



HAL
open science

Vers des modèles multi-acteurs

Nicolas Becu, Frédéric Amblard, Nicolas Brax, Benoit Gaudou, Nicolas Marilleau

► **To cite this version:**

Nicolas Becu, Frédéric Amblard, Nicolas Brax, Benoit Gaudou, Nicolas Marilleau. Vers des modèles multi-acteurs. Simulation spatiale à base d'agents avec NetLogo, Volume 1 : introduction et bases, 2015. ⟨hal-01253051⟩

HAL Id: hal-01253051

<https://hal.science/hal-01253051v1>

Submitted on 15 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Chapitre 6

Vers des modèles multi-acteurs

6.1. Introduction

L'analyse des systèmes complexes (SC) implique de faire appel à différents points de vue pour pouvoir en saisir les différentes facettes et caractériser les interactions entre les entités du système. Modéliser et simuler des systèmes complexes sont des activités dans lesquelles la collaboration entre chercheurs est la règle plutôt que l'exception. En effet, de par la complexité des systèmes étudiés, il est souvent impératif de faire appel à plusieurs points de vue, provenant de disciplines différentes. Ainsi, l'image du chercheur solitaire capable de collecter des données, de conceptualiser des modèles explicatifs et de les opérationnaliser sur des outils informatiques, cède le pas à celle du groupe transdisciplinaire comprenant typiquement des thématiciens, informaticiens et mathématiciens. Pour ces groupes, le modèle (ou la simulation) est à la fois la raison première de leur regroupement, l'objectif collectif à atteindre ainsi que le support de leur travail collectif.

Parallèlement, de plus en plus d'applications de la simulation multi-agents sortent des laboratoires et démontrent qu'il existe un intérêt pratique à l'utilisation de cette approche : dans le domaine de l'aide à la décision (la simulation multi-agents permettant de tester des scénarios, d'évaluer qualitativement leurs impacts et d'anticiper des biais dans l'implémentation des approches), dans le domaine du marketing (l'outil permettant d'élaborer des stratégies de diffusion des produits) ou dans celui de l'aide à la conception de politiques publiques, par exemple en ce qui concerne l'aménagement du territoire. Deux courants principaux présentent un positionnement épistémologique relativement différent quant à l'utilisation de ces modèles par la société. Il s'agit d'une

Chapitre rédigé par N. BECU et F. AMBLARD et N. BRAX et B. GAUDOU et N. MARILLEAU.

part, de la simulation multi-agents conçue comme outil d'aide à la décision, la démarche de modélisation visant à la conception d'un produit (le modèle multi-agents) qui permet au décideur d'éclairer sa décision en prenant en compte des éléments (la focalisation sur les entités du système) qui n'étaient pas pris en compte dans les approches de modélisation classiques. On peut alors l'envisager comme un logiciel qui permet de tester des scénarios, que ce soit pour l'aide à la décision, la formation ou l'anticipation. D'autre part, la seconde approche, la simulation participative, se distingue principalement de la première au sens où elle intègre - dans le processus de modélisation ou dans le cadre d'utilisation de l'outil - des acteurs concernés par le domaine d'application [VOI 10].

Un cas d'utilisation éprouvé dans ce contexte concerne l'aide à l'aménagement du territoire et en particulier l'aide à la gestion collective de ressources renouvelables. Les acteurs sont en général tout ou partie des personnes concernées par le plan d'aménagement visé et peuvent être impliquées dans la démarche, que ce soit au cours de la conception de la simulation, ou comme utilisateurs de l'outil. Dans ce cas, l'outil sert essentiellement soit de substrat pour l'aide à la recherche de solutions collectives (une forme de carte animée permettant de tester collectivement des scénarios de gestion), soit de médiateur permettant d'éliciter les stratégies de gestion individuelles ainsi que la manière dont elles s'articulent entre elles (typiquement il faut alors envisager l'acteur comme un utilisateur de la simulation, un joueur, qui peut être questionné ensuite sur la ou les stratégies adoptées au cours du jeu).

Ainsi, que ce soit pour le groupe transdisciplinaire ou pour des acteurs de la société impliqués dans un projet collectif, il y a une nécessité d'intégrer plusieurs acteurs (modélisateurs, thématiciens, acteurs de terrain) dans le processus de modélisation et de simulation. Cela implique des enjeux éthiques et déontologiques (comment intégrer la connaissance d'un tiers dans un travail collectif ?), épistémologiques (comment intégrer des chercheurs de disciplines différentes se rattachant à des modes de construction et de traitement de la connaissance différents ?), organisationnels (comment en pratique organiser le travail de modélisation ou de simulation collective ?) et techniques (quels outils peuvent faciliter le travail à plusieurs autour d'un modèle ?). Seuls ces deux derniers points aspects organisationnels, méthodologique et techniques, seront abordés dans ce chapitre. Les lecteurs intéressés par les aspects déontologiques pourront se référer notamment aux travaux sur la modélisation d'accompagnement [COM 05]. Quant aux enjeux liés au travail interdisciplinaire, ils ne seront pas abordés dans la mesure où ils dépassent largement les limites.

Ce chapitre va notamment aborder deux grandes façons de collaborer à plusieurs, autour d'un modèle de simulation :

- faire interagir des utilisateurs/acteurs autour d'une simulation. Nous aborderons dans cette partie l'usage de simulation participative à base de jeux de rôle, ainsi que l'outil Hubnet de NetLogo qui permet de connecter plusieurs ordinateurs à une

même simulation et à leurs utilisateurs d'interagir par ce biais [BLI 05]. Ce type d'application vise un objectif d'aide à la concertation

- faire interférer plusieurs modélisateurs pour mener des expérimentations autour d'un modèle de simulation. Nous présenterons alors la méthodologie PAMS qui permet d'émuler NetLogo sur un navigateur web et offre ainsi la possibilité à plusieurs utilisateurs distants de travailler ensembles de manière synchrone sur le développement d'un modèle et l'analyse de simulations. L'objectif dans ce cas est l'aide au travail collaboratif

6.2. Diversité des approches multi-acteurs en modélisation

6.2.1. *Simulation participative*

Les approches participatives de manière générale impliquent, de manière générale, un dialogue entre acteurs, fondé sur le respect mutuel et la reconnaissance des savoirs de chacun. Afin de faciliter ce dialogue, ou – suivant les approches – de le guider, des outils de concertation de différentes natures peuvent être utilisés. Ces outils servent à élaborer collectivement des supports de connaissances comme par exemple des représentations spatiales (la cartographie de terroir par exemple), des arbres de décision (l'arbre à problèmes par exemple) ou encore des schémas cognitifs (cartographie cognitive). Ces supports de connaissances expriment les représentations « internes » des personnes et servent d'objet intermédiaire [VIN 99], entre les individus. Le dialogue entre les acteurs va alors pouvoir s'organiser autour de cet objet intermédiaire et ainsi être facilité par le fait que l'outil proposé structure, organise et parfois génère de la connaissance. Il s'agit donc d'un dispositif de partage de connaissances et de représentations sur un problème donné.

Lorsque l'outil de partage utilisé est un modèle, on parle de modélisation participative. Bien souvent le recours à un modèle de simulation émane de la nécessité de représenter des dynamiques temporelles ou spatiales. Lorsque la question à traiter implique de multiples interactions entre acteurs et/ou entre acteurs et ressources, on s'orientera vers les outils de modélisation multi-agents. En outre, comme pour toute démarche participative, on distingue différents niveaux d'implication des acteurs, de leur consultation par une organisation publique à la coconstruction de projets et la co-décision. S'agissant de modélisation participative, l'implication des acteurs peut se faire au niveau de l'identification préalable des besoins, de la réalisation du modèle conceptuel, du développement du modèle opérationnel (implémentation informatique ou autre forme d'implémentation), de la définition des indicateurs et des scénarios à tester ou encore au niveau de l'analyse des résultats de la simulation.

Parmi les approches de modélisation participative, la modélisation d'accompagnement – portée par le collectif ComMod (contraction de l'expression

Companion Modelling et servant de sigle officiel) – s'appuie sur une posture scientifique pour cadrer l'utilisation de ces outils auprès des acteurs de terrain et limiter ainsi certaines dérives que l'on rencontre parfois dans les approches participatives telles que la manipulation, la non-prise en compte du point de vue de certains acteurs ou encore l'écart par rapport aux enjeux actuels du contexte d'intervention. Outre un cadre méthodologique, la modélisation d'accompagnement propose une posture éthique définissant les règles et les responsabilités des différents protagonistes du projet. La démarche s'appuie sur trois exigences : une confrontation continue et itérative entre théories et terrains ; l'acceptation de la légitimité et la prise en compte des différents points de vue, éventuellement contradictoires ; la remise en cause du questionnement à chaque nouvel élément introduit dans la démarche [COM 05].

L'objectif d'une opération de modélisation d'accompagnement est soit la production de connaissances (à destination des chercheurs et des acteurs locaux) dans le cadre d'une meilleure compréhension d'un système d'interactions, soit l'appui à une négociation lors d'un processus qui vise explicitement une transformation des pratiques d'interactions avec la ressource ou une transformation des formes d'interactions socio-économiques. Dans les deux cas, la démarche mobilise des outils de modélisation et de simulation pour construire une représentation partagée (ce qui ne veut pas dire unificatrice) du système étudié, mais aussi pour rendre compte de ses dynamiques et fournir un support d'analyse de scénarios. Deux outils de simulation principaux sont utilisés dans les démarches ComMod : les modèles de simulation informatiques et les jeux de rôles. Ces deux dispositifs s'associent : les jeux de rôles sont des simulations – comme leur nom l'indique – où les acteurs jouent un rôle, tandis que les simulations informatiques utilisent des agents virtuels [BEC 10]. L'objectif est de rendre plus clairs et de faire partager les points de vue sur la situation étudiée. En outre, l'utilisation des modèles est réflexive : les acteurs apprennent collectivement en créant, modifiant ou observant les modèles. Ces outils permettent aux acteurs d'émettre des hypothèses, de proposer des scénarios et d'en observer collectivement les conséquences. L'utilisation de ces outils auprès des acteurs se fait de manière itérative et continue au travers d'ateliers participatifs espacés dans le temps (appelés temps fort collectif) et intercalés par des périodes de travail en laboratoire permettant d'analyser la session précédente et de préparer la session suivante [BEC 08]. À ce titre, l'expérimentation présentée dans ce chapitre ne représente qu'un temps fort collectif dans une démarche de modélisation d'accompagnement. Pour plus d'informations sur la modélisation d'accompagnement le lecteur peut se référer à l'ouvrage de synthèse [ETI 10].

6.2.2. Collaboration et Modélisation-Simulation

La culture de projets qui s'est installée dans le paysage de la recherche internationale depuis plusieurs décennies a accru le besoin de faire collaborer des laboratoires et des chercheurs de différentes disciplines, et différentes régions du globe, autour de problématiques complexes. Même si cette situation constitue une opportunité

précieuse pour les chercheurs qui ne bénéficient pas d'un environnement scientifique local suffisamment étoffé (en particulier, les chercheurs de pays en voie de développement), il n'en reste pas moins que l'éloignement géographique, les différences de culture et les éventuels problèmes de langue constituent bien souvent des handicaps qui rendent ces échanges transnationaux et transdisciplinaires moins efficaces que ceux qui peuvent être réalisés lors d'interactions locales.

La collaboration joue un rôle important durant l'ensemble du processus scientifique de modélisation-simulation d'un système complexe. Il est donc nécessaire de disposer de méthodes et d'outils pour modéliser et d'autres pour expérimenter. Ces deux aspects font l'objet des deux sections suivantes.

6.2.2.1. *Collaboration dans la simulation*

Le développement des technologies de l'information ayant eu lieu ces vingt dernières années permet d'envisager de nouvelles méthodes de collaboration qui pourraient résoudre en partie ces problèmes. Elles permettent, entre autres choses : (i) de réunir, au sein d'une même « plate-forme », des chercheurs dispersés dans des laboratoires d'un même pays, voire sur des continents différents ; (ii) de partager des ressources quel que soit leur emplacement ; (iii) de conserver la trace des interactions entre les intervenants ainsi que les versions successives des travaux collectifs. Ainsi, nous abordons le domaine de « l'e-science », problématique qui est aujourd'hui en pleine expansion. Dans ce domaine, il existe pléthore de travaux, de projets et de plates-formes comme : EGEE, GLOBUS, etc [TAY 07, WAN 09]. Ces recherches s'intéressent au partage et à la gestion de ressources informatiques distribuées, plus particulièrement, à la mise à disposition, via les réseaux informatiques, de clusters et de grilles de calcul haute performance. D'autres travaux définissent quant à eux, non plus la ressource matérielle, mais le simulateur comme élément sujet au partage [JAG 10]. Dans ce domaine, il existe, par exemple, KEPLER[BAR 10] ; VLE [QUE 09] et Netlogo hub-net. Ces outils assurent, dans une certaine mesure, le partage des modèles car ils permettent la capitalisation de simulateurs et leur association afin d'en construire de nouveaux. Cependant, il ne s'agit pas réellement d'environnements collaboratifs dans la mesure où ils n'intègrent pas d'outils permettant l'interaction directe entre les utilisateurs. Les WBSG (*Web-Based Simulation Groupware*) comme PAMS [NGU 09] ou BSCW [KOR 08] ajoutent une réelle dimension collaborative en proposant des outils permettant la manipulation « à plusieurs » des simulateurs. Mais une fois de plus, les WBSG se focalisent sur les aspects « simulation » et omettent le processus de modélisation *per se*, pourtant primordial lors de l'étude d'un système complexe social ou naturel.

6.2.2.2. *Collaboration pour la modélisation*

Outre le domaine des systèmes collaboratifs, les plateformes actuelles dédiées à l'étude des SC sont davantage des outils de simulation que des environnements complets de modélisation-simulation, si bien qu'elles ne disposent pas, ou peu, d'outils

de modélisation. Fort de ce constat, les communautés de développeurs qui travaillent autour des plateformes reconnues comme Repast [NOR 13b] ou GAMA [DRO 13] introduisent depuis peu des outils graphiques de modélisation comme, respectivement, Repast-Eclipse IDE, GAMAGraM. Dans le domaine des systèmes multi-agents, de nombreux langages et méthodologies ont été proposés [CHI 13].

Si on peut espérer pouvoir s'inspirer des outils issus du génie logiciel collaboratif (collecticiels) pour concevoir des outils de modélisation et simulation, il faut cependant souligner les particularités des SC, qui font que leur conception diffère du génie logiciel distribué « classique » sur plusieurs points majeurs [GAU 11] :

Variabilité de la démarche de modélisation. Le génie logiciel impose généralement l'utilisation d'une méthodologie fixée et parfaitement définie au début du projet. Dans le monde de la recherche, à l'inverse, même si une méthodologie est fournie, elle est susceptible de varier assez considérablement au cours d'un projet, en particulier parce que l'objet même d'un travail de recherche consiste à accepter l'irruption d'un fait ou d'un développement nouveau et à l'intégrer au projet si nécessaire. Dans ce contexte, les aspects méthodologiques constituent bien souvent un des produits du travail de recherche, au même titre que l'objectif affiché au départ.

Complexité des systèmes modélisés. Contrairement au monde du génie logiciel, les SC ont un fonctionnement interne souvent mal connu des experts. De plus, ces systèmes ont une dynamique si complexe qu'il paraît difficile voire utopique de la représenter au sein d'un modèle intelligible (e.g. analytique) et d'un simulateur donnant les résultats escomptés. En fonction des objectifs de modélisation, différentes échelles de temps et d'espace doivent être considérées, et on intégrera une multiplicité de points de vue.

Richesse des points de vue et des compétences. Les interactions nombreuses entre les chercheurs présentent l'avantage d'offrir une importante richesse de compétences et d'appréciations du système modélisé. En contrepartie, cette richesse est source d'incompréhension car les concepts, le langage et les objectifs sont différents voire parfois antagonistes. Un environnement de modélisation pour les SC doit savoir tirer parti de cette richesse mais de manière maîtrisée.

Validation des modèles. S'il est possible de vérifier localement certaines propriétés d'un modèle, compte-tenu de la complexité des systèmes étudiés, il n'est souvent pas possible d'avoir une validation globale du modèle. Seule une validation par simulation et par explication des comportements observés permet d'estimer la validité des modèles et des simulateurs développés.

Pour résumer, dans le cas d'une activité de modélisation informatique et/ou mathématique d'un système complexe, les chercheurs se trouvent confrontés à de multiples

difficultés : la pluridisciplinarité, la nature distribuée du projet, la complexité du système étudié, le caractère émergent de la démarche de travail. C'est pour permettre aux chercheurs de faire face à ces difficultés que des outils de collaboration à distance doivent être conçus et réalisés. Au-delà de leurs capacités de gestion de projets à distance, ils doivent permettre de prendre en compte les spécificités de la modélisation de systèmes complexes.

6.3. Simuler les jeux d'acteurs et apprendre sur les autres : le système HubNet de NetLogo

6.3.1. La technologie HubNet

La technologie de HubNet permet d'utiliser NetLogo dans un cadre de simulation participative [BLI 05]. En effet, elle propose des protocoles et des moyens de communication entre des utilisateurs et la simulation conduite dans l'environnement NetLogo. Ainsi, des utilisateurs peuvent directement agir sur l'environnement de la simulation à l'aide de terminaux reliés au système.

La mise en place d'une telle activité nécessite l'activation d'un serveur dans la simulation NetLogo que l'on souhaite utiliser, permettant à d'autres terminaux, les clients, de se connecter au serveur via la technologie HubNet et d'agir avec l'environnement qui s'offre alors à eux.

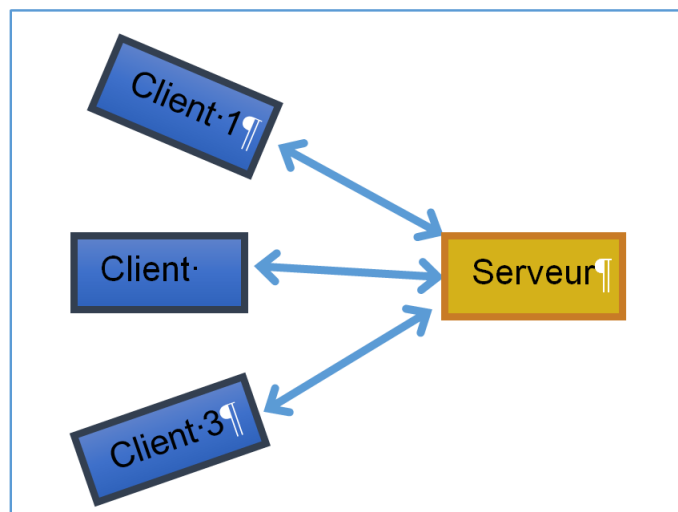


Figure 6.1. Clients et Serveurs

Au niveau du serveur, l'opérateur aura la possibilité, via l'outil *HubNet Control Center*, d'ouvrir une session multi-utilisateurs, d'autoriser la connexion des clients et spécifier si la vue 2D et les traceurs de courbe (*plot*) seront affichés sur les interfaces des clients.

Au niveau du client, l'utilisateur lance le programme *HubNet* de *NetLogo* qui est une application distincte du programme principal de *NetLogo*. Il spécifie dans cette application son nom d'utilisateur, qui sera visible par le serveur, puis indique l'adresse IP ou le nom du serveur, et se connecte. Une fois la connexion établie, l'interface *Client* s'affiche et l'utilisateur peut interagir avec la simulation en cours d'exécution sur le serveur depuis cette interface client.

Le contenu de l'interface client est défini préalablement par le modélisateur à partir de l'outil *HubNet Client Editor*. Cet outil se présente comme l'interface principale de *NetLogo*, permettant de placer et de définir des boutons, des champs, des traceurs, du texte ou une vue sur la zone de travail. Les boutons, curseurs et moniteurs sont spécifiés à l'aide de *tags* et non pas à l'aide de *command* ou de *reporter* comme dans l'interface principale de *NetLogo* (ceux utilisés pour la création, le déplacement, l'ajout ou la suppression directe d'éléments). Ces *tags*, sont des informations envoyées des clients au serveur à l'aide de messages. Plus précisément, lorsqu'un utilisateur exécute une action depuis l'interface client cela envoie au serveur un message qui comporte deux informations : la source (nom du client qui envoie le message) et le *tag* (nom de l'action exécutée sur le client). Les traceurs de courbe (*plot*) et la vue distante sont en fait des objets miroirs d'éléments déjà présents sur l'interface principale. Ainsi, il n'est possible d'ajouter un traceur de courbe sur l'interface client que si ce traceur existe déjà et a précédemment été spécifié au niveau de l'interface principale. L'ensemble des primitives spécifiques à *HubNet* sont disponibles en ligne sur le site de *NetLogo*.

Une fois l'interface client spécifiée, il est alors possible de définir le cadre d'utilisation du dispositif serveur-clients, comme nous allons le présenter dans la section suivante dédiée au le cadre de la simulation participative à base de rôles.

6.3.2. Le cadre de la simulation participative à base de rôles

6.3.2.1. Le concept de rôle et les formes d'apprentissage

La simulation participative à base de rôles est une forme de simulation hybride entre une simulation multi-agents et un jeu de rôles. Dans ce système, certains des agents du système vont être contrôlés par des joueurs humains. Ces agents virtuels « contrôlés » sont donc les avatars des joueurs. Ces derniers peuvent avoir un ou plusieurs avatars ; il n'existe pas de règle à ce sujet. Ainsi dans certaines simulations participatives à base de rôles, un joueur pourra par exemple contrôler l'avatar

de l'agent agriculteur, tandis qu'un autre joueur contrôlera une population d'agents oiseaux qui évoluent sur le territoire agricole représenté par la simulation.

La notion de rôle implique un cadre précis d'interaction entre le joueur et la simulation, et entre les joueurs eux-mêmes. Un rôle se définit par un **objectif individuel**, un ensemble d'**actions possibles** et des **informations à disposition** [BAR 03]. En fonction de ces éléments, le joueur devra définir une stratégie pour atteindre son objectif, collecter de l'information et l'analyser, puis prendre des décisions et choisir de faire telle ou telle action. Les actions qu'il va réaliser au travers de son avatar vont impacter la simulation (les entités virtuelles vont être modifiées). Le nouvel état de la simulation va alors influencer sur les prochains choix des joueurs. Parallèlement aux modifications de l'état de la simulation apportées par les joueurs, la simulation continue de se dérouler, un pas de temps après l'autre, représentant ainsi l'évolution propre des différentes entités virtuelles, qui suivent un ensemble de règles définies par le concepteur du modèle. Ainsi dans une simulation participative à base de rôles, on retrouve deux autres concepts centraux des jeux de rôles, à savoir des **tours de jeu** (équivalents au pas de temps de simulation) et des **règles** (équivalentes aux algorithmes définis par le modélisateur pour simuler les dynamiques propres des entités virtuelles) [BAR 03].

À l'intérieur de ce cadre méthodologique, le concepteur d'une telle simulation pourra alors définir différents modes d'interactions entre les joueurs et la simulation. L'interaction entre les joueurs peut se limiter à l'impact que chacun d'eux a sur les entités virtuelles, y compris sur les avatars des autres joueurs ; à ce moment-là les différents joueurs n'ont pas besoin d'être en présence les uns des autres dans un même lieu. Mais on peut également concevoir un dispositif où les joueurs peuvent interagir directement entre eux, avant ou pendant qu'ils font leurs choix d'action sur la simulation. Un deuxième degré d'interactions vient alors s'ajouter aux interactions entre entités virtuelles.

C'est ce type de dispositif qui suppose donc de rassembler les joueurs dans un même lieu, qui est la plupart du temps employé en modélisation d'accompagnement. La raison en est simple : ce type de modélisation mobilise la simulation participative pour produire de l'apprentissage social, c'est-à-dire de l'apprentissage sur les autres et sur la façon dont nous avons d'interagir avec les autres [ASS 13]. Pour ce faire, l'animateur d'une session de simulation participative va faire vivre à des participants un moment d'interaction avec les autres (en les faisant jouer à la simulation participative), puis il va demander à chacun des participants d'expliquer à l'ensemble de l'assistance ce qu'il a vécu, pourquoi il a pris telle ou telle décision et ce qu'il a appris de cette expérience. Durant ce débriefing, l'animateur joue donc sur l'apprentissage expérientiel des participants, c'est-à-dire ce qu'ils ont « appris en faisant » [PRU 02]. C'est un moment crucial du processus d'apprentissage, car il s'agit d'avoir une analyse réflexive sur son propre comportement et de former de nouveaux concepts qui vont faire évoluer sa façon de voir le monde et voir sa place parmi les autres [ETI 11]. C'est donc parce que la modélisation d'accompagnement cherche à mobiliser cette forme

d'apprentissage, que les sessions de simulation participative se font quasiment systématiquement en présentiel et que les moments de simulation sont systématiquement suivis d'un débriefing qui peut prendre autant de temps, voire plus, que la simulation elle-même.

6.3.2.2. *Mise en place du dispositif et déroulé d'une session*

Concrètement, et une fois le modèle et les interfaces HubNet clientes développées, la mise en place du dispositif nécessite d'avoir autant d'ordinateurs que de rôles prévus, plus un ordinateur qui sera le serveur, puis de connecter l'ensemble des ordinateurs en réseau. Le modèle NetLogo est alors exécuté sur l'ordinateur serveur, l'activité HubNet est démarrée sur le serveur (commande `hubnet-reset`), et le serveur est alors en attente de la connexion des clients.

La personne qui sera en charge de mettre en place ce dispositif et de démarrer le serveur est souvent l'animateur de la session (parfois également appelé maître de jeu par analogie avec le cadre d'utilisation des jeux de rôles). Dans la salle qui accueille le dispositif, l'animateur est donc placé sur le terminal qui sert de serveur tandis que les joueurs sont sur des terminaux clients du serveur. L'animateur aura en charge :

- d'autoriser la connexion des joueurs et de les accompagner durant la session. En effet, une interface est proposée au maître du jeu lui permettant de visualiser la liste des participants, d'en accueillir de nouveaux ou encore d'en rejeter certains. Cette interface autorise aussi le dialogue avec un ou plusieurs participants, permettant de donner des indications individuelles ou collectives

- de contrôler le bon déroulement de la simulation. Il est le maître du jeu qui lancera la simulation quand tous les participants attendus seront connectés, et c'est lui qui en surveillera le fonctionnement. Il peut alors intervenir directement sur l'environnement pour modifier des paramètres, mettre en valeur tel ou tel point ou envoyer des indications aux joueurs par exemple

- d'animer la séance de débriefing qui suit la séance de jeu

Compte tenu des nombreuses tâches de l'animateur, il est parfois utile de prévoir une équipe d'animation, qui se répartit alors les tâches. Par exemple, une personne est en charge de la mise en place du dispositif et des manipulations informatiques tandis que l'autre anime le jeu puis conduit le débriefing. Autre exemple : une personne se charge de la mise en place du jeu, puis l'anime jusqu'à la fin de la partie, tandis que l'autre observe la partie et ne prend la parole qu'après pour animer le débriefing. Ce deuxième cas est intéressant car il permettra à l'animateur du débriefing d'avoir une vue d'ensemble des interactions entre joueurs qui se sont déroulées durant la partie ; ce qui est moins vrai dans le premier cas dans la mesure où il est difficile d'animer la partie et d'observer en même temps son déroulement.

En ce qui concerne les joueurs, leur action est identique à celle des autres agents : l'interface des participants est conçue pour leur fournir les effecteurs et les senseurs

qui sont normalement attribués aux agents de la simulation. Ainsi, les acteurs de cette simulation ont, sur l'environnement, les mêmes capacités que les agents, en termes de connaissance et d'action. Ils sont d'ailleurs représentés dans l'environnement par un avatar virtuel ayant la même représentation, par défaut, qu'un autre agent du système. Il en découle de plus que l'interface fournie aux joueurs n'est là que pour leur permettre de visualiser les informations auxquelles ils ont accès et pour agir sur l'environnement, en fonction de ce qu'ils ont l'autorisation de faire et de leur raisonnement propre. Il faut cependant noter que chaque acteur peut avoir un rôle différent des autres rôles, à l'instar des différents agents au fonctionnement propre. Dans ce cas, l'interface est commune à tous les participants et c'est lors de la conception que l'on autorisera ou non l'accès à certains blocs de cette interface. Encore une fois, les acteurs d'une simulation participative sont à l'image des agents et c'est au niveau de l'implémentation que seront mis en œuvre les moyens autorisant, ou n'autorisant pas, telle ou telle action ou information pour les acteurs. Dans certains dispositifs, il est également prévu, que les joueurs puissent voir, en plus de leur interface client, l'interface principale qui est sur le serveur. Cela est utile lorsqu'on veut donner à voir aux joueurs des informations qui ne peuvent pas être affichées sur l'interface cliente et que l'on veut que cette information soit de caractère public (c'est-à-dire accessible par tous). Dans ce genre de cas, durant la mise en place du dispositif, l'animateur aura alors pris soin de brancher l'ordinateur serveur à un vidéoprojecteur pour afficher au mur une vue de l'interface principale du modèle.

Le déroulé d'une session se fait en trois temps. Un premier temps de mise en place, connexion des clients au serveur et explication des règles. C'est également pendant ce temps-là, que les rôles seront attribués et que les joueurs vont pouvoir se familiariser avec l'interface informatique. Il est d'ailleurs souvent utile d'introduire un « tour à blanc » c'est-à-dire un moment où les joueurs vont pouvoir essayer différentes actions proposées par leur interface et voir ce que cela produit sur la simulation. Une fois ce tour à blanc effectué, la simulation est réinitialisée et la partie peut commencer. La partie de jeu correspond au deuxième temps de la session. Elle peut débiter par un moment où chacun des joueurs se présente oralement aux autres en fonction de son rôle. Cela permet d'accentuer la sensation d'incarner un rôle tout en brisant la glace, car les joueurs ont souvent tendance à caricaturer un peu leur rôle durant cette présentation publique, ce qui ne manque jamais de faire rire et de générer une ambiance plus détendue. Puis l'animateur lance le premier tour et indique le temps disponible aux joueurs pour réfléchir, échanger avec les autres et réaliser leurs actions. Une fois le tour terminé, l'animateur va faire avancer la simulation d'un pas de temps au niveau du serveur et cela marque la fin du tour de jeu. Au début du tour suivant, les clients vont découvrir le nouvel état du système et vont réfléchir à de nouvelles actions. Cette séquence se reproduit autant de fois que l'animateur a prévu de tours de jeu. Le nombre de tours total est d'ailleurs la plupart du temps annoncé en début de partie par l'animateur. Lorsque le dernier tour de jeu se termine, on passe alors au troisième

temps de la session qui est le débriefing. Il commence généralement par la consultation des résultats des parties, que l'animateur demande à chacun des participants de commenter. Les résultats peuvent prendre la forme de courbes, de scores simulés ou d'une carte au travers de la vue 2D de l'interface principale. Puis, l'animateur organise un tour de parole durant lequel chacun des participants est invité à s'exprimer sur la stratégie qu'il a suivie durant la partie, les contraintes qu'il a rencontrées (liées à son propre rôle ou aux interactions avec les autres joueurs) et les changements de stratégie qu'il a dû opérer durant la simulation. Les autres participants pourront réagir aux explications données et la discussion qui s'engage est alors susceptible de produire de nouveaux apprentissages quant à la manière dont l'autre ressent l'influence de ses propres actions. Le débriefing se termine souvent par un dernier tour de parole à propos des solutions à apporter aux différents problèmes rencontrés, que ce soit des problèmes de coordination entre joueurs, de priorisation des différents objectifs poursuivis et enjeux ou d'inadéquation entre les différents rôles/joueurs sur la façon de voir le système et son fonctionnement.

Nous allons à présent voir un exemple concret de dispositif de simulation participative à base de rôles, par le biais de l'expérience SimPAGE qui s'est déroulée dans le cadre d'un partenariat entre EDF R&D et le laboratoire IRIT de Toulouse sur une problématique de gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Adour-Garonne dans le sud-ouest de la France.

6.3.3. *L'application SimPAGE – l'apprentissage au travers de la simulation participative*

La problématique de l'expérimentation SimPAGE est la **gestion des étiages estivaux** (du 1er juillet au 31 octobre) sur le bassin Adour-Garonne en Midi-Pyrénées. Sur ce grand bassin hydrographique du sud-ouest, le phénomène de rareté occasionnelle de l'eau s'est accentué depuis plusieurs décennies sous la pression de deux tendances. D'une part, entre 1985 et 1995, la superficie des surfaces irriguées a fortement augmenté malgré une amélioration des équipements pour l'irrigation. D'autre part, l'offre en eau tend à se raréfier certains étés avec un réchauffement climatique constaté. Dans ce contexte, des Débits Objectifs d'Etiage (DOE) et des Débits de Crise (DCR) ont été définis. Le DOE correspond à un niveau de satisfaction de l'ensemble des besoins en garantissant le bon fonctionnement du milieu aquatique. Le DCR est une valeur au-dessous de laquelle sont mises en péril l'alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu. L'objectif en termes de gestion quantitative est le respect des DOE 8 années sur 10. Pour atteindre cet objectif, il existe un plan de gestion commun aux différents acteurs ainsi que des mesures de restrictions. Ce sont les préfets de département qui peuvent prendre des arrêtés de limitation ou de suspension provisoire des usages de la ressource en cas de risque de pénurie d'eau.

Afin de faire réfléchir collectivement au sein de EDF R&D à cette thématique et aux interdépendances entre acteurs liés à l'enjeu de conservation du débit minimum d'étiage, un projet de développement et d'utilisation d'une simulation participative à base de rôles a été mis en place. Les objectifs pour EDF R&D étaient :

- de développer une plateforme intégrant les différents aspects ressource-usages-gestion et permettant de simuler des scénarios prospectifs
- d'analyser la dynamique de comportements d'acteurs en utilisant la simulation participative comme un laboratoire d'expérimentation sociale
- d'évaluer les potentialités de l'outil comme support pour la formation des acteurs de l'eau (en interne EDF comme en externe) afin d'améliorer la compréhension des points de vue des différents usagers de la ressource et de leurs difficultés d'interaction.

Nous allons à présent décrire cette expérience en commençant par le modèle multi-agents qui a été développé, puis par les sessions de simulation participative qui ont été organisées, et enfin en décrivant les apprentissages qui ont pu être observés durant ces sessions.

6.3.3.1. *Le simulateur multi-agents*

6.3.3.1.1. Le modèle de l'environnement

Le modèle de l'environnement retenu concerne donc les bassins versants de Portet, Roquefort, Foix et Montréjeau. Afin de décrire cet environnement à partir d'un Système d'Information Géographique (SIG), les étapes suivies sont :

- tracer tout d'abord les délimitations des différents bassins versants considérés
- importer les délimitations des cantons de chacun des bassins versants
- déterminer leur centroïde et lui associer la surface irriguée du canton correspondant ainsi que sa consommation en eau potable
- positionner les barrages et retenues existants
- positionner les points de prélèvements en eau potable
- positionner les points de prélèvements pour l'usage irrigation
- importer le tracé des rivières.

Le modèle hydrologique des rivières a été ensuite réalisé sous la forme d'un réseau hydrographique. Chaque nœud de ce réseau correspond soit à des confluences de rivières, soit à des points de captage (eau potable ou irrigation). Une fois ces points positionnés, le réseau hydrologique a été reconstruit de proche en proche en liant les nœuds du réseau. Cette approche permet de limiter la complexité du réseau aux seules données disponibles et utiles dans le modèle. La dynamique d'écoulement a été modélisée sous forme d'un flux circulant au travers de ce réseau, prenant une source unique fictive en amont et se déversant vers un exutoire commun. De plus, une fonction permettant de simuler l'évapotranspiration au sein du réseau a été ajoutée.

Concernant la série climatique, un modèle linéaire a été utilisé. Il conduit à agréger les apports diffus du bassin dus à la pluviométrie en une source unique qui entre en amont au niveau des Pyrénées à chaque tour du cycle hydrologique. Le modèle a été calibré en utilisant des données issues de l'Agence de l'eau Adour-Garonne qui correspondent à la moyenne du débit de la Garonne sur plusieurs années avec l'écart maximum et minimum.

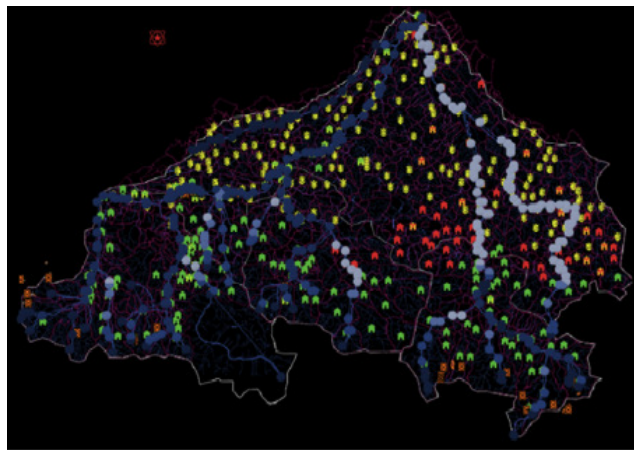


Figure 6.2. Représentation de l'environnement dans le modèle, les points de captage eau potable sont représentés par des maisons vertes, les points de captage irrigation par des blés jaunes et retenues par des symboles orange. Les nœuds du réseau hydrologique sont représentés sous la forme de ronds bleus et le réseau lui-même est représenté sous forme de liens entre ces nœuds)

6.3.3.1.2. Le modèle des agents

Les catégories d'agents retenues pour ce modèle sont au nombre de 5 : les irrigants/agriculteurs, les hydro-électriciens, les industries, les agents liés à l'exploitation de l'eau potable et un préfet qui représente les autorités administratives du bassin. Le rôle et les actions de chacun d'entre eux sont décrits dans le tableau suivant.

Dans le cadre de cet ouvrage nous ne décrivons pas l'ensemble du modèle des agents mais nous nous limiterons à celui de l'agent irrigant. Nous invitons le lecteur avide de plus amples informations concernant ce modèle à se référer à la bibliographie [BRA 10].

Les agents irrigants représentent des entités de gestion uniformes à l'échelle du canton. Chacun prend des décisions de prélèvement d'eau au niveau du tronçon de

Préfet	L'autorité qui peut intervenir pour donner une politique de consommation de l'eau en vue de préserver les droits de chacun et l'environnement.
irrigants	Ils doivent irriguer leurs champs. Ils contrôlent une zone qui nécessite de l'eau et ils ne peuvent en capter que dans les rivières proches.
Hydro-électriciens	Ils gèrent l'écoulement de l'eau pour produire de l'électricité. Ils possèdent des barrages avec une certaine capacité et des valves pour réguler le flux d'eau vers l'aval.
Agents d'exploitation de l'eau potable	Ils prélèvent de l'eau pour les besoins civils. Ils prélèvent de l'eau pour les besoins civils. Ils ont connaissance des besoins sur leur zone et prélèvent dans les rivières.
Industries Industries	Ils utilisent l'eau pour la fabrication et leur niveau de production dépend du volume prélevé dans les rivières.

Tableau 6.1. Description des objectifs et actions des agents

rivière le plus proche du canton et des décisions d'irrigation (volume et calendrier). Leur comportement est adaptatif c'est-à-dire qu'il évolue en fonction de l'état de l'environnement qui l'entoure.

		Niveau de la ressource (Incertitude)	
		En baisse	Stable ou en hausse
Niveau de production (enjeu de la décision)	En baisse	L'agent cherche une solution alternative , il adopte un des comportements qui marchent dans son voisinage sinon il expérimente (comportement aléatoire).	Comportement rationnel , l'agent suit alors les recommandations techniques, ici la courbe de besoin en eau du maïs.
	Stable ou en hausse	L'agent regarde ce que font ses voisins et agit en imitant le comportement majoritaire .	Pas de remise en cause de comportement. L'agent se comporte comme d'habitude.

Tableau 6.2. Comportement des agents irrigant/agriculteur en fonction de l'incertitude créée par le niveau actuel de la ressource, et de la différence entre les niveaux de production espérés et obtenus

C'est ainsi que l'on voit au travers de l'illustration de l'implémentation de l'agent irrigant que le modèle incorpore des règles et des algorithmes permettant à l'agent d'évoluer de manière autonome dans la simulation. Il en va de même pour les autres agents de la simulation. Lorsque le modèle va être utilisé dans le cadre d'une simulation participative, l'animateur pourra alors déclarer pour une session de jeu, quels agents doivent agir de manière autonome (en fonction des règles implémentées) et quels sont ceux qui seront contrôlés par des joueurs.

6.3.3.2. *La simulation participative SimPAGE*

6.3.3.2.1. Les rôles et l'immersion des participants dans la simulation

Les participants peuvent endosser le rôle d'agriculteurs, d'hydro-électriciens, de gestionnaires d'eau potable, d'industriels ou de préfet. Comme il existe en réalité une multitude d'agriculteurs sur le bassin Adour Garonne, la simulation a été développée de manière à ce que lorsqu'un joueur contrôle l'un des agents-avatars agriculteurs de la simulation, alors les autres agents-agriculteurs de la simulation vont adopter un comportement d'imitation par rapport à celui du joueur (voir tableau 6.2).

L'immersion des participants dans le jeu de rôles est une composante importante à prendre en compte lors d'une simulation participative car elle va influencer la qualité des interactions sociales qui se déroulent entre les participants. La façon de procéder à cette immersion dépend fortement du contexte et de l'enjeu étudiés. Pour l'étude de cas Adour-Garonne, comme pour la plupart des cas liés à la gestion des ressources communes renouvelables, deux types d'objectifs doivent être envisagés : individuel et collectif, qui peuvent éventuellement être contradictoires [OST 94]. Ces deux niveaux ont dû être représentés explicitement dans la mise en place du jeu de rôles. Afin de faire prendre conscience aux participants des enjeux de gestion de l'eau à l'échelle du bassin (objectif collectif), la session de jeu commence par un diaporama affichant des photos de différentes utilisations de l'eau et des conditions de ressources (par exemple les rivières en période d'étiage). De plus, l'interface principale du modèle est projetée au mur et chacun peut s'y référer durant la partie. Elle affiche des informations communes à l'ensemble des joueurs (niveau d'eau dans la rivière, pluviométrie etc.). Enfin, des annonces publiques sont faites tout au long de la partie à propos de l'évolution des conditions hydrologiques dans le bassin. Ces différents éléments contribuent à rappeler aux joueurs les implications collectives de leurs décisions individuelles. Pour ce qui est de l'immersion des joueurs dans leur rôle individuel, la disposition de la salle et les fiches de rôles sont importantes. Ainsi, les participants sont assis à des pupitres séparés (chacun dispose d'un ordinateur face à lui pour interagir avec la simulation) et ont reçu une feuille de rôle individuel. Ces fiches fournissent des informations sur les objectifs du joueur (par exemple retenir l'eau pour le rôle de producteur hydroélectrique), les moyens de remplir ses objectifs (par exemple, les sources d'eau pour le rôle de l'agriculteur, la mise en place d'une réunion pour le rôle de préfet), ainsi que figures et tableaux synthétisant les aspects techniques liés à un rôle (par exemple la courbe de remplissage des barrages hydroélectriques). Ainsi, la feuille de rôle vise à immerger le joueur dans un rôle spécifique et à fournir des orientations à travers un ensemble de règles et d'options pour qu'il puisse prendre des décisions.

L'interaction des joueurs avec le modèle informatique passe par des interfaces informatiques personnalisées qui fournissent des informations supplémentaires (conditions de ressources locales) et permettent aux joueurs d'entrer dans leurs décisions à chaque tour.

Hydroélectricien

Félicitations !! Vous voici en charge des barrages hydroélectriques des bassins de Portet, Foix, Roquefort et Montrejeau en Midi-Pyrénées. Un parc de ___ usines hydroélectriques ayant un rôle stratégique pour EDF : celui d'assurer une production continue de courant, notamment durant l'hiver.



Pour cela, la période estivale est un moment crucial car vous devrez parvenir à remplir les retenues hydroélectriques (en prévision des importants besoins de production de l'hiver) alors même que les débits des rivières alimentant les barrages sont au plus bas.



En outre, une partie du volume d'eau stockée par les retenues hydroélectriques (51 millions de m³ pour toute la période) est réservée au soutien d'étiage en aval des barrages. Ce volume doit permettre d'assurer le débit objectif d'étiage (DOE) à la station de Portet qui est de 52 m³/s. La préfecture peut à tout moment vous demander de procéder à des lâchers de soutien d'étiage dans la limite de cette réserve.

Voici à titre indicatif la courbe de remplissage optimum des retenues délivrée par la direction d'EDF pour la période correspondant aux 8 tours de jeu (de juillet à octobre - chaque tour de jeu représentant une quinzaine).



Votre objectif pour la partie est de parvenir à atteindre un taux de remplissage supérieur à 72% à la fin des 8 tours de jeu.

Pour cela, à **chaque tour de jeu**,

- vous aurez des informations concernant le volume d'eau total (m³) dans les retenues hydroélectriques exprimé (1) et le débit (m³/s) à la station de Portet (D) ;
- et vous devrez choisir un débit de sortie moyen pour les retenues hydroélectriques (3), ainsi que le niveau de captage effectué sur les rivières en amont pour alimenter vos retenues (4). Ce dernier est exprimé en pourcentage du débit en amont.

Le bouton **Calculer** vous permet de calculer le volume total des retenues que vous obtiendrez à partir du débit de sortie choisi. Lorsque les valeurs vous conviennent, cliquez sur le bouton **Lâcher** pour valider votre décision pour le tour de jeu en cours.

Figure 6.3. Exemple de fiche de rôle.

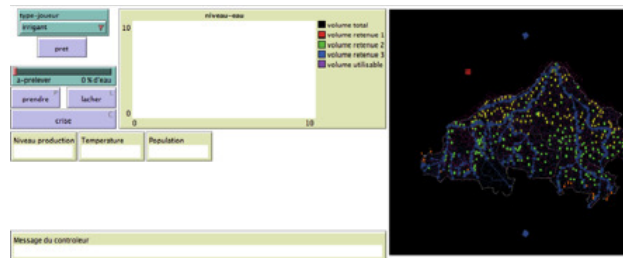


Figure 6.4. Interface cliente de chaque rôle.

6.3.3.2.2. Déroulement d'un tour de jeu

Une fois l'environnement mis en place, les fiches de rôles distribuées et les joueurs prêts, la simulation démarre. Une itération de la simulation passe systématiquement par les mêmes étapes :

- les agents irrigants, industriels et gestionnaires d'eau potable indiquent la quantité d'eau qu'ils souhaitent prélever pour la prochaine décade
- la simulation déroule un tour de jeu (1 tour de jeu = 1 décade) en prenant en compte ces indications et simule dix jours réels : avancée des cultures, niveau de production, satisfaction des consommateurs d'eau potable ainsi que d'autres dynamiques
 - durant cet intervalle de temps, l'agent préfet surveille le débit dans les différents cours d'eau et lève une alerte le cas échéant
 - à tout instant, en fonction des scénarios que l'on souhaite tester par la simulation, un agent ou un joueur hydro-électricien peut décider de relâcher une partie de l'eau disponible en retenue pour soutenir l'étiage
 - le modèle hydrologique retenu nous permet de contourner le problème d'avoir à appliquer une règle de partage de l'eau, chaque acteur ayant accès à des points de prélèvements différents et une dynamique d'écoulement de l'eau non consommée ayant été mise en place d'un point de prélèvement à un autre
- la simulation reprend pour la décade suivante, tant que la période d'étiage n'est pas terminée.

Pendant les huit tours du jeu, les joueurs sont libres d'élaborer une stratégie qui peut soit tenter de conjuguer les objectifs individuels et collectifs, soit suivre un chemin plus individualiste. Le rôle de préfet bénéficie d'une orientation collective plus évidente car son objectif individuel dépend directement des décisions des autres rôles. Il est également le seul à avoir le droit de solliciter tous les participants pour une réunion collective.

6.3.3.2.3. Sessions réalisées et enregistrements des résultats

La simulation participative SimPAGE a été élaborée et déployée dans le cadre d'un partenariat avec EDF R&D. C'est au sein de l'entreprise que des sessions de jeu se sont déroulées. A l'occasion de chaque session, un certain nombre d'enregistrements ont été réalisés afin de pouvoir analyser par la suite ce qui s'est déroulé durant la partie et les apprentissages induits. Quatre méthodes d'enregistrements ont été utilisées :

- un enregistrement automatique de toutes les manipulations effectuées sur l'interface personnalisée (y compris des commentaires que les participants peuvent taper pour expliquer les raisons des décisions qu'ils prennent)
- un enregistrement vidéo des moments où le joueur Préfet provoque une réunion de concertation entre tous les joueurs pour discuter de la gestion collective de l'eau
- la mise en place d'une personne en charge d'observer les attitudes et les interactions des participants pendant toute la session

- et enfin, un enregistrement audio du débriefing du jeu au cours duquel les participants sont invités à expliquer les raisons de leurs décisions.

C'est à partir de ces enregistrements que nous avons réalisé une analyse ex-post des apprentissages induits.

6.3.3.3. *Les apprentissages induits*

6.3.3.3.1. Apprentissage sur les contraintes et les impacts individuels

Les sessions ont permis aux participants de mieux comprendre les difficultés auxquelles les usagers de l'eau font face en essayant de satisfaire leurs besoins en eau. Par exemple les participants ayant joué le rôle d'agriculteur ont dû adapter leurs décisions à plusieurs reprises pendant les parties afin d'atteindre leur objectif de production. Une des raisons est qu'ils avaient à comprendre les aspects techniques de ce rôle (aucun des participants n'avait d'expérience pratique en agriculture). La deuxième raison est qu'ils devaient prendre en compte les décisions des autres utilisateurs de l'eau. Un autre exemple est le cas du rôle de gestionnaire d'eau potable pour lequel l'un des participants s'est plaint aux autres participants que ses actions n'avaient que peu ou pas d'impact sur le système. La pertinence d'avoir ce rôle dans la simulation participative était donc remise en question. [BAR 07] suggèrent que les rôles ayant peu d'impact sur le système ne soient pas intégrés dans une simulation participative en raison du manque d'intérêt pour les participants. Pourtant, dans ce cas un tel rôle est utile car il leur permet de prendre conscience d'une réalité qui est le faible impact de l'eau potable par rapport aux usages de l'eau. En outre, le jeu de rôles met en évidence la dualité entre les objectifs individuels et les intérêts collectifs. Les acteurs ont parfois des difficultés lorsqu'ils tentent de répondre aux deux à la fois. Le rôle du gestionnaire de barrage hydro-électrique illustre très bien ce problème. Pendant les sessions, le participant ayant ce rôle devait produire de l'énergie (et pour cela, il fallait remplir les barrages) et dans le même temps il devait suivre les demandes du joueur Préfet, qui lui demandait de libérer de l'eau afin de maintenir un niveau d'eau minimal en aval. Même si les participants étaient tous employés d'EDF, et que ceux qui incarnaient le rôle de gestionnaire de barrage avaient des compétences en gestion de barrages, la difficulté de faire correspondre l'objectif de production d'électricité et celui de maintien du Débits Objectifs d'Etiage (DOE) a suscité de nombreux débats et des négociations parfois musclées.

6.3.3.3.2. Apprendre sur les interactions entre acteurs et les relations de pouvoir

Le cas du gestionnaire de barrage mentionné ci-dessus illustre ainsi comment la manière dont la simulation participative fait ressortir les relations de pouvoir entre les différents rôles. Par exemple au cours d'une session, le participant ayant le rôle de préfet a fait beaucoup d'efforts pour convaincre le gestionnaire de barrage de libérer les quantités d'eau fixées, non seulement en utilisant divers arguments techniques mais également en utilisant son statut d'autorité de l'État pour imposer

ses choix. Cette négociation s'est déroulée durant la réunion de concertation entre participants organisée en milieu de partie ainsi que lors des discussions en face-à-face. Ce même joueur Préfet a tenté d'appliquer la même stratégie avec les joueurs Agriculteurs, mais sans succès cette fois-ci. Ainsi, cet exemple illustre la façon dont la simulation participative permet de révéler des relations de pouvoir et d'apprendre à ce propos. Durant une autre session, nous avons simulé un scénario de changement climatique afin de renforcer la difficulté pour le gestionnaire de barrage à maintenir un niveau d'eau minimal. Cela a également eu pour effet d'accroître les tensions et les relations de pouvoir entre les participants. Par ce biais (en ajustant les paramètres de la simulation) il est donc possible d'orienter le déroulé d'une session et de porter l'attention des participants sur des aspects particuliers tels que les processus de négociation par exemple. En résumé, la simulation participative induit un processus d'apprentissage individuel sur les contraintes auxquels chaque utilisateur doit faire face, sur la non-trivialité de faire correspondre des objectifs différents, ainsi que sur l'importance des relations de pouvoir dans les processus de négociation. Sur ce dernier aspect, l'expérience SimPAGE a été particulièrement utile pour révéler aux participants à quel point les décisions collectives ne sont pas seulement conditionnés par des critères techniques, mais aussi par la pression sociale, les relations de pouvoir et les processus de lobbying. La simulation participative devient alors une arène où les interactions des parties prenantes se produisent et peuvent être observées. Le participant joue un rôle, mais en raison de la distance à la réalité apportée par la simulation, il est également un observateur des interactions sociales [DAR 03].

6.4. Echanger et confronter des connaissances : le portail collaboratif PAMS

L'expérience montre que les échanges réalisés lors d'une activité de modélisation-simulation sont, le plus souvent, réalisés au travers d'une multitude de petits outils indépendants. L'utilisation d'outils de messagerie instantanée et/ou de visio-conférence est la manière la plus simple de communiquer. Les participants échangent alors par la voix ou le texte si bien que, chacun de son côté, réplique le modèle ou exécute le simulateur. Afin d'éliminer tout problème de compréhension et de distorsion, l'utilisation d'outils de partage d'écran et/ou de contrôle à distance est souvent une nécessité. PAMS (portail collaboratif d'aide à la modélisation-simulation) est une des rares initiatives introduisant la collaboration au centre du processus de modélisation-simulation. L'originalité de cet outil est de placer le simulateur au centre de la collaboration. Il devient alors support et média d'échange, objet partagé par le groupe de chercheurs. PAMS permet donc aux chercheurs de travailler collectivement sur un simulateur en manipulant, configurant (en particulier en modifiant les paramètres d'entrée), lançant la simulation et en analysant collectivement les résultats.

6.4.1. Partager la simulation PAMS

PAMS supporte plusieurs plateformes de simulation génériques dont Netlogo [NGU 09]. L'architecture de PAMS a l'avantage d'être modulaire et permet donc d'intégrer facilement de nouvelles plateformes de simulation (comme Repast [CHA 09] par exemple) ou des simulateurs *ad hoc*. En plus de l'outil principal de collaboration autour du simulateur, PAMS fournit également tous les outils de collaboration génériques classiques et essentiels pour communiquer facilement (chat, visio-conférence, forum...).

PAMS est basée sur des technologies gratuites et open-sources. En particulier, nous utilisons OpenMeeting¹ pour gérer les outils collaboratifs synchrones tels que la vidéo, le chat et asynchrones tels que les forums, la gestion de fichiers partagés... Il offre l'avantage de pouvoir être intégré dans la plupart des CMS (Content Management System ou Système de Gestion de Contenu) tels que SPIP² qui eux géreront l'interface web.

D'un point de vue technique, PAMS utilise une combinaison de technologies standards des applications web : un serveur d'application web basé sur JSP, AJAX et des Servlets (sur un serveur Tomcat), un serveur d'application basée sur des composants distribués (des Entreprise Java Bean (EJB) sur un serveur Jonas) pour notamment exécuter les simulations et un serveur de base de données MySQL pour enregistrer les résultats. PAMS a été développé avec le souci d'une architecture modulaire afin d'être étendu facilement. L'architecture est détaillée dans [TRO 09].

Pour les plateformes existantes dans PAMS (et notamment NetLogo et GAMA) il suffit d'uploader son modèle sur le serveur de PAMS via une interface web dédiée. En ce qui concerne de nouveaux simulateurs, ils sont facilement intégrables s'ils respectent une certaine architecture, c'est-à-dire qu'ils disposent tous d'action pour initialiser la simulation, passer au pas de simulation suivant, récupérer ou fixer la valeur des paramètres et variables locales du simulateur. Ils doivent donc respecter le méta-modèle proposé par.

6.4.2. Exemple d'application : le projet MIRO

Pour rappel (voir le chapitre 1.6), le projet MIRO (financement PREDIT 2004-2007, ANR 2009-2013, MEDDE 2014-2015) vise à explorer, par simulation informatique, les impacts possibles de politiques urbaines sur l'accessibilité spatio-temporelle des citoyens à la ville et leurs conséquences sur leur mobilité quotidienne. Il vise

1. <http://openmeetings.apache.org>

2. <http://www.spip.net>

également à établir des diagnostics territoriaux (pertes et gains d'accessibilité localisés) et sociaux (populations avantagées et désavantagées par les différentes politiques testées).

Il permet enfin d'explorer les possibles impacts globaux de modifications de comportements individuels, moins centrés sur la maximisation d'une utilité individuelle et prenant davantage en compte des enjeux globaux.

Dans cette perspective, trois modèles ont été développés (voir figure 6.4.2).

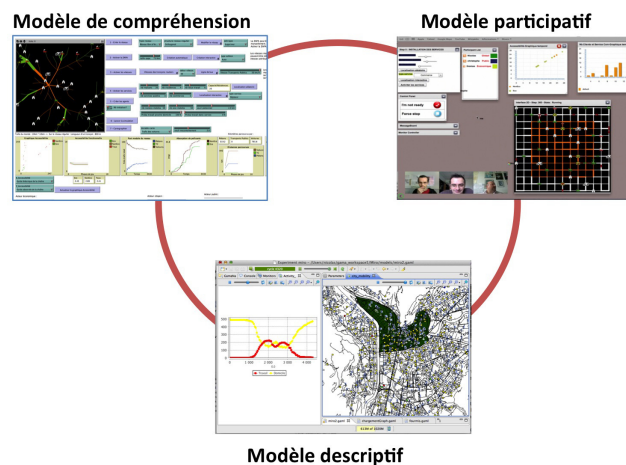


Figure 6.5. Les 3 modèles développés au sein du projet MIRO

GaMiroD est un modèle descriptif qui a été appliqué aux villes de Dijon et de Grenoble. Ce modèle a été développé au sein de la plateforme GAMA [DRO 13]. L'objectif de ces deux études de cas était de pouvoir tester des scénarios impliquant un changement dans l'environnement urbain en rapport avec des actions de politiques publiques locales encouragées par des objectifs de développement durable (construction d'une infrastructure de Transport Collectif en site propre ; mise en place d'une zone urbaine avec régulation du trafic en vue de réduire les effets de pollution).

En parallèle, le modèle SMARtAccess est développé avec la plate-forme Netlogo. Il s'agit d'un modèle de compréhension permettant à l'utilisateur de construire une ville, d'y localiser des services commerciaux et universels, ainsi que des lieux de travail et de résidence, puis de le peupler d'agents autonomes réalisant des chaînes d'activité au moyen de différents modes de transport (marche à pieds, transport public, voiture). L'objectif est alors pour l'utilisateur de tester des modèles urbains (ville

compacte, villages urbains, etc.) mais également de définir, de manière itérative et interactive et en s'appuyant sur un grand nombre d'indicateurs macroscopiques et microscopiques, des configurations urbaines satisfaisant certains critères de durabilité. L'objectif de ce jeu est d'amener les utilisateurs à prendre conscience de la difficulté de piloter un système urbain complexe, qui plus est lorsque l'on cherche à atteindre plusieurs objectifs, dont certains sont mutuellement incompatibles.

Le modèle SMARTAccess a été déployé sur la plate-forme PAMS en vue d'en proposer une version participative et multi-acteurs. Via une interface web (cf. Figure 6.4.2), cette version du modèle (appelée SM^2A^2) permet à cinq personnes de jouer de manière collaborative pour identifier dans le cadre de scénarios communs. Chacun des participants assume un rôle (Aménageur, transporteur, citoyen etc) et ne peut intervenir que sur une partie du modèle et l'environnement créé dans le cadre son rôle (par exemple le joueur « Aménageur » définit le réseau routier, la Zone d'Action Prioritaire pour l'air, etc.). L'objectif de ce jeu sérieux est d'amener les acteurs à prendre conscience de la difficulté d'agir de manière sectorielle sur un système complexe, animé d'une dynamique propre et soumis aux actions non coordonnées mais interdépendantes d'autres acteurs.

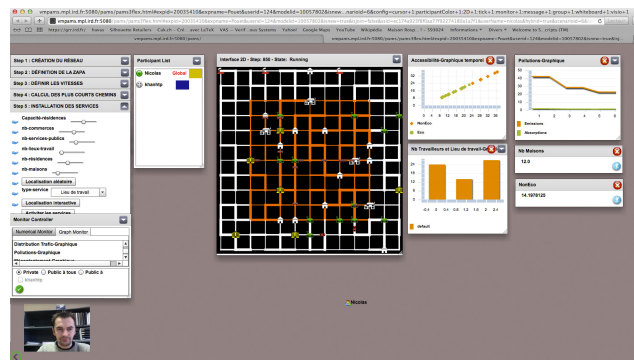


Figure 6.6. Smart Access déployé sur le portail PAMS (SM^2A^2).

SM^2A^2 a fait l'objet de nombreuses expérimentations menées auprès d'étudiants de master, de chercheurs et de professionnels de l'urbanisme, de la mobilité et des systèmes de transport.

6.5. Les enjeux auxquels peuvent répondre les modèles multi-acteurs

Nous venons de parcourir deux grandes familles de modélisation et simulation multi-acteurs : la simulation participative et la modélisation/simulation collaborative. Nous clôturons ce chapitre en décrivant la manière dont ces outils permettent

de répondre à trois grands enjeux de la recherche dans le domaine de la modélisation multi-agents.

6.5.1. Révéler des comportements et co-construire des modèles

La simulation participative permet d'observer le processus et la dynamique du comportement d'un joueur humain (dans ses dimensions sociologiques, cognitives et psychologiques). En effet, il est possible de suivre l'évolution des logiques derrière ses actions et son raisonnement en analysant ses opérations sur l'ordinateur, ses échanges oraux avec d'autres joueurs, son comportement lors des discussions collectives et ses choix individuels. Il est alors possible d'établir des hypothèses sur les comportements individuels ou collectifs liés à la façon dont la situation évolue. Cet aspect prospectif peut ensuite être utilisé pour établir des stratégies collectives qui vont pouvoir être testées au travers de la simulation. La simulation participative agit donc à la fois comme un révélateur des comportements individuels et comme un lieu d'expérimentation et de mise en place de stratégies construites dans l'interaction avec les autres.

6.5.2. Des outils favorisant l'interdisciplinarité

La simulation participative semble être fédératrice et encourage une intégration des différentes compétences et disciplines. Le jeu de rôles permet d'impliquer dans un dispositif commun des acteurs avec des profils différents (agriculteur, gestionnaire de barrage, etc.). Dans une perspective plus large, le développement d'une application comme SimPAGE a d'abord nécessité d'intégrer les connaissances d'experts sur la modélisation du réseau d'eau, puis d'utiliser les compétences informatiques afin de développer une plateforme de simulation et enfin d'utiliser les connaissances des sciences sociales pour définir un cadre participatif et analyser les résultats des simulations participatives. Lors des sessions de simulation participative ces participants ont découvert la plateforme intégrée et le travail effectué par chaque participant du projet. Un processus d'apprentissage interdisciplinaire s'est alors produit. Chaque scientifique a pris le temps de comprendre le travail des autres et d'expliquer son propre travail. Des discussions sur l'approche méthodologique ont eu lieu à propos de certaines incohérences du modèle liées aux interdépendances entre disciplines. Comme les participants jouaient le rôle des différents acteurs du système, chacun pouvait s'approprier l'outil en interagissant avec l'ordinateur et pouvait voir les conséquences de ses décisions sur la part du système qu'il avait développé. Dans le cas de l'expérimentation SimPAGE, le processus d'apprentissage collectif a donc aussi été un moyen de valider le modèle ou d'en détecter les limites.

6.5.3. Médiation et formation

La simulation participative est un dispositif technologique particulièrement efficace pour produire des échanges entre les participants. Il offre un cadre favorable pour le partage des connaissances et l'action collective [BEC 10]. Ainsi, l'utilisation de ce type d'outils dans la cadre de formations auprès de professionnels (industriels, gestionnaires de l'environnement, élus) est tout à fait envisageable. Lorsque la simulation participative est utilisée auprès d'une seule catégorie d'acteurs (auprès d'un groupe de gestionnaires de barrage), les sessions peuvent être un bon moyen de faire prendre conscience des impacts de leurs décisions sur la ressource en eau et les autres usages de l'eau. Lorsque les sessions sont organisées auprès d'un groupe de professionnels mixtes dont les intérêts peuvent être contradictoires, la simulation participative peut faciliter et améliorer l'échange d'informations entre les parties prenantes, en comparant leurs perceptions et en montrant de manière explicite les différentes logiques d'actions.

De même, au cours de l'élaboration collaborative d'un modèle, un processus d'apprentissage a lieu entre les participants impliqués : chaque spécialiste de sa discipline apporte une partie de la solution au problème et peut acquérir une meilleure compréhension des autres disciplines scientifiques (sur les questionnements, les méthodes et les approches). Lorsque des professionnels sont également impliqués, les scientifiques peuvent mieux comprendre les enjeux liés à tel ou tel objectif ou contrainte de terrain. Pour le groupe, la modélisation collaborative est donc un bon moyen de construire une conceptualisation partagée du problème, afin de mieux définir les interactions entre les différentes activités et d'anticiper des difficultés potentielles liées à la complexité des systèmes étudiés. Cependant, ces applications sont conditionnées par l'adhésion au dispositif des professionnels, comme des scientifiques. Cette acceptation peut d'ailleurs être encore plus difficile à obtenir dans le cadre de simulations participatives, qui comportent souvent un aspect ludique qui ne convient pas forcément à tout le monde. Dans ces conditions, l'utilisation d'autres formes de simulation collaborative est à favoriser.

6.6. Bibliographie

- [ANS 98] ANSELIN L., BERA A. K., "Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics", *STATISTICS TEXTBOOKS AND MONOGRAPHS*, vol. 155, p. 237–290, MARCEL DEKKER AG, 1998.
- [ASS 13] ASSOCIATION C., "La modélisation d'accompagnement : fondements et éthique d'une démarche de concertation pour un développement durable", ComMod, 2013.
- [BAR 03] BARRETEAU O., "The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, n° 2, 2003.

- [BAR 07] BARRETEAU O., LE PAGE C., PEREZ P., "Simulation and gaming in natural resource management", *Simulation and Gaming*, vol. 38, n° 2, p. 181-184, 2007.
- [BAR 10] BARSEGHIAN D., ALTINTAS I., JONES M. B., CRAWL D., POTTER N., GALLAGHER J., CORNILLON P., SCHILDHAUER M., BORER E. T., SEABLOOM E. W., HOSSEINI P. R., "Workflows and extensions to the Kepler scientific workflow system to support environmental sensor data access and analysis. Barseghian, Derik and Altintas", *Ecological Informatics*, vol. 5, n° 1, p. 42-50, 2010.
- [BAT 76] BATTY M., *Urban Modelling: Algorithms, Calibrations, Predictions*, Martin, Leslie and March, Lionel Editors, Cambridge University Press, 1976.
- [BAU 01a] BAUER B., MÜLLER J.-P., ODELL J., "Agent UML: a formalism for specifying multiagent software systems", *First international workshop, AOSE 2000 on Agent-oriented software engineering*, Secaucus, NJ, USA, Springer-Verlag New York, Inc., p. 91-103, 2001.
- [BAU 01b] BAUER B., MÜLLER J. P., ODELL J., "Agent UML: A Formalism for Specifying Multiagent Interaction", CIANCARINI P., WOOLDRIDGE M., Eds., *Agent-Oriented Software Engineering*, Springer, p. 91-103, 2001.
- [BEC 03] BECU N., BOUSQUET F., BARRETEAU O., PEREZ P., WALKER A., "A Methodology for Eliciting and Modelling Stakeholders' Representations with Agent Based Modelling", HALES D., EDMONDS B., NORLING E., ROUCHIER J., Eds., *Proc. of Multi-Agent-Based Simulation III*, Springer, Heidelberg, p. 131-148, 2003.
- [BEC 08] BECU N., NEEF A., SCHREINEMACHERS P., SANGKAPITUX C., "Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement", *Land Use Policy*, vol. 25, n° 4, 2008.
- [BEC 10] BECU N., BOMMEL P., BOTTA A., LE PAGE C., PEREZ P., "Technologies mobilisées pour l'accompagnement", ETIENNE M., Ed., *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*, Versailles, France, Quae Edition, p. 183-201, 2010.
- [BER 05] BERNON C., COSSENTINO M., PAVON J., "An Overview of Current Trends in European AOSE Research", *Informatica*, vol. 29, p. 379-390, 2005.
- [BLI 05] BLIKSTEIN P., ABRAHAMSON D., WILENSKY U., "Netlogo: Where we are, where we're going", EISENBERG M., EISENBERG A., Eds., *unknown*, Boulder, Colorado, IDC, 2005.
- [BOM 09] BOMMEL P., Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables, PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France, 2009.
- [BON 03] BON G. L., *Psychologie des foules*, Presses Universitaires de France - PUF, décembre 2003.
- [BOO 91] BOOCH G., *Object Oriented Design with Application*, Benjamin Cummings, 1991.
- [BOU 98] BOUSQUET F., BAKAM I., PROTON H., LE PAGE C., "Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems", *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, p. 826-837, Springer Berlin Heidelberg, 1998.

- [BRA 10] BRAX N., AMBLARD F., BECU N., SANTONI L., THIRIOT S., “When predictive modelling meet participatory simulation : a feedback on potential and issues of a combined approach”, ULM E., Ed., *unknown*, Paris, France, MAPS2 : Teaching of/with Agent-Based Models in the Social Sciences, 2010.
- [BRE 04] BRESCIANI P., PERINI A., GIORGINI P., GIUNCHIGLIA F., MYLOPOULOS J., “TROPOS: An Agent-Oriented Software Development Methodology”, *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*, vol. 8, n° 3, p. 203-236, 2004.
- [BRI 00] BRIASSOULIS H., *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*, Regional Research Institute, West Virginia University, 2000.
- [CAI 13] CAILLAULT S., DELMOTTE S., KÉDOWIDÉ C., MIALHE F., VANNIER C., AMBLARD F., BÉCU N., GAUTREAU P., ETIENNE M., HOUET T., “Assessing the influence of social and economical networks on land use and land cover changes: a neutral model based approach”, *Environmental Modelling and Software*, vol. 45, p. 64-73, 2013.
- [CER 07a] CERVENKA R., TRENCANSKY I., *The Agent Modeling Language - AML: A Comprehensive Approach to Modeling Multi-Agent Systems (Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing)*, Birkhäuser Basel, 2007.
- [CER 07b] CERVENKA R., TRENCANSKY I., *The Agent Modeling Language - AML: A Comprehensive Approach to Modeling Multi-Agent Systems*, Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing, Birkhäuser, 2007.
- [CHA 09] CHARLES M. MACAL M. J. N., “AGENT-BASED MODELING AND SIMULATION”, Winter Simulation Conference, p. 86-98, 2009.
- [CHA 13] CHASSET P., “RK4: Runge-Kutta 4th Order Method for the simulation software NetLogo”, <http://flow.chasset.net/netlogo-rk4/>, 2013.
- [CHI 13] CHIPEAUX S., Génération automatique de Systèmes Multi-Agents à partir de modèles pour la simulation à large échelle de systèmes complexes de grande taille, PhD thesis, Université de Franche-Comté, Décembre 2013.
- [COA 97] COAD P., NORTH D., MAYFIELD M., *Object models: strategies, patterns, and applications*, Yourdon Press, 1997.
- [COM 05] COMMOD C., “La modélisation comme outil d’accompagnement”, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 13, p. 165-168, EDP Sciences, 2005.
- [COQ 96] COQUILLARD P., HILL D. R. C., FRONTIER S., *Modélisation et simulation d’écosystèmes des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Masson, Paris; Milan; Barcelone, 1996.
- [DAM 94] DAMASIO A. R., *Descartes’ error: emotion, reason, and the human brain*, G.P. Putnam, 1994.
- [DAR 03] DARÉ W., BARRETEAU O., “A role-playing game in irrigated system negotiation: between play and reality”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, n° 3, 2003.
- [DEM 95] DEMAZEAU Y., “From Interactions to Collective Behaviour in Agent-Based Systems”, *The first European Conference on Cognitive Science*, Saint-Malo, p. 117-132, 1995.

- [DEM 97] DEMAZEAU Y., "Steps toward Multi-Agent Oriented Programming", *First in international Workshop on Multi-Agent Systems IWMAS'97*, USA, 1997.
- [DEM 03] DEMAZEAU Y., "Créativité Emergente Centrée Utilisateur", *11èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, Hammamet, Hermès, p. 31-36, 2003.
- [DRO 13] DROGOU A., AMOUROUX E., CAILLOU P., GAUDOU B., GRIGNARD A., MARILLEAU N., TAILLANDIER P., VAVASSEUR M., VO D.-A., ZUCKER J.-D., "GAMA: multi-level and complex environment for agent-based models and simulations", GINI M. L., SHEHORY O., ITO T., JONKER C. M., Eds., *AAMAS, IFAAMAS*, p. 1361-1362, 2013.
- [EDM 04] EDMONDS B., MOSS S., "From KISS to KIDS - An 'Anti-simplistic' Modelling Approach", DAVIDSSON P., LOGAN B., TAKADAMA K., Eds., *MABS*, vol. 3415 de *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, p. 130-144, 2004.
- [ETI 10] ETIENNE M., *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*, Quae Editions, 2010.
- [ETI 11] ETIENNE M., "Pédagogie active et enseignement de la biodiversité par la modélisation d'accompagnement", *Actes du Colloque: Education au développement durable et à la biodiversité : concepts, questions vives, outils et pratiques*, Digne-les-Bains, France, Education au développement durable et à la biodiversité : concepts, questions vives, outils et pratiques, 2011.
- [FAI 13] FAIVRE R., IOOSS B., MAHÉVAS S., MAKOWSKI D., MONOD H., *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: Application aux sciences de la nature et de l'environnement*, Collection Savoir-faire, Quae éditions, 2013.
- [FAP 00] FAP, FIPA KIF Content Language Specification, Rapport, FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, Suisse, 2000.
- [FER 95] FERBER J., *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, Informatique, Intelligence Artificielle, Interéditions, 1995.
- [FER 98] FERBER J., GUTKNECHT O., "Aalaadin: a meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems", (ED) Y. D., Ed., *ICMAS'98 (International Conference on Multi-Agent Systems)*, IEEE Press, p. 128-135, July 1998.
- [FER 03] FERBER J., GUTKNECHT O., MICHEL F., "From Agents to Organizations: an Organizational View of Multi-Agent Systems", P. GIORGINI J. MÜLLER J. O., Ed., *Agent-Oriented Software Engineering IV 4th International Workshop*, Melbourne, Australia, p. 214-230, July 2003.
- [FER 04] FERBER J., MICHEL F., BARRANCO J., "AGRE: Integrating Environments with Organizations", *Environments for Multi-Agent Systems, First International Workshop*, Springer, p. 48-56, 2004.
- [FIN 94] FININ T., FRITZSON R., MCKAY D., MCENTIRE R., "KQML as an agent communication language", *CIKM '94: Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management*, New York, NY, USA, ACM, p. 456-463, 1994.
- [FOR 61] FORRESTER J. W., *Industrial Dynamics*, Productivity Pr, student edition édition, 1961.

- [FOR 68] FORRESTER J. W., *Principles of Systems*, Pegasus Communications, 1968.
- [FOR 69] FORRESTER J. W., *Urban Dynamics*, MIT Press, février 1969.
- [FOU 05] FOURNIER S., Intégration de la dimension spatiale au sein d'un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation : Application à la navigation maritime, PhD thesis, Université de Rennes, France, 2005.
- [Fou02] Foundation for Intelligent Physical Agents, Genève, Suisse, FIPA Communicative Act Library Specification, 2002.
- [FRI 86] FRIJDA N. H., *The emotions*, N° novembre 2003 Studies in Emotion and Social Interactions, Cambridge University Press, 1986.
- [GAU 11] GAUDOU B., MARILLEAU N., HO T. V., "Toward a Methodology of Collaborative Modeling and Simulation of Complex Systems", *Intelligent Networking, Collaborative Systems and Applications*, p. 27-53, Springer, 2011.
- [GLO 04] GLOOR C., STUCKI P., NAGEL K., "Hybrid Techniques for Pedestrian Simulations.", SLOOT P. M. A., CHOPARD B., HOEKSTRA A. G., Eds., *Cellular Automata, 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, vol. 3305 de *Lecture Notes in Computer Science*, Amsterdam, Pays Bas, Springer, p. 581-590, 2004.
- [GRI 99] GRIMM V., "Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future?", *Ecological Modelling*, vol. 115, n° 2-3, p. 129-148, 1999.
- [GRI 06] GRIMM V., BERGER U., BASTIANSEN F., ELIASSEN S., GINOT V., GISKE J., GOSS-CUSTARD J., GRAND T., HEINZ S. K., HUSE G., HUTH A., JEPSEN J. U., JORGENSEN C., MOOIJ W. M., MULLER B., PE'ER G., PIOUS C., RAILSBACK S. F., ROBBINS A. M., ROBBINS M. M., ROSSMANITH E., RUGER N., STRAND E., SOUSSI S., STILLMAN R. A., VABO R., VISSER U., DEANGELIS D. L., "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models", *Ecological Modelling*, vol. 198, n° 1-2, p. 115-126, 2006.
- [GRI 10] GRIMM V., BERGER U., DEANGELIS D., POLHILL J., GISKE J., RAILSBACK S., "The ODD protocol: A review and first update", *Ecological Modelling*, vol. 221, p. 2760-2768, 2010.
- [GRI 13a] GRIGNARD A., TAILLANDIER P., GAUDOU B., VO D., HUYNH N., DROGOUL A., "GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation", *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, vol. 8291 de *Lecture Notes in Computer Science*, p. 117-131, 2013.
- [GRI 13b] GRIGNARD A., TAILLANDIER P., GAUDOU B., VO D., HUYNH N., DROGOUL A., "GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation", BOELLA G., ELKIND E., SAVARIMUTHU B., DIGNUM F., PURVIS M., Eds., *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, vol. 8291 de *Lecture Notes in Computer Science*, p. 117-131, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [GRI 14] GRIMM V., AUGUSIAK J., FOCKS A., FRANK B. M., GABSI F., JOHNSTON A. S., LIU C., MARTIN B. T., MELI M., RADCHUK V., THORBEC P., RAILSBACK S. F., "Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing,

- and analysis using {TRACE}", *Ecological Modelling*, vol. 280, n° 0, p. 129 - 139, 2014, Population Models for Ecological Risk Assessment of Chemicals.
- [HAG 73] HAGGETT P., *Analyse spatiale en géographie humaine*, Armand Colin, Paris, 1973.
- [HAY 84] HAYNES K., FOTHERINGHAM A., *Gravity and spatial interaction models*, Sage Publications, 1984.
- [INT 97] FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS F., "'FIPA '97 Specification Part 2: Agent Communication Language", available at <http://www.fipa.org>", 1997.
- [IRW 02] IRWIN E. G., BOCKSTAELE N. E., "Interacting agents, spatial externalities and the evolution of residential land use patterns", *Journal of Economic Geography*, vol. 2, n° 1, p. 31-54, 2002.
- [JAG 10] JAGERS H., "Linking data, models and tools: an overview", *International Congress on Environmental Modelling and Software*, Ottawa, Canada, 2010.
- [JEA 97] JEAN M. R., PESTY S., "Emergence et SMA", *Intelligence Artificielle et Système Multi-agents, JFIADMSA'97*, La Colle-sur-Loup, France, Hermès, p. 323-342, 1997.
- [JEN 00] JENNINGS N., "On agent-based software engineering", *Artificial Intelligence*, vol. 177, n° 2, p. 277-296, 2000.
- [JUD 88] JUDGE G., *Introduction to the theory and practice of econometrics*, Wiley, 1988.
- [KER 39] KERMACK W. O., MCKENDRICK A. G., "Contributions to the mathematical theory of epidemics", *The Journal of hygiene*, vol. 39, n° 3, p. 271-288, Springer, 1939.
- [KER 91] KERMACK W. O., MCKENDRICK A. G., "Contributions to the mathematical theory of epidemics III. Further studies of the problem of endemicity", *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 53, n° 1-2, p. 89-118, mars 1991.
- [KLE 07] KLEINBAUM D. G., *Applied regression analysis and multivariable methods*, CengageBrain.com, 2007.
- [KOR 08] KORICHI A., BELATTAR B., "Towards a Web Based Simulation Groupware: Experiment with BSCW", *Information Technology Journal*, vol. 7, n° 2, p. 332-337, 2008.
- [LAN 89] LANGTON C., *Artificial Life I*, Addison-Wesley, 1989.
- [LAN 13] LANGLOIS P., BLANPAIN B., DAUDÉ E., "MAGéo, une plateforme de simulation multi-agents pour tous", *SimTools*, 2013.
- [LEG 97] LEGAY J.-M., *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode.*, Collection Sciences en questions, INRA Editions, Paris, 1997.
- [LEM 90] LE MOIGNE J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, Bordas, 1990.
- [LEP 05] LE PAGE C., BOMMEL P., *A methodology for building agent-based simulations of common-pool resources management: from a conceptual model designed with UML to its implementation in CORMAS*, IIRI Press, 2005.
- [LUK 04] LUKE S., CIOFFI-REVILLA C., PANAIT L., SULLIVAN K., "Mason: A new multi-agent simulation toolkit", *SwarmFest Workshop*, vol. 8, 2004.
- [LUM 04] LUMINET O. V. N., *The Handbook of cognitive psychology*, unknown, 2004.

- [MAR 08] MARILLEAU N., CAMBIER C., DROGOU A., PERRIER E., CHOTTE J., BLANCHART E., “Multiscale MAS modelling to simulate the soil environment: Application to soil ecology”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, n° 7, p. 736–745, 2008.
- [MAS 07] MASSE D., CAMBIER C., BRAUMAN A., SALL S., ASSIGBETSE K., CHOTTE J., “MIOR: an individual-based model for simulating the spatial patterns of soil organic matter microbial decomposition”, *European journal of soil science*, vol. 58, p. 1127–1135, 2007.
- [MIN 96] MINAR N., Y R. B., Z C. L., *The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations*, Rapport, Santa Fe Institute, 1996.
- [NAI 10] NAIVINIT W., LE PAGE C., TRÉBUIL G., GAJASENI N., “Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 11, p. 1345–1358, 2010.
- [NGU 09] NGUYEN K. T., BENOIT G., VINH H. T., NICOLAS M., “Application of PAMS Collaboration Platform to Simulation-Based Researches in Soil Science: The Case of the MICRO-ORGANISM Project”, *IEEE-RIVF International Conference on Computing and Telecommunication Technologies*, IEEE-RIVF, 2009.
- [NOR 13a] NORTH M., COLLIER N., OZIK J., TATARA E., MACAL C., BRAGEN M., SYDELKO P., “Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony”, *Complex Adaptive Systems Modeling*, vol. 1, n° 1, Page 3, 2013.
- [NOR 13b] NORTH M.J.AND COLLIER N., OZIK J., TATARA E., ALTAWHEEL M., MACAL C., BRAGEN M., P. S., “Complex Adaptive Systems Modeling with Repast Symphony”, *Complex Adaptive Systems Modeling*, FRG, Springer, 2013.
- [OCC 01] OCCELLO M., KONING J.-L., BAEIJIS C., “Conception des Système Multi-Agent : quelques éléments de réflexion méthodologique.”, *Technique et science informatique*, vol. 20, n° 2, p. 233-263, 2001.
- [ODE 99] ODELL J., PARUNAK H. V. D., BAUER B., “Representing Agent Interaction Protocols in UML”, *In OMG Document ad/99-12-01. Intellicorp Inc*, Springer-Verlag, p. 121–140, 1999.
- [ODE 00] ODELL J., PARUNAK H., BAUER B., “Extending UML for Agents”, G. WAGNER Y. LESPERANCE E. Y., Ed., *Proc. of the Agent-Oriented Information Systems Workshop at the 17th National conference on Artificial Intelligence.*, p. 3–17, 2000.
- [OMG 03] OMG, “Unified Modeling Language: Superstructure version 2.0”, 2003.
- [OST 94] OSTROM E., GARDNER R., WALKER J., *Rules, games, and common-pool resources*, University of Michigan Press, 1994.
- [PAD 02] PADGHAM L., WINIKOFF M., “Prometheus: A Methodology for Developing Intelligent Agents”, GIUNCHIGLIA F., ODELL J., WEISS G., Eds., *Agent-Oriented Software Engineering III*, vol. 2585 de LNCS, Springer-Verlag, p. 174-185, 2002.
- [PAG 12] PAGE C. L., BECU N., BOMMEL P., BOUSQUET F., “Participatory Agent-Based Simulation for Renewable Resource Management: The Role of the Cormas Simulation Platform to Nurture a Community of Practice”, *J. Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 15, n° 1, 2012.

- [POL 08] POLHILL J. G., PARKER D., BROWN D., V. G., "Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land-use change", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 11, n° 2, 2008.
- [POL 10] POLHILL J. G., "ODD Updated", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 13, n° 4, 2010.
- [PRO 05] PROVITOLLO D., "Un exemple d'effet de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines", *Cybergeo : Revues européenne de géographie*, vol. 328, 2005.
- [PRO 07] PROVITOLLO D., "A proposition for a classification of the catastrophe systems based on complexity criteria", *Proceedings of EPNACS'07, Emergent Properties in Natural and Artificial Complex Systems*, 4-5 octobre 2007, 2007.
- [PRU 02] PRUNEAU D., LAPOINTE C., "Un, deux, trois, nous irons au bois. L'apprentissage expérientiel et ses applications en éducation relative à l'environnement", *Éducation et francophonie*, vol. 30, n° 2, p. 241-256, 2002.
- [QUE 09] QUESNEL G., DUBOZ R., RAMAT E., "The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems", *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, p. 641-653, April 2009.
- [RAI 11] RAILSBACK S. F., GRIMM V., *Agent-based and individual-based modeling : a practical introduction*, Princeton University Press, 2011.
- [RAO 91] RAO A. S., GEORGEFF M. P., "Modeling rational agents within a BDI-architecture", *Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers, 1991.
- [REN 02] RENNARD J.-P., *Vie Artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique*, Vuibert, 2002.
- [RES 96] RESNICK M., "StarLogo: an environment for decentralized modeling and decentralized thinking", *Conference companion on Human factors in computing systems*, p. 11-12, 1996.
- [RES 97] RESNICK M., *Turtles, Termites and Traffic Jams Explorations in Massively Parallel Microworlds.*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- [REU 13] REUILLON R., LECLAIRE M., REY-COYREHOURCQ S., "OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models", *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n° 8, p. 1981 - 1990, 2013.
- [RYK 96] RYKIEL E., "Testing ecological models: the meaning of validation", *Ecological Modelling*, vol. 90, p. 229-244, 1996.
- [SAL 09] SALTELLI A., CHAN K., SCOTT E., *Sensitivity Analysis*, N° n° 2008Wiley paperback series, Wiley, 2009.
- [SAN 05] SANDERS L., "Simulation des systèmes urbains", *Ecole thématique CNRS : modélisation et simulation multi-agent de systèmes complexe pour les SHS*, Poquerolles, 2005.
- [SCH 65] SCHLAGER K. J., "A LAND USE PLAN DESIGN MODEL", *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 31, n° 2, p. 103-111, 1965.

- [SCH 99a] SCHERER K. R., "Appraisal theory. Handbook of cognition and emotion.", *unknown*, p. 637–663, unknown, 1999.
- [SCH 99b] SCHERER K. R., "On the Sequential Nature of Appraisal Processes: Indirect Evidence from a Recognition Task", *Cognition and Emotion*, vol. 13, n° 6, p. 763–793, 1999.
- [SCH 02] SCHWEITZER F., "Brownian Agent Models for Swarm and Chemotactic Interaction. Abstracting and Synthesizing the Principles of Living Systems", *Fifth German Workshop on Artificial L*, Nerlin, Allemagne, p. 181-190, 2002.
- [SCH 03] SCHWEITZER F., FARMER J. D., *Brownian Agents and Active Particles: Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences*, Springer, 2003.
- [SIL 03] SILVA V., GARCIA A., BRANDÃO A., CHAVEZ C., LUCENA C., ALENCAR P., "Taming Agents and Objects in Software Engineering", *Software Engineering for Large-Scale Multi-Agent Systems: Research Issues and Practical Applications, volume LNCS 2603*, Springer-Verlag, p. 1–25, 2003.
- [SIN 00] SINCLAIR T., SELIGMAN N., "Criteria for publishing papers on crop modeling", *Field Crops Research*, vol. 68, n° 3, p. 165-172, 2000.
- [STU 03] STURM A., DORI D., SHEHORY O., "Single-model method for specifying multi-agent systems", *AAMAS '03: Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, New York, NY, USA, ACM, p. 121–128, 2003.
- [TAY 07] TAYLOR I. J., DEELMAN E., GANNON D. B., SHIELDS M., *Workflows for e-Science: Scientific Workflows for Grids*, Springer, 2007.
- [TIS 04] TISUE S., WILENSKY U., "NetLogo: A simple environment for modeling complexity", *International Conference on Complex Systems*, p. 16–21, 2004.
- [TRE 05] TRENCANSKY I., CERVENKA R., "Agent Modeling Language (AML): A Comprehensive Approach to Modeling MAS", *Informatica*, vol. 29, p. 391-400, 2005.
- [TRO 09] TRONG KHANH NGUYEN B. GAUDOU T. V. H., MARILLEAU N., "PAMS Collaboration Platform to Simulation-Based Researches in Soil Science: The Case of the MICROrganism Project", *RIVF, International Conference on Computing and Communication Technologies*, IEEE, p. 1-8, 2009.
- [UML05] UML 2.0 Superstructure Specification, Rapport, Object Management Group (OMG), August 2005.
- [VAR 13] VARENNE F., SILBERSTEIN M., *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, tome 1*, Editions Matériologiques, 2013.
- [VIA 11] VIAL G., "Le système proie-prédateur de Volterra-Lotka.", *Site de l'Ecole Centrale de Lyon*, 2011.
- [VIN 99] VINCK D., "Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique", *Revue Française de Sociologie*, vol. 40, n° 2, p. 385-414, 1999.
- [VOI 10] VOINOV A., BOUSQUET F., "Modelling with stakeholders", *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 1, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente and Cirad, UPR Green, 2010.

- [WAL 77] WALLISER B., *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes.*, Editions du Seuil, 1977.
- [WAN 09] WANG L., JIE W., CHEN J., *Grid Computing: Infrastructure, Service, and Applications*, CRC Press, 2009.
- [WAT 92] WATSON D., CLARK L. A., "On traits and temperament: general and specific factors of emotional experience and their relation to the five-factor model", *Journal of Personality*, vol. 60, n° 2, p. 441-476, juin 1992, PMID: 1635050.
- [WIL 74] WILSON A., *Urban and regional models in geography and planning*, Wiley, 1974.
- [WOO 97] WOOLDRIDGE M., "Agent based software engineering", *Software Engineering*, vol. 144, p. 26-37, 1997.
- [z83] "Fatal Panic on the Bridge, Twelve personnes killed and many injured", <http://chroniclingamerica.loc.gov/lccn/sn83030214/1883-05-31/ed-1/seq-1/>, mai, 31 1883.
- [za83] "Terrible Disaster", <http://chroniclingamerica.loc.gov/lccn/sn82014381/1883-05-31/ed-1/seq-1/>, mai, 31 1883.
- [ZAM 03] ZAMBONELLI F., JENNINGS N., WOOLDRIDGE M., "Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology", *ACM Trans. on Software Engineering and Methodology*, vol. 12, n° 3, p. 317-370, 2003.