une mise en situation par le récit, qui est divisé en plusieurs temps reproduisant par exemple les différents moments du déroulement d'une saison de culture. À chaque temps, l'animateur décrit oralement le contexte de la situation (par exemple contexte économique, climatique et social d'une période de culture) et demande à son interlocuteur d'expliquer à voix haute les activités qu'il entreprendrait en fonction de ce contexte. La séance se poursuit en alternant description du contexte par l'animateur et description des activités entreprises par l'acteur. Dans cette technique, l'extraction des connaissances proprement dite (c'est-à-dire la transcription des expressions sémantiques en objets de connaissances) est réalisée de manière simultanée à la description par l'acteur des activités entreprises. Les informations extraites sont présentées à l'acteur soit sous forme de cartes sur lesquelles on inscrit par exemple le nom de l'entité ou du processus, soit sous forme de photos. Au fur et à mesure de la séance, l'acteur voit s'assembler les informations et se construire le modèle du domaine. Grâce à ce procédé, l'acteur peut intervenir directement sur la construction du modèle du domaine (pour l'enrichir ou corriger les interprétations faites de son discours), de la même manière que dans la construction participative de diagrammes.

Le jeu de rôles peut également servir à l'extraction de connaissances. L'acquisition passe alors par l'observation directe des comportements des joueurs au cours de la séance. Durant le jeu de rôles, des observateurs notent les différentes actions entreprises par les joueurs et la situation du jeu dans laquelle l'action a été entreprise. À cette étape, ce qui importe ce n'est pas d'extraire les connaissances des acteurs, mais d'observer leurs façons d'agir dans une situation donnée. Dans un deuxième temps, lors de débriefings individuels ou collectifs, les connaissances mobilisées par les acteurs pour entreprendre ces actions sont explicitées. Pour ce faire, on demande à chacun des joueurs d'expliquer pourquoi il a entrepris telle ou telle action dans le jeu et quelles informations il a utilisées pour prendre sa décision. De cette manière on stimule l'introspection de l'acteur et on parvient à expliciter les connaissances tacites mobilisées.

Extraction des connaissances par des constructions de diagrammes

Les connaissances que l'on cherche à extraire ne concernent pas que des objets de connaissances considérés séparément les uns des autres, elles se rapportent également aux connaissances sur les relations entre ces objets. Dessiner des diagrammes est à la fois un moyen d'explicitier ce type de connaissance sur la structure interactionnelle du système de référence et une première ébauche du modèle du domaine. Il nous semble en effet que le modèle du domaine correspond – à peu près – à ce premier stade d'abstraction qui peut être synthétisé sous la forme d'un simple schéma de type « entités et relations » sur lequel sont positionnés les ressources et les acteurs sélectionnés, et sur lequel des flèches identifiées par un verbe mettent en relation un acteur à un autre et un acteur à une ressource. Ce dessin informel, fondé sur des termes ordinaires (qui ne doivent être ni polysémiques, ni trop génériques, ni porteurs de jugement de valeur), permet de donner un premier aperçu des éléments constitutifs du modèle et de leurs interactions. Il est aisément lisible par des acteurs non familiers de la modélisation.

Pour une question donnée, il s'agit de faire des hypothèses sur les éléments du monde qui sont importants à prendre en compte. Trois phases sont généralement proposées dans les méthodes d'analyse d'acteurs : 1) identification des acteurs ; 2) différenciation et catégorisation des acteurs identifiés ; 3) spécification des relations entre les acteurs. Lors de chaque phase, il est essentiel de considérer la pertinence des choix envisagés en se référant à la question posée. Dans la majorité des processus ComMod, une ressource est au cœur de la question considérée. Dans la pratique, il s'avère pertinent de ne pas faire abstraction de cette ressource lors de la phase initiale d'identification des acteurs.

Ainsi, comme le propose la méthode ARDI (Étienne, 2006 et 2009), on pourra catégoriser les acteurs selon le caractère plus ou moins direct de leurs actions sur la ressource, ou encore préciser pour chaque type d'acteur la nature de l'entité de gestion spécifique à son action. Il existe toute une gamme d'outils permettant de spécifier de manière plus ou moins structurée les relations entre acteurs (par exemple sous la forme d'une matrice composée de signes + et - pour signifier les influences positives et négatives entre les acteurs pris deux à deux).

La figure 3.5 donne un exemple de ce type de diagramme réalisé dans le cadre d'un exercice de modélisation des conflits d'usage sur les pelouses du causse Méjan. Sur ce diagramme apparaissent les entités considérées comme les acteurs principaux ainsi que celles représentant les ressources, mais également une entité que l'on pourrait qualifier

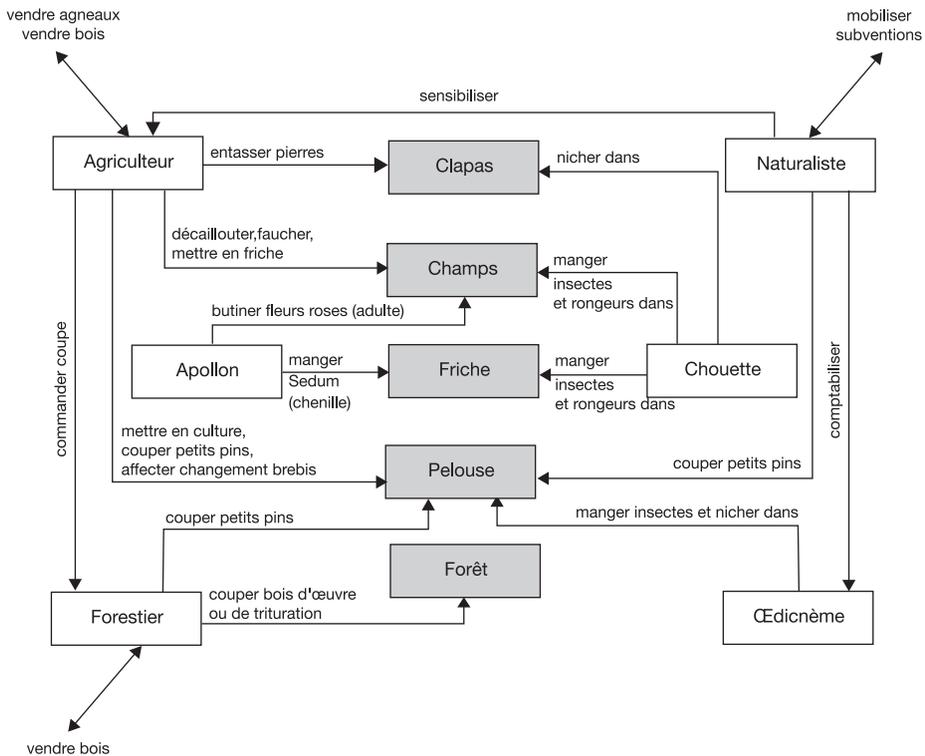


Figure 3.5. Exemple de diagramme conceptuel donnant à voir le modèle du domaine sous la forme d'entités en relation (cas d'étude du causse Méjan).

de « passive » (cailloux) – à ce stade la nature des entités importe peu. On cherchera simplement à pouvoir communiquer en présentant de la manière la plus simple possible une compréhension des éléments clés du fonctionnement du système concerné. Même si le format utilisé n'est pas très formalisé, le respect des quelques grands principes sur lesquels il repose facilitera grandement la confrontation de différentes versions proposées par plusieurs groupes travaillant en parallèle. Il s'avère particulièrement intéressant de mettre en œuvre cette première phase de l'étape de conceptualisation de manière collective, avec des participants qui peuvent être des acteurs du système, des scientifiques, des décideurs, etc. Confronter les différentes versions produites est un premier pas vers le partage des représentations.

Cette étape s'achève par la stabilisation du modèle du domaine correspondant à un accord, à un instant donné, entre les participants sur la base des zones de recoupement et des correspondances entre les différentes représentations du domaine d'étude. S'il subsiste des incohérences, contradictions, divergences, singularités dans ces représentations, il est important de les mettre en lumière et de s'accorder sur la façon de les traiter, les options possibles et non exclusives incluant :

- le traitement par l'évitement. Le modèle du domaine est restreint à ce sur quoi il y a accord ;
- la recherche d'un compromis fondé sur une négociation ;
- le passage par des scénarios mettant en exergue et permettant d'explorer les zones litigieuses (Dray *et al.*, 2006), ou prenant en charge les points de vue incohérents quand il n'y a pas accord sur une épreuve permettant de les départager, telle qu'une observation commune sur le terrain ;
- la réunion des points de vue en se limitant à ceux ne générant pas d'incohérences.

Formalisation des connaissances et conceptualisation : du modèle du domaine au modèle conceptuel

Une fois le modèle du domaine posé, la conceptualisation proprement dite peut démarrer. S'il est fréquent que des formalismes, en général simplifiés, soient utilisés dès les premières étapes de l'abstraction du modèle du domaine, il est nécessaire en revanche pour la phase de conceptualisation d'adopter de manière rigoureuse des formalismes permettant de décrire complètement les différents aspects du modèle pour sa traduction en modèle de simulation. La conceptualisation consiste alors à spécifier les différents éléments du modèle du domaine dans les formalismes choisis, et à en préciser différents aspects, notamment dynamiques, pour parvenir à une description complète. À l'instar de l'abstraction, la conceptualisation peut se dérouler de manière participative, auquel cas les processus sont souvent intimement liés. Mais elle peut aussi se mener de manière semi-automatique. Nous décrirons les grandes familles d'entités et de processus présents dans nos modèles conceptuels. Il est important de s'interroger sur la nature des entités et des processus que l'on cherche à conceptualiser, car les concepts génériques éventuellement disponibles en dépendent.

Formalismes pour la conceptualisation

Un formalisme est un outil d'expression formel fondé sur un ensemble de mots obéissant à des règles et des conventions (dites grammaire formelle ou syntaxe) et sur une sémantique sous-jacente. Les formalismes les plus fréquemment utilisés pour la conceptualisation de modèles dans les processus ComMod sont les suivants :

- les équations mathématiques (par exemple pour un processus biologique tel que la croissance d'une ressource, on pourra choisir d'utiliser l'équation logistique). Elles permettent de décrire et préciser des processus particuliers d'évolution de certaines entités ;
- le pseudo-code, langage proche du langage naturel ayant recours à des éléments de syntaxe logique (si, alors, tant que...) et à un lexique stabilisé pour désigner des entités, des attributs, et des actions. Il a l'avantage d'être facile à utiliser dans des collectifs incluant des profanes (écriture de phrases logiques) tout en obligeant à une certaine rigueur pour respecter le langage propre à un groupe donné et à un moment donné dans la vie de ce groupe ;
- *Unified Modeling Language* (UML), ce langage propose une grammaire stabilisée (à la différence du pseudo-code) et de ce fait comprise par tous ceux qui la connaissent, qu'ils aient participé ou non à la construction du modèle. Il permet de formaliser un modèle orienté objet, et assez bien un système multi-agent. Il propose notamment une panoplie de diagrammes (appelés « vues » qui permettent de présenter un modèle conceptuel selon des angles différents), tels que les diagrammes de classes pour décrire la structure du modèle en différentes entités, les diagrammes d'activité pour présenter le comportement des entités et les diagrammes d'états-transitions pour caractériser des dynamiques de changement de stades (Le Page *et al.*, 2005). Si la réalisation de diagrammes avec ce langage est souvent ardue, l'objectif est d'obtenir des schémas clairs et compréhensibles par tous, même par ceux qui n'ont pas participé à la conception, ce qui peut être le cas de l'informaticien qui prendra en charge l'implémentation du modèle conceptuel.

Le processus de conceptualisation

Déroulement d'un processus de conceptualisation standard

En général, la phase de conceptualisation se compose des activités suivantes, qu'il ne faut pas voir comme distinctes et séquentielles car elles sont le plus souvent imbriquées et itératives.

1. Phase de spécification de la structure du modèle. Il s'agit de la traduction des entités du modèle du domaine dans le formalisme choisi : quelles sont ces entités ? Quelles sont leurs relations (quelle entité « connaît » telle autre et selon quel point de vue) ? Quelles sont les propriétés qui les caractérisent et les actions principales qu'elles peuvent effectuer ? Cette phase est généralement l'occasion de regrouper les entités ayant des comportements similaires en définissant des entités plus génériques. Dans ce cas, on parle de généralisation, activité inverse de la spécialisation. À ce stade, des éléments issus de travaux de modélisation antérieurs (modèles génériques de simulation sociale par exemple) sont réutilisables ; des éléments issus des théories des thématiciens peuvent être inclus (ainsi la théorie des systèmes agraires se fonde sur une typologie des agriculteurs selon un certain nombre de critères qui pourra être utilisée pour spécialiser une entité abstraite « Agriculteur »). Si l'on

fait une analogie avec l'ingénierie des connaissances, cette phase est comparable avec la phase de construction d'une ontologie (Bommel *et al.*, 2007).

2. Phase de spécification des dynamiques propres aux entités. Il s'agit de spécifier les dynamiques intrinsèques des ressources, les opérations pouvant être réalisées par une entité (comportements) et influencer son évolution ou celle des entités auxquelles elle est reliée, ou les mécanismes de décision mobilisés pour choisir le comportement en fonction de l'état présent de l'entité et du contexte (son environnement). La mobilisation de mécanismes évolués de décisions est en général le propre des entités sociales.

3. Phase de spécification de l'ordonnement dans le temps de ces processus durant un pas de temps de la simulation.

Durant ce travail de conceptualisation, il faut veiller à garder un vocabulaire qui appartienne au domaine modélisé. Les diagrammes produits sont essentiellement destinés aux thématiciens, pour qu'ils puissent les comprendre, se les accaparer et les critiquer.

Conceptualisation participative

Dans la plupart des cas, les ateliers que l'on pourrait qualifier de modélisation participative ont simplement des objectifs d'explicitation. Les supports utilisés permettent aux participants d'explicitier la façon dont ils perçoivent leur système, ou aident simplement à qu'ils se mettent d'accord. On parlera donc de conceptualisation participative ou d'atelier de conceptualisation quand des acteurs sont réellement impliqués de manière active dans ce travail, – définition du formalisme ou des entités conceptuelles, ou encore traduction du modèle du domaine. UbonSeeds constitue un exemple de coconceptualisation avec des experts locaux : dans le cadre de cette application, un réel travail collaboratif entre des chercheurs et des acteurs du développement de la région a eu lieu pour concevoir des diagrammes avec *Unified Modeling Language* (UML). Le modèle conceptuel des jeux de rôles utilisés dans la première phase de l'étude s'appuie sur cette base (Vejpas *et al.*, 2005).

En règle générale, à partir du moment où sont à la fois impliqués les acteurs du système de référence et les thématiciens qui travaillent à la compréhension de ce système, l'abstraction et la conceptualisation ne peuvent être séparées. En s'appuyant sur un formalisme qui permet de lever les ambiguïtés, il s'agit en fait de systématiser la description du modèle selon différents points de vue, en affinant progressivement le modèle du domaine.

Dans le cadre d'ateliers de conceptualisation participative qui rassemblent chercheurs et experts du domaine dans la pratique de l'interdisciplinarité, le modélisateur propose un formalisme (souvent UML) pour traduire le (ou les) modèle(s) du domaine en un modèle conceptuel. Son rôle est alors de faciliter la traduction des concepts véhiculés par les experts. Bien que les outils (tableaux informatiques, tableau noir, papier post-it) permettent à tous les participants de modifier directement le modèle, c'est souvent le modélisateur qui « tient le crayon » et anime la discussion pour tenter d'intégrer les concepts et les mettre en synergie. C'est ce qu'exprimait déjà F. Morel (1979) il y a trente ans : « C'est pourquoi, la collaboration entre physiologistes de tous horizons d'un côté, informaticiens et biométriciens de l'autre, restera nécessaire et souhaitable encore longtemps. Mais pour être pleinement efficace, cette collaboration suppose que les interlocuteurs des deux camps parcourent les uns comme les autres une partie du chemin qui les

sépare trop souvent. Il est essentiel en effet que chacun sache s'exprimer dans un langage accessible à ses partenaires, ne serait-ce que pour pleinement appréhender les limites et les possibilités des approches respectives des uns et des autres. ».

Considérer *Unified Modeling Language* (UML) comme un outil de dialogue entre disciplines, c'est aussi reconnaître avec Morand (2000) que « le diagramme est au cœur du processus cognitif et non pas à la périphérie ». Avec des acteurs du système de référence, les ateliers de modélisation participatifs peuvent être considérés plus largement ouverts : on demande aux acteurs de participer à la construction d'une représentation selon une « grammaire » prédéfinie, en général peu discutée car peu formalisée et assez intuitive. (Étienne *et al.*, 2008c).

Entités d'un modèle conceptuel

La référence au mode de représentation de type système multi-agent invite tout naturellement à réfléchir, en termes de description, aux entités du système à modéliser – acteurs et objets – et à leurs modes d'action et d'interaction. Par rapport à la phase d'élaboration du modèle du domaine, il s'agit de déterminer les entités conceptuelles qui vont être utiles pour représenter les entités considérées comme faisant partie du modèle du domaine. Rappeler l'objectif du modèle est alors indispensable, car cette mise en perspective permet à ceux qui découvrent le modèle de comprendre pourquoi certains aspects du système étudié ont été ignorés (Grimm et Railsback, 2005).

C'est donc à ce niveau que le choix de considérer une entité sera traduit (ou non) en une classe constitutive du modèle. C'est aussi à ce niveau que l'on va choisir si un groupe est représenté comme une entité unique ou comme une composition d'agents.

On peut distinguer des entités de différente nature dans les modèles conceptuels. Il peut être utile de s'interroger sur la nature des entités que l'on modélise, car cela peut aider à faire des regroupements et favoriser des réutilisations à bon escient. On peut distinguer les entités selon différents critères, mais le découpage que nous présentons ici est celui qui est en général utilisé dans les processus ComMod et reproduit dans la plateforme de modélisation Cormas.

Les entités sociales, appelées agents dans les MAV (modèles fondés sur des agents informatiques ou virtuels), sont utilisées pour représenter les individus, groupes d'individus, ou institutions impliqués dans la gestion des ressources. Leur rôle est en général de gérer ou d'exploiter les ressources du système, de communiquer avec les autres entités sociales, et d'agir sur d'autres entités spatiales et physiques (ou de les percevoir). Les entités sociales sont porteuses des capacités de décision et les dynamiques associées sont donc essentiellement d'ordre cognitif. Celles-ci s'expriment dans leur perception du système (ressources, espace et autres entités sociales), dans la construction des représentations, ainsi que dans le choix, l'adaptation et la mise en œuvre de plans d'action ou de stratégies. Dans les MAV, ces structures cognitives peuvent être plus ou moins évoluées et, selon la question posée, il existe des concepts réutilisables issus de la littérature multi-agent informatique. Dans les MAH (modèles fondés sur des agents humains), l'expression de la décision des entités sociales est souvent prise en charge par les joueurs et est donc contrainte par les règles du jeu.

Les modèles que nous utilisons incluent presque systématiquement un support spatial. Ce support est constitué d'entités (parcelles, régions, rivières...) qui configurent l'espace et structurent le réseau d'interactions spatiales. Ces entités spatiales sont aussi

parfois des entités de gestion liées à chaque type d'acteur, chacun d'entre eux ayant une vision de l'espace propre à son type d'activité.

Les autres entités des modèles sont donc d'ordre physique, biologique, ou immatériel. Parmi ces entités, les entités ressources peuvent être distinguées comme une classe à part. Les entités ressource ont souvent des dynamiques propres de circulation et de régénération (cycle de l'eau, dynamiques de population mais aussi évolution et diffusion de caractères génétiques par exemple). Dans les MAV, ces dynamiques sont souvent adaptées de modèles disciplinaires simplifiés, et ce support informatique est souvent porté dans les MAH, même s'il arrive que, dans des modèles abstraits, des artefacts physiques permettent de simuler les dynamiques des ressources (par exemple écoulement de l'eau reproduit avec des billes dans Lankford *et al.*, 2007). D'autre part, l'évolution de ces entités ressource dépend de leurs interactions avec les entités sociales (prélèvements, modifications de caractéristiques constitutives, échanges et déplacements...), alors qu'inversement, c'est sur la dynamique de ces entités que se focalisent les modes de perception et de gestion des entités sociales.

Il peut y avoir dans les modèles des entités représentant des objets physiques autres, pouvant être manipulés ou échangés par les entités sociales, ou bien pouvant agir sur les entités ressources. Cette large catégorie peut regrouper des concepts aussi divers que des infrastructures (digues) ou de l'argent, mais aussi des médias de communication. Dans tous les cas, les objets physiques permettent de contraindre les interactions du modèle.

Enfin, une dernière catégorie est constituée par les entités de communication. Il s'agit d'éléments immatériels (informations, connaissances, croyances, émotions...) que l'on décide de matérialiser dans le modèle car elles font sens pour les entités sociales qui les manipulent, les échangent. La plupart du temps, ces entités de communication sont conceptualisées sous la forme simple de « messages » contenant une information sur le contexte (niveau d'eau des parcelles dans Shadoc, besoins et disponibilités en semences dans UbonSeeds, etc.). Mais il arrive que l'on ait besoin de mieux structurer et différencier les informations échangées entre les agents, qu'elles soient plutôt sociales et techniques (itinéraires techniques) ou psychologiques (états émotionnels). Ce type d'entité est associé aux agents utilisant des informations de manière différenciée pour faire évoluer leur représentation du monde, leurs états émotionnels, mais aussi pour influencer et éventuellement tromper les autres agents. C'est souvent le cas de modèles abordant les problématiques de gestion des ressources sous l'angle de la diffusion et de l'impact de croyances dans la société (diffusion de l'innovation, solidarité). On pourra également noter que les protocoles de communication selon lesquels ces entités circulent (diffusion centralisée, diffusion de gré à gré, diffusion au sein de réseaux sociaux...) influencent fortement le fonctionnement du système. C'est d'ailleurs souvent, pour les modèles matérialisant l'information, un sujet d'investigation dans différents scénarios.

Implémentation : du modèle conceptuel au modèle de simulation

Une des spécificités de la modélisation d'accompagnement est de favoriser l'élaboration de plusieurs modèles opérationnels se référant au même modèle conceptuel. Dans tous les cas (jeu de rôles ou modèle de simulation informatique), on élabore un simulateur pour faire fonctionner le modèle. L'implémentation rend compte de cette phase qui transforme le modèle conceptuel en modèle opérationnel.

Dans un premier temps, nous traitons des questions liées à la gestion du temps et au choix de l'ordre dans lequel les entités du modèle sont activées. Pour les modèles de simulation informatique plus particulièrement, ces aspects ont une influence sensible sur le comportement du système simulé. Puis les aspects pratiques de la fabrication des outils de simulation sont abordés. Une place particulière est accordée aux supports spatiaux des simulateurs, qui sont essentiels pour traiter les questions de gestion des ressources et pour partager les représentations. Enfin, l'ensemble calibrage-vérification-validation est discuté en considérant les spécificités de la modélisation d'accompagnement.

Gestion du temps, ordonnancement des agents, ordonnancement des actions

Si, comme nous allons le voir, la gestion informatique du temps impose un certain nombre de contraintes techniques qu'il faut pouvoir maîtriser au moment de réaliser l'implémentation d'un MAV (modèle basé sur des agents informatiques ou virtuels), la gestion pratique du temps lorsqu'on utilise des jeux de rôles impose également des contraintes : contrairement à un agent virtuel, un agent humain se lasse très vite d'une activité répétitive, une session de jeu de rôles doit être pensée de façon à garantir un côté ludique. La durée d'une session de jeu de rôles sera forcément réduite par rapport au nombre de pas de temps qu'une simulation informatique pourra mettre en œuvre. Néanmoins il faut « jouer » suffisamment longtemps pour qu'il se passe quelque chose de déterminant dans le jeu, et la valeur d'un pas de temps doit rester pertinente pour rendre compte correctement de la dynamique des ressources. De ce point de vue, il peut s'avérer très utile de coupler le jeu de rôles avec un modèle de simulation informatique (Barreteau *et al.*, 2007).

En informatique, le temps est soit dirigé par les événements (le système gère un échéancier), soit par une horloge (le temps est segmenté en pas de temps réguliers de même durée, on parle alors de simulation à temps discret). Cependant, l'approche à temps discret simplifie considérablement le développement du simulateur et la compréhension du déroulement d'une simulation (Treuil *et al.*, 2008) ; elle est systématiquement retenue pour la modélisation d'accompagnement.

L'horizon de la simulation (nombre total de pas de temps) est directement en rapport avec la définition de la question posée. Cette dimension est donc généralement déterminée avant de considérer la granularité du temps (durée d'un pas de temps), qui dépend quant à elle de la périodicité de tous les processus dynamiques en jeu. En général, la granularité est égale à la plus petite périodicité.

Les acteurs d'un système de référence fonctionnent simultanément. Dans un ordinateur, les agents virtuels qui les représentent sont activés séquentiellement. De même, la séquence d'actions élémentaires exécutées pour chaque agent à chaque pas de temps est séquentielle. Il est particulièrement important de préciser les règles d'ordonnement choisies au moment de l'implémentation du modèle, car elles peuvent avoir une très grande incidence sur les résultats de la simulation.

Supports spatiaux

L'espace est omniprésent dans les modèles mobilisés dans un processus ComMod. Dans le cas des jeux de rôles, dont la très grande majorité fait pourtant usage de l'informatique, la représentation spatiale est le plus souvent non informatisée. L'espace est alors représenté par un plateau de jeu qui peut prendre plusieurs formes. On peut trouver des blocs en trois dimensions lorsque le relief du terrain est une composante importante à prendre en considération (Mae Salaep, SugarRice ou Ubon Rice Seeds), des cartes virtuelles mais représentant un espace réel tel qu'un bassin versant, le territoire d'un parc ou de plusieurs communes (Kat Aware, Pays de Caux, Méjan, Nîmes-Métropole), des grilles spatiales plus ou moins abstraites (Radi, Lingmuteychu, Lam Dom Yai, Ouessant, etc.) ou encore un dessin sur tableau par exemple un périmètre irrigué (Njoobaari, Larq'asninchej). Il est aussi fréquent que le jeu de rôles utilise à la fois une représentation spatiale informatique et un plateau de jeu. Dans certains cas, cette association est complémentaire : l'ensemble des participants visualisent les deux supports, chacun apportant des informations spécifiques. Ainsi dans le cas d'étude AguAloca, le plateau de jeu permet de localiser le réseau hydrographique et les points de pompage (réseau arcs-nœuds) alors que dans le même temps, sur l'écran de l'ordinateur, les joueurs visualisent le même espace selon différents points de vue (occupation du sol, communes, bassins versants). Dans d'autres cas, les différents supports spatiaux sont assignés à différentes catégories de joueurs. Ainsi, dans le cadre du jeu de rôles MéjanJeu, les agriculteurs ne disposent que d'une vue locale de l'espace (zoom sur leur exploitation) sous la forme d'une carte imprimée, alors que dans le même temps les naturalistes et les forestiers consultent des points de vue sur l'ensemble de l'espace directement sur l'écran d'un ordinateur.

La conduite de l'implémentation

En ce qui concerne les jeux de rôles, l'implémentation consiste à imaginer les supports de jeu, si besoin à les fabriquer. Un support de jeu est un élément qui délivre de l'information. Un bon support résulte d'un compromis souvent difficile entre stimuler l'aspect ludique, utiliser des outils facilement mobilisables tout en évitant l'excès de technologie et les délais excessifs. Par ailleurs, il convient de s'interroger sur la forme la plus adaptée au type d'information que l'on doit transmettre. Ainsi, pour des flux d'argent ou de matière, on pourra utiliser des pions, du papier post-it, des billets. Pour faire intervenir des aléas, on pourra utiliser des cartes « chance », un dé, en considérant qu'il est parfois important de pouvoir contrôler l'aléa de manière à reproduire les mêmes conditions, notamment si on souhaite pouvoir comparer des sessions de jeu. Pour divulguer des informations en début de jeu et les laisser à disposition lors de la session de jeu, on pourra prévoir des fiches ou aide-mémoires.

Quand l'informatique tient une part importante (MiAH, MAHy et MAV), l'ordinateur est le principal matériel utilisé pour construire le modèle opérationnel, et les langages de programmation informatique permettent de « coder » le modèle sous la forme d'une liste d'instructions interprétables par la machine. Plusieurs possibilités existent :

- la programmation spécifique, qui consiste à coder l'ensemble des aspects délégués à l'informatique. L'avantage est de maîtriser entièrement la chaîne de traduction ; l'inconvénient est de passer du temps à reprogrammer des choses qui ont déjà été programmées ;
- l'usage d'un logiciel spécifique pour prendre en charge un aspect précis. Par exemple un logiciel de système d'information géographique est bien adapté pour produire une représentation de l'espace ;
- le recours à un seul logiciel intégrant l'ensemble du codage. Le logiciel est alors qualifié de « plate-forme générique ». Un certain nombre de plates-formes génériques ont été spécialement développées pour faciliter l'implémentation de MAV (modèle basé sur des agents informatiques ou virtuels), mais un logiciel commercial tel qu'un tableur peut faire l'affaire : c'est le cas du jeu de rôles SylvoPast développé par Étienne (2003).

L'intérêt d'une plate-forme générique pour implémenter un MAV est démontré par : 1) le caractère générique de nombreuses composantes (par exemple le module de représentation de l'espace) ; 2) la mise à disposition de services périphériques qui permettront de mettre en œuvre les expérimentations du modèle (lancer des batteries de simulation en spécifiant les gammes de variation d'un ensemble de paramètres, visualiser des indicateurs, etc.) ; 3) la constitution d'une bibliothèque d'applications, source d'inspiration pour les modélisateurs non informaticiens.

La plate-forme générique Cormas¹ (Bousquet *et al.*, 1998) a été développée par le Cirad depuis le milieu des années 1990 pour faciliter l'implémentation de modèles basés sur des agents informatiques appliqués à la gestion des ressources ; elle est fréquemment utilisée dans le cadre de mises en œuvre de la modélisation d'accompagnement. Une des grandes forces de Cormas est de s'appuyer sur le langage de programmation Smalltalk, très facile d'accès à des modélisateurs non informaticiens, et qui facilite grandement l'emploi d'extensions déjà développées dans d'autres modèles. Parmi les autres plate-formes génériques dédiées à l'implémentation de MAV qui sont très répandues, on peut citer NetLogo², Swarm³ ou Repast⁴.

Lorsque les niveaux et les dimensions du système de référence sont multiples, l'usage des modèles vise l'articulation des représentations spécifiques à ces niveaux et ces dimensions. Dans le chapitre 10, on présente les options envisageables : soit intégrer les représentations diverses au sein d'une seule représentation, soit coordonner l'ensemble des représentations spécifiques. En matière de simulateur, la première option requiert un outil intégratif, alors que la seconde nécessite une gamme d'outils (boîte à outils) adaptés à chaque niveau. La vision « intégrative » propose en outre d'associer au sein d'une seule et même plate-forme l'ensemble des outils mobilisés tout au long du processus de modélisation. Parmi les projets en cours se situant dans cette lignée, citons Mimosa⁵ qui

¹ <http://cormas.cirad.fr>

² <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

³ <http://www.swarm.org/>

⁴ <http://repast.sf.net/>

⁵ <http://sourceforge.net/projects/mimosa>

associe à un noyau de simulation l'usage des ontologies et d'un ensemble extensible de formalismes pour spécifier le modèle conceptuel.

Calibrage, vérification, validation

Calibrage

Le calibrage (*calibration*) consiste à régler un modèle de manière à ce que les sorties correspondent bien à des valeurs attendues (le plus souvent, un jeu de données empiriques). Si ce n'est pas le cas, on ajuste le modèle en modifiant les valeurs de certains paramètres. Ce procédé s'apparente au réglage d'un instrument de mesure à l'aide d'un étalon. Les paramètres sélectionnés pour procéder à cet ajustement ont un statut un peu particulier. Pratiquement, on choisit souvent un paramètre qui à la fois influence sensiblement les sorties du modèle (deux valeurs distinctes produisent des résultats différents), et dont on ne connaît pas la valeur avec certitude. Si l'ajustement des paramètres ne suffit pas à obtenir des résultats satisfaisants, il est alors nécessaire de modifier certains éléments du modèle. Ceci entraîne une remise en cause plus ou moins profonde du modèle opérationnel ou du modèle de conception, voire même du modèle du domaine ; il ne s'agit plus alors de calibrage, mais d'une nouvelle boucle d'apprentissage par la modélisation et l'évaluation.

Au cours de la conception d'un modèle de simulation de type jeu de rôles, qui sera utilisé pour mettre des acteurs en situation, on se sert du calibrage pour conférer au modèle la propriété de stimuler les échanges entre participants. Puisque la question à l'origine de la démarche pose généralement problème à certains acteurs représentés dans le modèle, on essaie de calibrer ce dernier de façon à atteindre rapidement cette situation problématique qui fait réagir les participants et stimule la discussion.

Vérification

La vérification s'attache à juger de la bonne réalisation du simulateur, c'est-à-dire de l'implémentation sans défaut d'un modèle sur une machine. En d'autres termes, il s'agit de savoir si on a bien construit le modèle (*building the model right*, Balci, 1988). Mais comment s'assurer que les sorties des simulations découlent uniquement des mécanismes que l'on pense avoir élaborés dans le modèle ? Car nombreuses sont les possibilités de faire apparaître des artefacts liés à des erreurs de programmation ou de calcul, à une gestion approximative du temps de la simulation ou des interactions entre agents, ou à tout autre comportement erratique du simulateur sans lien avec le modèle conceptuel qu'il est censé exprimer. Divers petits défauts ou approximations peuvent être, par amplification, la source d'erreurs plus importantes qui risquent d'influencer fortement le comportement global du système.

Pour des modèles relativement complexes tels que ceux qui simulent le fonctionnement de systèmes sociaux et écologiques, garantir l'absence total de coquilles (*bug*) est un objectif pratiquement impossible à atteindre. Ainsi, selon Gilbert (2008), le nombre de *bug* d'un modèle basé sur des agents informatiques suit une fonction exponentielle négative : après une diminution rapide, il n'atteint jamais zéro, même après un long travail de nettoyage. Ce constat met à mal le principe scientifique fondamental de reproductibilité des résultats. Plusieurs études récentes, cherchant à reproduire des résultats de simulation publiés, sont venues confirmer ce problème (Edmonds *et al.*, 2003 ; Rouchier,

2003). Sensibilisés, les chercheurs qui utilisent les modèles de simulation informatique s'organisent en fournissant des préconisations censées faciliter la découverte de biais et *bug* récalcitrants (Gilbert, 2008).

Dans le contexte de la modélisation d'accompagnement, les modèles développés sont souvent très simples – appelés parfois modèles-jouets (*toy-models*). Ils n'ont pas nécessairement vocation à être réutilisés en dehors du contexte pour lequel ils ont été spécialement conçus – ce sont des « modèles jetables ». Ces caractéristiques tendraient à rendre leurs concepteurs moins exigeants sur la reproductibilité de leurs résultats ; non pas qu'ils soient moins sujets aux *bug* ou aux artéfacts, mais plutôt parce que les conséquences de ces erreurs ne sont pas décisives vis-à-vis de la démarche. La modélisation d'accompagnement ne cherche pas à proposer des solutions d'experts, finement calibrées, mais elle vise à susciter un dialogue entre les participants, à tel point que le modèle peut être considéré comme un prétexte. Il arrive ainsi qu'on modifie ces modèles (non seulement des valeurs de paramètres, mais aussi éventuellement des éléments structurels) pendant qu'on les utilise, saisissant les suggestions des participants au cours des ateliers de simulation participative. Ces modifications apportées, sans prendre le temps de repasser par la réflexion conceptuelle, ni de vérifier qu'elles n'introduisent pas de biais dus à leur mode d'implémentation, rendent les modèles difficilement transférables à d'autres personnes, ce qui ne permet pas leur transfert.

Validation et validité

Selon Balci, la validation consiste à comparer le comportement du modèle avec le système réel qu'il est censé représenter. Si la comparaison est satisfaisante, la validation serait démontrée. En d'autres termes, on cherche à savoir si on a construit le bon modèle (*building the right model*, Balci, 1988), c'est-à-dire un modèle qui « colle » bien aux données. Certes, la mise en regard des résultats de simulation avec des grandeurs mesurables sur le terrain constitue une dimension incontournable de la validité d'un modèle. Cependant, considérer cette seule dimension n'est pas suffisant. Sans même parler des corrélations accidentelles, il existe un grand nombre de problèmes théoriques et pratiques lorsque l'on veut comparer les sorties d'un modèle à des données empiriques (Amblard *et al.*, 2006). Une bonne corrélation avec des données peut provenir d'un facteur externe non pris en compte par le modèle. Celui-ci peut aussi produire des résultats cohérents avec des données alors même que les mécanismes modélisés s'avèrent totalement erronés. De plus, si les données utilisées pour calculer cette corrélation ont aussi servi à calibrer le modèle, il est impropre de conclure à sa validité en se référant à ces données.

La modélisation d'accompagnement s'inscrivant dans la lignée du constructivisme, les connaissances construites par l'expérience de modélisation ne constituent dans ce cadre ni des principes normatifs, ni des théories prédictives. Elles prennent la forme de propositions génériques, destinées à éclairer le lecteur, susciter sa réflexion et ses questionnements, ainsi qu'à stimuler son imagination et son action créatrice (Avenier *et al.*, 2007). Ainsi, les savoirs ne sont pas validés au sens classique du terme, mais légitimés par la cohérence de la méthode de construction et par l'usage qui est fait postérieurement des savoirs coconstruits.

Il est désormais largement admis que selon le type de modélisation adopté, la validation prend un sens particulier : il n'y a donc pas trop de sens à le discuter de manière générale (Pala *et al.*, 2003). La modélisation d'accompagnement – considérant que

le problème à la base du modèle n'est pas clairement cadré dès le départ mais que le processus de modélisation contribue à l'éclairer – se situe dans le courant des *Soft Operations Research*. Le modèle est utilisé comme support pour débattre de la situation problématique, au cours d'un processus continu d'apprentissage. Selon Cleckland (1995), dans ce contexte, la validité d'un modèle dépend alors principalement de sa capacité à générer l'apprentissage. Si le modèle apparaît plausible aux utilisateurs et si, en outre, les utilisateurs ont le sentiment d'apprendre en le construisant et en le manipulant, alors le modèle est validé. Cette validation sociale pose problème à ceux qui relient la qualité de la représentation d'un modèle à des mesures de distance au réel.

Des modèles de simulation pour explorer collectivement des futurs possibles

Dans le chapitre 2, la dimension humaine de l'animation des sessions de simulation exploratoire (et plus particulièrement des sessions de mise en situation par la pratique d'un jeu de rôles) a été présentée en détaillant les rôles que doivent se répartir les membres de l'équipe d'animation. Nous présentons ici un point de vue complémentaire qui décrit la mise en œuvre d'ateliers d'exploration collective de scénarios fondés sur la pratique des jeux de rôles et sur la simulation informatique d'un monde virtuel.

Mise en place de l'atelier de simulation

L'atelier de simulation participative est un préalable à l'introduction du modèle aux participants. L'atelier de simulation participative débute par une présentation générale du cadre de l'intervention, afin d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : qui a pris l'initiative de la mise en œuvre de la démarche et dans quel but ? Qui a sélectionné les participants et selon quels critères (acteurs dont les activités dans la réalité sont représentées dans le modèle, acteurs légitimes pour représenter un groupe, prise en compte des relations entre acteurs dans la vie de tous les jours, etc.) ? Quel est l'objectif spécifique de l'atelier et selon quel programme va-t-il se dérouler ?

Dans le cas des jeux de rôles, la configuration de l'espace dans lequel se déroulera l'atelier est à penser en fonction des caractéristiques spatiales du système de référence, afin de positionner les joueurs à des endroits identifiés comme des lieux clés ayant un statut clairement défini (marché, lieu de réunion publique ou lieu privé), et permettant de restituer certaines propriétés importantes comme les voisinages, les distances, le statut du lieu.

Introduction du modèle de simulation

La présentation du modèle est une phase délicate. Elle doit être courte pour permettre aux participants de devenir actifs le plus rapidement possible, mais elle doit dans le même temps apporter toute une gamme d'informations pour permettre d'appréhender la structure du modèle (représentation de l'espace et types d'agent composant le modèle), les décisions à prendre par les joueurs à chaque tour de jeu ou les actions réalisées par les agents informatiques à chaque pas de temps, les indicateurs mis à disposition pour rendre compte des conséquences de ces décisions et actions, la dynamique de la ressource et enfin la temporalité de la simulation (périodicités des processus, durée que représente un pas de temps et nombre total de pas de temps simulés).

La quantité d'information communiquée aux participants lors de cette phase d'introduction du modèle doit être minimale mais néanmoins suffisante pour que puissent s'enclencher efficacement les mécanismes d'apprentissage selon les principes de la pédagogie active (chapitre 9). Dans le cas des jeux de rôles, l'information est souvent asymétrique, les participants recevant des éléments spécifiques à leur rôle qui ne sont pas divulgués aux autres.

Pour s'assurer de la bonne compréhension du modèle, dans le cas d'une session de jeu de rôles on pourra pratiquer un « tour à blanc » ; dans le cas d'une simulation informatique, on pourra vérifier que les participants anticipent correctement les changements d'état progressifs, en mode « pas à pas », des entités simulées. Le déroulé complet d'un premier scénario peut alors être envisagé.

Identification et formulation de scénarios

La scénarisation participative stimule la créativité des participants par des outils simples (courtes narrations, diagrammes, etc.) qui permettent d'envisager les trajectoires vers les futurs possibles d'un système social et écologique (Evans *et al.*, 2006 ; Peterson *et al.*, 2003). Dans le cadre de la modélisation d'accompagnement, scénario s'entend plutôt comme un mode de fonctionnement du modèle de simulation, ou plus exactement un ensemble de facteurs qui va modifier son fonctionnement : tel acteur modifie son comportement, telle dynamique écologique est perturbée, telle variable sociale ou économique est changée. Il est aussi fréquent que l'on envisage une modification de l'organisation des interactions (nouveaux systèmes d'échange, nouveaux protocoles de négociation).

Les scénarios sont très souvent définis de manière collective, au moment où sont discutés les résultats de la simulation d'un premier scénario, ce qui incite à proposer des scénarios alternatifs. Il arrive cependant que le premier scénario, dit « de base » ou « tendanciel », généralement établi en référence à la situation actuelle du système étudié, ait été préparé par les concepteurs des ateliers comme point de départ du processus d'exploration.

Exploration et observations

La technique du jeu de rôles est très efficace pour générer des propositions de scénarios mais beaucoup moins pour leur exploration. En effet, lors d'une séance de jeu, la réalisation d'un pas de temps (tour de jeu) demande beaucoup de temps, et la répétition des mêmes actions par les joueurs provoque rapidement un sentiment de lassitude. Tout en veillant à conserver un caractère ludique, il faut imaginer les moyens de pouvoir enchaîner suffisamment de tours de jeu pour s'approcher de l'horizon de simulation pertinent par rapport à la question posée, tout en conservant un certain réalisme à la vitesse d'évolution des processus représentés. C'est ici que la simulation informatique trouve tout son intérêt.

Dans le cadre d'une démarche expérimentale, il est toujours utile de réaliser une exploration avancée des propriétés du modèle, afin de s'assurer de sa robustesse et de mesurer sa sensibilité aux différents paramètres susceptibles d'être mobilisés pour définir des scénarios. Le modèle, exécuté un très grand nombre de fois, produit des milliers d'observations. Il convient alors de concevoir des plans d'expérience de façon à produire l'information ciblée à un coût minimal. En utilisant des plates-formes de simulation telles que Cormas, on accède à un ensemble de fonctionnalités facilitant la réalisation de ces plans d'expérience.

Cette phase d'exploration systématique des possibilités n'est pas la plus intéressante à mettre en œuvre de manière participative. Un des principes de base de la modélisation d'accompagnement stipule que la simulation exploratoire, en structurant les échanges, permet aux acteurs de parvenir à valider les interactions entre les différentes représentations et les dynamiques du système intégrées dans le modèle. C'est donc un processus d'apprentissage réciproque entre participants et animateurs de l'atelier sur le système étudié (chapitre 9).

Indicateurs et points de vue pour suivre l'évolution du système simulé

Les indicateurs permettant de suivre l'évolution du système simulé et de comparer les scénarios proposés sont calculés à partir des variables du modèle. Dans le cas de modèles de type multi-agent, ces variables correspondent à des attributs des entités, (spatiales, actives c'est-à-dire les agents, passives). Un attribut donné peut être considéré comme un indicateur pertinent, mais on peut également s'appuyer sur des fonctions dont le calcul dépend de plusieurs attributs pour élaborer des indicateurs synthétiques. Au cours des différentes étapes de la démarche, un panel d'indicateurs mentionnés comme pertinents par certains participants est progressivement constitué et enrichi. Ces indicateurs, qui correspondent à ce que chacun des acteurs a l'habitude ou l'envie de considérer dans ses activités, instrumentalisent leur perception du monde virtuel.

Un modèle de type multi-agent étant composé d'un nombre souvent important d'entités, il est fastidieux de ne passer que par des graphes pour suivre l'évolution de tous les indicateurs. Un moyen pratique de pouvoir observer les indicateurs sur tout un ensemble d'entités consiste à définir des points de vue propres à chaque type d'entité comme une fonction de visualisation qui attribue une image de forme et de couleur particulières à chaque valeur ou intervalle de valeurs de l'indicateur. Appliqué à l'ensemble des entités définissant le support spatial du modèle de simulation informatique, ce qui est dénommé ici « point de vue » – qui correspond à un « thème » dans les systèmes d'information géographique – offre une représentation spatiale dynamique de la simulation, sur laquelle on peut superposer les représentations dynamiques des entités situées.

Ainsi dans le cadre de la mise en œuvre d'une modélisation d'accompagnement sur la cause Méjan (Étienne *et al.*, 2003), une série de points de vue a été construite pour faciliter la compréhension du processus d'enrésinement des pelouses par les pins en distinguant clairement l'aspect physiognomique (les pins se voient dans le paysage), de l'aspect fonctionnel (de jeunes plants de pins se sont installés dans la parcelle). Une autre a été construite pour localiser les enjeux patrimoniaux de faune, de flore ou de paysage, pour en produire une représentation synthétique. Une autre permet de rendre compte des travaux effectués et de leur localisation, soit selon le regard du sylviculteur, soit selon le regard du naturaliste. Certains points de vue ont cherché à traduire un regard particulier comme par exemple l'évolution du niveau de risque d'enrésinement à partir des crêtes.

Il existe plusieurs modes de visualisation des éléments observables d'une simulation, qui correspondent à des modes de partage de l'information. Soit les éléments observables sont imprimés ou visibles sur l'écran d'un ordinateur (ce qui permet de spécialiser les informations selon les participants à qui elles sont destinées), soit ils sont directement projetés dans la salle (information partagée par tous les participants).

Les points de vue se présentent dans leur diversité aux participants qui observent (simulations informatiques) ou vivent de l'intérieur (jeux de rôles) l'évolution du système

simulé. Les points de vue qui ne sont pas les leurs sont plus facilement accessibles aux participants lorsque, soumis à des conditions identiques lors de la simulation d'un même scénario, ils les appréhendent en même temps que ceux dont ils sont plus familiers. Le partage des représentations s'en trouve facilité.

Comportements et interactions entre les joueurs

La mise en situation des participants à une session de jeu de rôles influence la façon dont ils prennent leurs décisions et interagissent avec les autres participants. L'enregistrement des arguments avancés lors des phases de discussion entre joueurs est un moyen de capter l'information sur les rationalités mobilisées pour ces décisions. Le dédoublement des rôles permet d'obliger à verbaliser les raisonnements, ce qui les rend plus facilement accessibles, mais biaise l'exploration vers des comportements plus standards comme il a été montré sur des situations d'économie expérimentale (Bornstein *et al.*, 1998). Enfin, l'observation des attitudes et des comportements des joueurs est une autre source de renseignements. Cette activité requiert de mobiliser des assistants capables d'assurer cette fonction (chapitre 2) et entièrement dédiés à cette tâche (un assistant posté à chaque lieu stratégique). Les observations qui en résultent se révèlent souvent très riches. Elles sont collectivement analysées lors de la phase de débriefing d'une session de jeu. Elles permettent également d'amorcer l'évolution du modèle utilisé, en remettant en cause soit le modèle du domaine, soit le modèle conceptuel, soit le modèle de simulation. C'est le premier moteur du processus itératif.

Analyse

À l'issue de l'exploration des différents scénarios de simulation, les participants ont pu tirer des conclusions, à partir de ce qu'ils ont observé et de ce qui leur a semblé révélateur. Il est fondamental de consacrer suffisamment de temps à discuter collectivement ces conclusions, afin qu'elles puissent être partagées, éventuellement invalidées du fait de la distance entre le monde virtuel ayant permis d'y aboutir et le monde réel. Cette discussion collective est d'autant plus importante que les participants sont concernés individuellement ; il faut leur donner l'occasion de rétablir leur identité et de ne pas perdre la face devant leur groupe (Richard-Ferroudji, 2008). C'est le débriefing collectif présenté au chapitre 1 qui permet cela.

Dans le cas des ateliers de jeu de rôles, cette analyse « à chaud » bénéficie grandement de la disponibilité des observations du déroulement de la session. Ainsi, si les décisions des joueurs sont enregistrées sur un support informatique, on pourra faire expliciter des décisions jugées problématiques à partir de séquences rejouées en accéléré, ou montrer des évolutions différentes en rejouant d'autres sessions organisées par ailleurs. Si les phases de négociation ont été suivies par un observateur, on pourra analyser les discours et discuter des argumentations. Si la session a été filmée, on pourra analyser des attitudes, ou tenter d'interpréter les déplacements des joueurs dans l'espace de jeu (prise d'initiative pour provoquer des interactions avec les autres), etc.

La phase d'analyse permet d'aborder le retour du monde virtuel vers le réel. Les participants sont invités à dire s'ils ont repéré des liens entre ce que l'expérience de simulation a exprimé et ce qui se passe dans la réalité, ou au contraire, si certains aspects issus de l'expérience de simulation ne sont jamais observés dans la réalité. Il s'agit là du deuxième, et principal, moteur du processus itératif : lors de cette analyse,

les participants peuvent remettre en cause les représentations utilisées ou leur mise en œuvre, en proposer de nouvelles, voire faire évoluer les questions posées. Enfin, au-delà du repérage de similitudes, l'analyse doit inclure une forme d'évaluation de l'atelier par les participants, par exemple en leur demandant s'ils ont perçu un quelconque type d'intérêt à y participer par rapport à la question posée (chapitre 6).

Singularité, complémentarité et polyvalence des outils de modélisation

Ce chapitre a présenté les différentes étapes et moyens de construction de mondes virtuels à des fins de partage de représentations et d'exploration collective de futurs possibles. Les étapes ont été présentées dans un certain ordre, ce qui peut laisser à penser que la séquence se déroule toujours selon cet ordonnancement, la fin d'une étape conditionnant le démarrage de la suivante. Dans la pratique, les interférences entre les différentes étapes sont fréquentes. Ce caractère est encore renforcé lorsque les acteurs sont impliqués, à des degrés divers, dans un certain nombre d'étapes, et qu'il leur est en outre donné la possibilité d'orienter le processus. La démarche de modélisation d'accompagnement doit pouvoir s'adapter et les outils être flexibles. En nous fondant sur la diversité des expériences analysées, la dualité entre singularité et généralité des modèles est discutée, en faisant le lien avec le degré de réalisme des modèles mobilisés. Nous analysons ensuite l'intérêt de pouvoir combiner au cours de la mise en œuvre de la démarche les deux principaux types d'outil de simulation, à savoir les jeux de rôles et les modèles basés sur des agents informatiques.

Singularité et généralité des modèles

Dans tout processus ComMod, un modèle singulier, développé spécifiquement pour aborder la représentation du système de référence considéré, est coconstruit. À l'inverse, un modèle générique – qui présente l'intérêt indéniable de pouvoir être mobilisé dans des contextes différents – n'est pas coconstruit (ou n'est coconstruit qu'une fois). Alors que la modélisation d'accompagnement met en avant le processus de coconstruction, quelles sont les conséquences pour le statut des modèles génériques en son sein ? Nous faisons parfois référence à des outils jetables. Le modèle jetable est caractéristique d'un état des représentations et des questions à un instant donné. Son usage amenant à faire évoluer les questions, voire sa construction amenant à faire évoluer les représentations, il n'est pertinent que dans son rôle de catalyseur du processus instantané. Afin de dépasser ce concept, le modèle générique permet d'élargir la capacité de représentation du modèle à partir d'un cas spécifique. Il permet d'identifier la famille à laquelle appartient le système représenté. Il peut aussi constituer le support d'une trace des adaptations. Le modèle générique sert alors à générer de nouveaux modèles jetables, qui précisent le contexte du modèle générique pour le rendre éventuellement plus pertinent.

Concrètement, le caractère singulier *versus* générique des modèles est souvent directement lié au degré de réalisme de la représentation du système de référence, qui va de pair avec le degré de complexité du modèle ; on peut en identifier trois.

Lorsque les liens avec un système de référence particulier sont explicites, les acteurs, les ressources et les configurations spatiales sont précisés dans le modèle à l'aide des

caractéristiques du système de référence. Cette option est souvent celle que les partenaires de terrain privilégient de prime abord. Retrouver dans le modèle certains aspects particuliers du système étudié rassure les participants sur la capacité de l'outil à représenter leur problématique spécifique. Il peut arriver que cette voie soit suivie simplement pour amener les participants à considérer le modèle avec confiance, comme dans le modèle développé dans le cas d'étude Domino à La Réunion, dans lequel la complexité du module démographique du MAV (modèle basé sur des agents informatiques) n'a finalement pas été abordée dans les scénarios prospectifs discutés. En règle générale, on recherche toujours plus de réalisme. Ce travers limite en outre la capacité du modèle à distancier ses utilisateurs de leur réalité, ce qui peut empêcher de considérer certaines options dans lesquelles des problèmes sensibles du système de référence surgiraient à nouveau.

Lorsque les liens avec un système de référence particulier sont implicites, le modèle est un archétype, fondé sur une simplification réaliste des acteurs, des ressources et des configurations spatiales telles qu'ils se présentent dans le système de référence. La simplification doit être reconnue légitime par les participants, ce qui demande de reproduire dans le modèle certaines propriétés ou caractéristiques marquantes, sans recourir à des détails spécifiques. Ainsi le modèle SylvoPast (Étienne, 2003) propose une représentation d'une forêt méditerranéenne quelconque fondée sur les proportions des différentes combinaisons de strates de végétation qu'on observe généralement sur le terrain.

Enfin, lorsqu'il n'y a aucun lien avec un système de référence particulier, le modèle propose une représentation abstraite qui a simplement comme objectif de traiter d'un enjeu. D'un côté, certains participants risquent d'être rebutés par un outil trop abstrait dans lequel ils ne se reconnaissent pas, entravant de fait leur capacité à se projeter dans cette représentation. D'un autre côté, les participants eux-mêmes considèrent qu'un modèle abstrait correspond mieux à leurs besoins d'explicitation et de partage de représentations. Ainsi, dans le cadre du projet Levelling the Playing Field aux Philippines, la version initiale du modèle CherIng, habituellement utilisé dans des sessions de formation où son extrême simplicité et son abstraction sont bien adaptées à un usage pédagogique (chapitre 11), a été plus appréciée par certains participants qu'une version plus réaliste du même modèle.

Combinaisons de différents modèles de simulation dans la mise en œuvre de la démarche

Dans la majorité des processus ComMod, plusieurs modèles de simulation sont combinés. À la suite d'une première catégorisation des bénéfices d'usages conjoints de jeux et de modèles informatiques pour les enjeux de négociation (Barreteau, 2003), nous analysons ici les atouts de chaque type de combinaison pour un appui à la conception, à la communication, à l'exploration ou à la validation.

Dans tous les cas d'étude combinant plusieurs modèles de simulation, des liens de filiation entre les modèles sont patents. Ainsi, même dans le cas d'étude Mae Salaep, qui est le plus prolifique avec 7 modèles de simulation développés en 6 ans, on retrouve des éléments communs entre les différents modèles développés pour rendre compte de l'érosion, de l'accès au crédit, du partage de l'eau.

Lorsque le jeu de rôles précède le modèle de simulation informatique, il apporte un appui à la communication du modèle conceptuel, tandis que le MAV (modèle basé

sur des agents informatiques) renforce et élargit la dimension prospective en permettant l'exploration d'un plus grand nombre de scénarios que le jeu de rôles. Ce type de combinaison se décline selon deux cas de figure.

Dans le premier cas, le MAV (modèle basé sur des agents informatiques) est une transcription directe du jeu de rôles, et il est le plus souvent utilisé dans la continuité de la session de jeu de rôles (ou quelques jours après), avec les mêmes participants. L'application SelfCormas au Sénégal a ouvert la voie à ce type de combinaison (d'Aquino *et al.*, 2003). La compréhension du lien direct unissant les deux outils est facilitée par la proximité des éléments d'interface et en particulier de la représentation spatiale : ce qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur est une reproduction fidèle du plateau de jeu, divers symboles peuvent également reprendre les figures des cartes distribuées dans le jeu. Ce type de combinaison permet aux participants de bien comprendre la structure et les principes du modèle conceptuel en le jouant, de proposer des scénarios et ensuite de les suivre sur l'ordinateur, en ayant ainsi bien conscience du statut du modèle de simulation informatique. Celui-ci n'apparaît pas comme un outil complexe délivrant des recommandations, mais comme un équivalent du jeu de rôles plus efficace pour explorer les scénarios.

Le second cas de figure, moins fréquent que le premier, fait référence à un MAV (modèle basé sur des agents informatiques) qui n'est pas la reproduction d'un jeu de rôles, mais souvent une représentation plus élaborée du domaine de référence. Il s'agit là plutôt d'un appui à la conception. Une application réalisée en Thaïlande (LamDomeYai) a démontré que ce mode d'association peut se révéler très efficace pour développer des modèles de simulation informatique relativement complexes avec des acteurs locaux qui peuvent ensuite se l'approprier : à la fin de ce projet, les villageois ayant participé au processus d'élaboration du MAV (qui s'est appuyé sur 3 sessions de jeu de rôles) sont allés présenter « leur » outil de simulation lors d'un séminaire à l'université. Le concepteur du MAV tirera avantage de l'analyse de plusieurs séances de jeu de rôles afin de s'appuyer sur des typologies de comportements plutôt que sur des comportements particuliers pour définir les agents virtuels – contrairement au premier cas.

Lorsque le modèle de simulation informatique précède le jeu de rôles, ce dernier est souvent une simplification du MAV (modèle basé sur des agents informatiques) qui peut être utile pour faire comprendre sa structure (ou encore « ouvrir la boîte noire ») à des participants pas très familiers de ce type de modèle de simulation informatique. Ainsi, Njoobaari et Shadoc sont deux modèles de simulation apparentés représentant le fonctionnement des systèmes irrigués dans la vallée du Fleuve Sénégal. Il y a là encore un appui à la communication, avec potentiellement un appui à la validation sociale du modèle conceptuel, ou à l'apprentissage de ses usages répondant à divers objectifs. Ce type de combinaison correspond également à des situations dans lesquelles le jeu de rôles intègre certains modules développés dans le cadre de l'élaboration du MAV, principalement ceux qui sont liés aux processus naturels (par exemple le module de dissémination des pins dans le cas d'étude sur la cause Méjan).

La tendance récente à produire des modèles de simulation hybrides (MAHy), qui intègrent de par leur structure les propriétés spécifiques des MAH (modèle basé sur des agents humains) et des MAV (modèle basé sur des agents informatiques), démontre que les deux formats sont très utiles à la mise en œuvre de la modélisation d'accompagnement. Pour permettre de gérer au mieux la contrainte de temps des jeux de rôles, les

modèles de simulation hybride offrent des possibilités intéressantes. Les avatars prennent ainsi le relais des joueurs pour réaliser certaines actions répétitives (MéjanJeu) ou à une périodicité plus faible que celle à laquelle se prennent les décisions intéressantes dans le cadre du jeu de rôles (Pieplue). Pour que le modèle de simulation comporte un nombre suffisant d'agents par rapport à la question posée, l'introduction d'agents virtuels en complément à un nombre raisonnable d'agents humains est également une fonction qui peut être réalisée avec un MAHy (AtollGame).